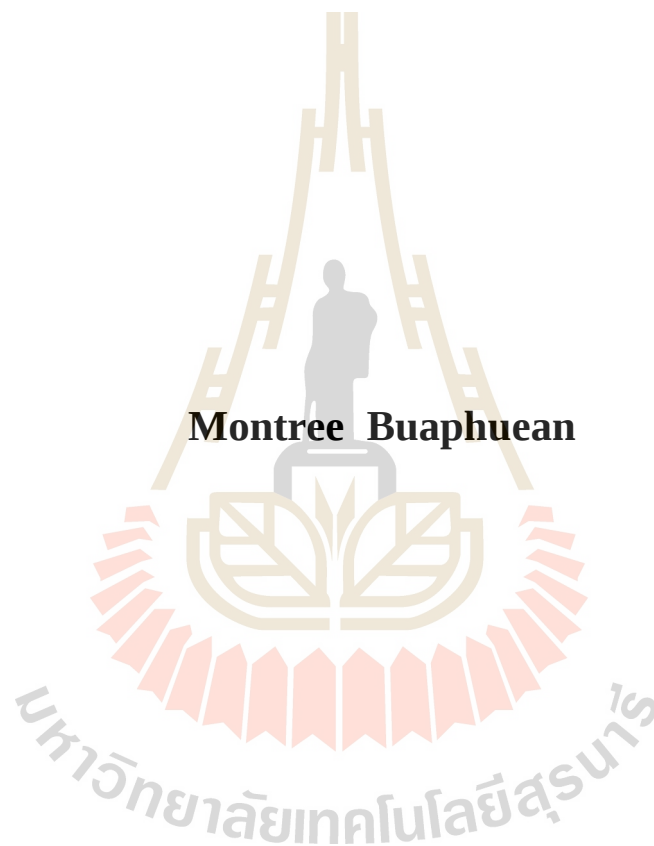


การออกแบบสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ
กำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**THE DESIGN OF HIGH POWER JAMMING SYSTEM
FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND
DISTANCE THREATS PREVENTION**



Montree Buaphuean

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การออกแบบสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับ
ป้องกันภัยคุกคามระยะไกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สำราญ สันทาคูณย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มนตรี บัวเฟื่อน : การออกแบบสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงาน
สูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล (THE DESIGN OF HIGH POWER JAMMING
SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND DISTANCE
THREATS PREVENTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาบุญ, 86 หน้า.

ในปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าโดรน (Drone) ซึ่งก็คืออากาศยานที่ไม่มีคนขับแต่สามารถควบคุมได้แบบอัตโนมัติซึ่งมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันไป เป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมการทำงานได้จาก ระยะไกลและสามารถใช้หลักการควบคุมแบบอัตโนมัติในตัว ซึ่งในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้ ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในภาคการดูแลพืชผลทางการเกษตร ตัวอย่างเช่น ช่วยในการรดน้ำ ให้สารเคมี หรือการตรวจสอบผลผลิต ซึ่งสามารถช่วยให้การทำงาน หรือกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือแม้กระทั่งภาคการผลิตสัตว์ ซึ่งสามารถใช้สำหรับการ เลี้ยงดู หรือการเฝ้าดูพฤติกรรมของสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่นการรับส่ง สินค้าต่าง ๆ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการ ใช้ ประโยชน์ได้อีกมากมาย หรือนำมาใช้ในการตรวจจับองค์ประกอบในอากาศ การถ่ายภาพมุมสูง ดูสภาพการจราจร ช่วยเหลือภัยพิบัติต่าง ๆ หรือแม้กระทั่งการโจมตีทางอากาศ ซึ่งในประเทศไทย ก็เริ่มมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญสำหรับความปลอดภัยและความมั่นคงของประเทศ และภัยต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในภายภาคหน้าจึงได้มีการศึกษาและค้นหาแนวทางที่จะทำการควบคุม อากาศยานไร้คนขับจากผู้ที่ไม่ประสงค์ดี ซึ่งได้พบว่าการใช้หลักการของระบบรบกวนสัญญาณคลื่น ความถี่กำลังสูงเพื่อไปควบคุมการทำงานของอากาศยานไร้คนขับเป็นวิธีการที่จะสามารถควบคุม และเฝ้าระวังได้เป็นอย่างดี นั่นคือการสร้างคลื่นรบกวนความถี่สูงกำลังงานสูงซึ่งจะทำงานโดยการ ส่งคลื่นที่มีความถี่เดียวกับความถี่การใช้งานของอากาศยานไร้คนขับ

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

มนตรี บัวเฟื่อน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

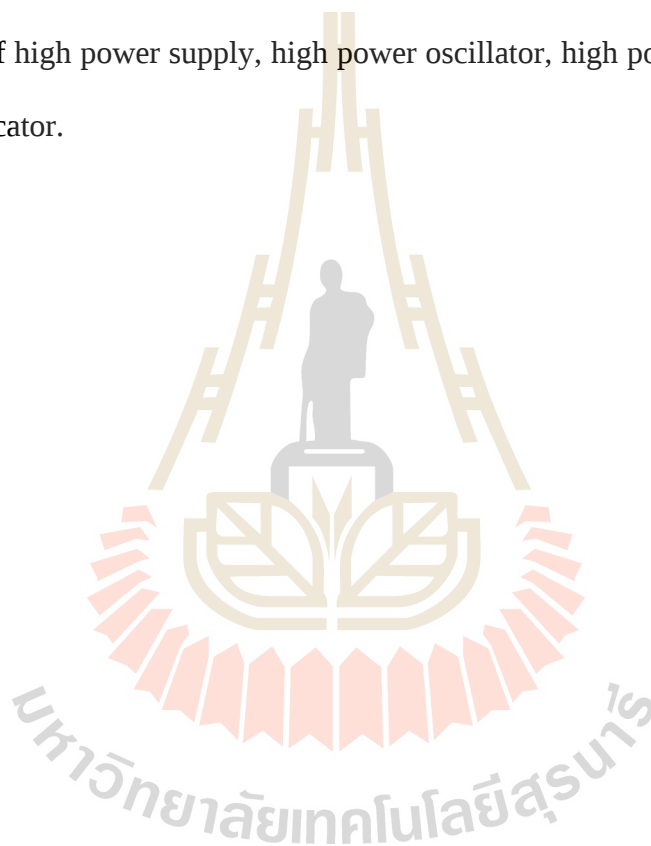
MONTREE BUAPHUEAN : THE DESIGN OF HIGH POWER JAMMING
SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND DISTANCE
THREATS PREVENTION. THESIS ADVISOR : SUMRUN SANTALUNAI
Ph.D., 86 PP.

HIGH POWER JAMMING SYSTEM

Nowadays, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or Drone. Is an aircraft that can be controlled remotely and automatically control. Currently, drone is being as widely used in agriculture, commerce, high angle view, traffic conditions, disaster assistance and sending the trade. Unmanned aerial Vehicle control system is used to control by using the radio from the ground or the used of computerized flight by using computer controller. In addition, a navigation and a guidance system are an important part of the UAV. In current, the navigation and the guidance mostly use GPS at ISM band to control the system. The bringing a lot of UAV but no better control that may result in threats to come. There are the use of UAV to terrorism or spying the landmark of the country such as the government and the armies of the country. Criminal uses UAV for the terrorist or the spy because the UAV is device that can be controlled automatically, controlling with the long distance and clearly camera images.

Thus, the researchers have realized the importance for the security and stability of the country. To study and find way to control UAV from the criminal, the usability high-power radio frequency jamming in a method to control and surveillance as well. That is high power radio frequency jammer worked by sending waves with the same frequency as UAV that is used to communicate. The signal jammer generator generates the jammer signal to annoy the radio spectrum at the ground controlled

output. The signal jammer generator is designed to generate the frequency that matches the frequency of UAV and there was enough to send both signals cancel each other completely. To stop the operation of UAV to be motionless, the UAV is forced by using the radio frequency jammer. The research team designs the high power radio frequency jammer generator to control the threats from UAV for military stability, consisted of two jammer wave generator. There are the frequency of ISM band consisting of high power supply, high power oscillator, high power amplifier and high power applicator.



School of Electronic Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature Montree Buaphuan

Advisor's Signature

[Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอดและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

มนตรี บัวเพื่อน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฑ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	4
2.4.1 ประสิทธิภาพ (Efficiency)	4
2.4.2 ระเบียบวิธีวิจัย	4
2.4.3 สถานที่ทำการวิจัย	4
2.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 บทนำ	10
2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่	10

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.1	วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิคคิตสัน	12
2.2	หลักการและทฤษฎีวงจรขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF Power Amplifier)	14
2.4.1	กำลังเอาต์พุต (Output Power)	15
2.4.2	อัตราขยาย (Gain)	16
2.4.3	ประสิทธิภาพ (Efficiency)	16
2.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ	18
2.5.1	สายอากาศไดโพล	18
2.5.2	การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna Polarization)	22
2.5.3	จานดาวเทียมแบบออฟเซตพาราโบลา (Offset paraboloid)	23
2.4	การสูญเสียในอากาศ (Free Space Path Loss)	25
2.5	สรุป	27
3	ออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง	28
3.1	บทนำ	28
3.2	การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS และ Wi-Fi	35
3.3	การออกแบบวงจรรวมสัญญาณและวงจรแยกสัญญาณแบบวิคคิตสัน	37
3.4	การออกแบบชุดขับกำลังสัญญาณ	41
3.4.1	การทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณที่ความถี่ 1.575 GHz	44
3.4.2	ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz	46
3.4.3	การทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz	47
3.4.4	ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 2.4 GHz	48
3.5	การออกแบบชุดสายอากาศ (Antenna)	48
3.6	สรุป	51
4	ผลการทดลองและการติดตั้ง	52
4.1	กล่าวนำ	52

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2	การวัดผลทดลองระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ	
	กำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล.....	52
4.2.1	การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS และ Wi-Fi.....	52
4.2.2	การวัดผลการทดลองชุดขยายกำลังสัญญาณในย่าน GPS	
	ความถี่ 1.575 GHz.....	55
4.2.3	การวัดผลการทดลองชุดขยายกำลังสัญญาณในย่าน Wi-Fi	
	ความถี่ 2.4 GHz.....	59
4.2.4	การวัดผลการทดลองการออกแบบชุดสายอากาศ.....	63
	ความถี่ 1.575 GHz.....	55
4.3	การติดตั้งและทดสอบจริง.....	67
4.3.1	การทดสอบเครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ	
	กำลังงานสูงในระบบ GPS ที่ ความถี่ 1.575 GHz.....	67
4.3.2	การทดสอบเครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ	
	กำลังงานสูงในระบบ Wi-Fi ที่ ความถี่ 2.4 GHz.....	71
4.4	สรุป.....	75
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1	สรุปเนื้อหาของการวิจัย.....	76
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	76
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	77
	เอกสารอ้างอิง.....	78
	ภาคผนวก ก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	80
	ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	กำลังงานภาคส่งสำหรับรบกวนสำหรับตัดสัญญาณ ที่ระยะต่าง ๆ และ จานพาราโบลาที่ขนาดต่าง ๆ ในหน่วย (วัตต์) ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz.....
3.2	กำลังงานภาคส่งสำหรับรบกวนสำหรับตัดสัญญาณ ที่ระยะต่าง ๆ และ จานพาราโบลาที่ขนาดต่าง ๆ ในหน่วย (วัตต์) ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz.....
3.3	แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz.....
3.4	แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....
3.5	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสองย่านความถี่.....
4.1	ผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 1.575 GHz.....
4.2	ผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz.....
4.3	แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz.....
4.4	แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 2.4 GHz.....
4.5	ผลการวัดค่ากำลังเทียบกับระยะทาง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz.....
4.6	ผลการวัดค่ากำลังเทียบกับระยะทาง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz.....

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการผลิตพืช.....	1
1.2 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการผลิตสัตว์.....	2
1.3 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์.....	2
1.4 ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Area.....	6
1.5 ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Pin Point.....	7
1.6 แผนผังระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ.....	8
1.7 แผนผังระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ.....	9
1.8 การทดสอบระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ.....	9
2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวก.....	11
2.2 ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ.....	12
2.3 ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ.....	13
2.4 รูปแบบพื้นฐานของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิลคิลสัน.....	14
2.5 หลักการขยายสัญญาณของ RF Power Amplifier.....	15
2.6 องค์ประกอบหลักของ Power Amplifier.....	16
2.7 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency).....	17
2.8 สายอากาศไดโพล.....	18
2.9 ระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไดโพล.....	20
2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลในอุดมคติ.....	20
2.11 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลในอุดมคติ.....	21
2.12 ที่กระจายตามความยาวกระแสในไดโพล $\lambda/2$	21
2.13 แพทเทิร์นการแผ่คลื่น E-plane ไดโพล $\lambda/2$ (solid line) และไดโพลอุดมคติ.....	22
2.14 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15	จานดาวเทียมแบบออฟเซตพาราโบลอยด์.....24
2.16	โครงสร้างจานแบบพาราโบลอยด์.....24
2.17	รูปโครงสร้างการสูญเสียในอากาศ.....29
3.1	การทดสอบระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ.....33
3.2	โครงสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลในความถี่ 1.575 GHz.....34
3.3	โครงสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลในความถี่ 2.4 GHz.....34
3.4	ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS 1.575 GHz.....35
3.5	ผลการทดสอบสัญญาณ GPS 1.575 GHz.....35
3.6	ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ Wi-Fi 2.4 GHz.....36
3.7	ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ Wi-Fi 2.4 GHz.....36
3.8	โครงสร้างวงจรไมโครสตริป.....37
3.9	รูปแบบพื้นฐานของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน.....39
3.10	โครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบ.....40
3.11	แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าแบบ FR4.....40
3.12	ทรานซิสเตอร์ เบอร์ T1G2028536-FL สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ GHz.....41
3.13	วงจรทรานซิสเตอร์ เบอร์ T1G2028536-FL สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ GPS.....41
3.14	ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ Wi-Fi.....42
3.15	ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบ คลื่นความถี่ WI-FI.....42
3.16	การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ.....43
3.17	การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ.....43
3.18	การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ.....44
3.19	การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ.....45
3.20	การป้องกันกำลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่.....45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21	การวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม..... 46
3.22	การเตรียมการทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ..... 47
3.23	โครงสร้างสายอากาศ 2 ย่านความถี่..... 49
3.24	การจำลองแบบสายอากาศสองย่านความถี่..... 50
3.25	การจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S11)..... 50
3.26	สายอากาศสองย่านความถี่ใช้ในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ..... 51
4.1	การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 1.575 GHz..... 53
4.2	การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz..... 54
4.3	แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร..... 55
4.4	การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร..... 55
4.5	แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วงจร..... 56
4.6	การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วงจร..... 56
4.7	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 1..... 57
4.8	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 2..... 57
4.9	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุต 2 วงจร..... 58
4.10	แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร..... 60
4.11	การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร..... 60
4.12	รูปที่ 4.12 แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วงจร..... 61
4.13	การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วงจร..... 61
4.14	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 1..... 62
4.15	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 2..... 62
4.16	วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุต 2 วงจร..... 62
4.17	สายอากาศสองย่านความถี่ใช้ในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ..... 63
4.18	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ..... 64
4.19	ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 1.575 GHz..... 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (H-plane) ที่ความถี่ 1.575 GHz..... 65
4.21	ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ที่ความถี่ 2.4 GHz..... 65
4.22	ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (H-plane) ที่ความถี่ 2.4 GHz..... 66
4.23	จานพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 เซนติเมตร..... 66
4.24	การเตรียมการทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz..... 67
4.25	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 100 เมตร..... 68
4.26	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 500 เมตร..... 68
4.27	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 1000 เมตร..... 69
4.28	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 1500 เมตร..... 69
4.29	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 2000 เมตร..... 70
4.30	การเตรียมการทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz..... 71
4.31	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 100 เมตร..... 72
4.32	การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 500 เมตร..... 72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 1000 เมตร.....	73
4.34 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 1500 เมตร.....	73
4.35 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 2000 เมตร.....	74



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

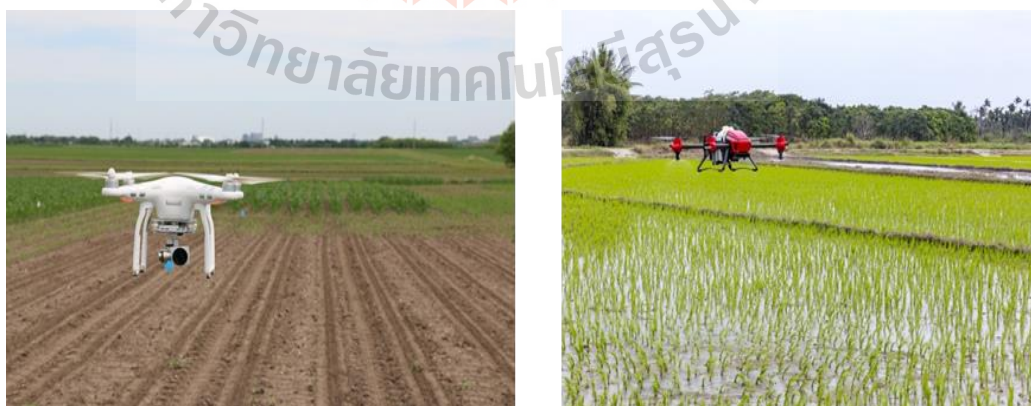
A	=	<i>amplitude</i>
C	=	capacitor
R	=	resistance
IC	=	integrated circuit
F	=	focal length
Z_o	=	output impedance
PE	=	power efficiency
k	=	efficiency factor
S -parameter	=	scattering parameter
P	=	heat power source density
S_{11}	=	input reflection coefficient
D	=	diameter of the parabolic reflector
d	=	antenna depth
w	=	width of the microstrip line
f	=	frequency
λ	=	wavelength
UAV	=	Unmanned Aerial Vehicle
GPS	=	Global Positioning System
LNB	=	low-noise block downconverter
IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
PCB	=	printed circuit board

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

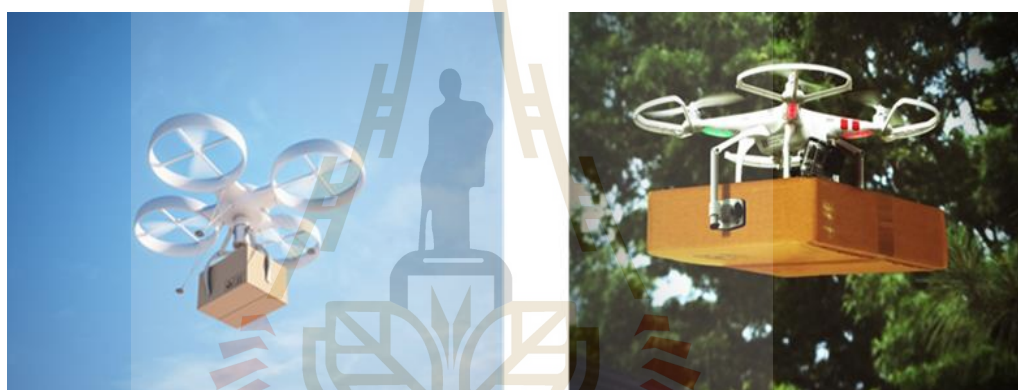
ในปัจจุบัน อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าโดรน (Drone) ซึ่งก็คืออากาศยานที่ไม่มีคนขับแต่สามารถควบคุมได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันไป เป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมการทำงาน ได้จากระยะไกลและสามารถใช้หลักการควบคุมแบบอัตโนมัติในตัว ซึ่งในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในการดูแลพืชผลทางการเกษตร ตัวอย่างเช่น ช่วยในการรดน้ำ ให้สารเคมี หรือการตรวจสอบผลผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถช่วยให้การทำงานหรือกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือแม้กระทั่งภาคการผลิตสัตว์ ซึ่งสามารถใช้สำหรับการเลี้ยงดู หรือการเฝ้าดูพฤติกรรมของสัตว์ ดังแสดงรูปที่ 1.2 นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น การรับส่งสินค้าต่าง ๆ ซึ่งกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการใช้ประโยชน์ ได้อีกมากมาย ดังแสดงในรูปที่ 1.3 หรือนำมาใช้ในการตรวจจับองค์ประกอบในอากาศ การถ่ายภาพมุมสูง ดูสภาพการจราจร ช่วยเหลือภัยพิบัติต่างๆ หรือแม้กระทั่งการโจมตีทางอากาศ ซึ่งในประเทศไทยก็เริ่มมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 1.1 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการผลิตพืช



รูปที่ 1.2 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการผลิตสัตว์



รูปที่ 1.3 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์

ในปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับมีหลักการทำงานโดยอาศัยการควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกลและการควบคุมแบบอัตโนมัติ หลักการควบคุมในปัจจุบันใช้ระบบการบิน 2 รูปแบบ คือแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเอง และแบบการควบคุมโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบการบินด้วยตนเองต้องอาศัยโปรแกรมติดตั้งไว้ในอากาศยาน และส่วนของการบังคับเส้นทางการบินนั้น อากาศยานไร้คนขับมีระบบควบคุม (Control System) คือ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบการบังคับแบบใช้วิทยุจากพื้นดิน สำหรับการใส่โปรแกรมควบคุมการบินด้วยระบบคอมพิวเตอร์ จะมีระบบนำร่องและนำวิถี (Navigation and Guidance System) เป็นส่วนที่สำคัญของอากาศยานไร้คนขับ ในปัจจุบันระบบนำร่องและนำวิถี ส่วนใหญ่จะใช้ระบบจีพีเอส (GPS) เป็นตัวช่วย ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน ISM Band ในการควบคุมการทำงาน โดยจะเห็นว่าเป็นระบบที่ใช้งานง่ายและคุ้มค่าต่อการลงทุนซึ่งจากตัวอย่างและหลักที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นแสดง

ให้เห็นว่าอากาศยานไร้คนขับ เริ่มมีบทบาทสำหรับการใช้งานในประเทศมากขึ้นทุกวัน การที่มีอากาศยาน ไร้คนขับใช้งานเป็นจำนวนมากในปัจจุบันโดยไม่มีการควบคุมที่ดีนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อภัยคุกคาม ที่จะตามมานั่นคือ การใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการก่อการร้าย ลักลอบขนยาเสพติด หรือการสอดแนมสถานที่สำคัญต่าง ๆ เช่น หน่วยงานราชการของประเทศ กองทัพของประเทศ เป็นต้น ซึ่งผู้ไม่ประสงค์ดีอาจใช้วิธีการนี้สำหรับก่อการร้าย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมได้แบบอัตโนมัติ การควบคุมได้ในระยะที่ไกล และกล้องที่สามารถมองเห็นภาพได้อย่างชัดเจน ซึ่งก่อให้เกิดภัยคุกคามต่าง ๆ ตามมาได้อีกมากมาย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญสำหรับความปลอดภัยและความมั่นคงของประเทศและภัยต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในภายภาคหน้า จึงได้มีการศึกษาและค้นหาแนวทางที่จะทำการควบคุมอากาศยานไร้คนขับจากผู้ที่ไม่ประสงค์ดี ซึ่งได้พบว่า การใช้หลักการของระบบรบกวนสัญญาณคลื่นความถี่กำลังสูงเพื่อไปควบคุมการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ เป็นวิธีการที่จะสามารถควบคุม และเฝ้าระวังได้เป็นอย่างดี นั่นคือการสร้างคลื่นรบกวนความถี่สูงกำลังงานสูง ซึ่งจะทำงานโดยการส่งคลื่นที่มีความถี่เดียวกับความถี่การใช้งานของอากาศยานไร้คนขับ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างระบบรบกวนและควบคุมภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ระยะทำการมากกว่า 2 กิโลเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์และปรับแต่งระบบการส่งกำลังงานเพื่อการควบคุม ระยะการรบกวนและการควบคุม เพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพในการทำงานจริงที่มีความแม่นยำสูง และเป็นระบบที่ประหยัดพลังงาน

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การส่งสัญญาณกำลังงานสูงกว่าภาครับของอากาศยานไร้คนขับจะสามารถรบกวนและตัดสัญญาณให้ไม่สามารถควบคุมและนำทางอัตโนมัติได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ออกแบบและสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร สามารถตัดสัญญาณการควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยคลื่นความถี่สูงกำลังสูง ทำให้อากาศยานไร้คนขับไม่สามารถเข้ามาในบริเวณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับระบบรบกวนและควบคุมภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับด้วยคลื่นความถี่สูงกำลังสูง ในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน
- 1.5.2 ออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร
- 1.5.3 ทดสอบระบบวัดและควบคุมต่าง ๆ ของระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบตัดสัญญาณ รูปแบบแบบต่าง ๆ ที่มีในปัจจุบันเพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจและออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จึงได้ทำการออกแบบและสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล เมื่อระบบพร้อมใช้งานจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบและทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของระบบดังนี้ ระยะทางในการตัดสัญญาณ กำลังส่งภาครับ อัตราขยายของสายอากาศ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1.6.2.1 ศึกษาค้นหาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.6.2.2 วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ด้วยข้อมูลต่าง ๆ ทางคณิตศาสตร์หรือข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการ เกี่ยวกับระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล

1.6.2.3 สร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อทำการวัดและทดสอบประสิทธิภาพในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ พร้อมทั้งทำการทดลองผลให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

1.6.3.1 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.3.2 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.3.3 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเกษตรวิวัฒน์ (F14) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1.6.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (laptop)
- 1.6.4.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer)
- 1.6.4.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)
- 1.6.4.4 เครื่องวัดกำลัง (power meter)
- 1.6.4.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน
- 1.6.4.6 แหล่งจ่ายไฟ (power supply)
- 1.6.4.7 ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้เครื่องต้นแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร

1.7.2 ได้องค์ความรู้ในเรื่องของการออกแบบระบบตัดสัญญาณ ซึ่งเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานหรือสถาบันต่าง ๆ ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อยกระดับและต่อยอดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.7.3 รู้จักกระบวนการคิด วิเคราะห์ อย่างเป็นระบบ เพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำความรู้ไปใช้ประกอบวิชาชีพได้

1.8 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ออกแบบและสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล อากาศยานไร้คนขับหรือโดรน เริ่มมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จำนวนอากาศยานไร้คนขับที่เพิ่มมากขึ้นทำให้จำนวนเหตุการณ์ที่อากาศยานไร้คนขับ บินเข้าสู่พื้นที่หวงห้ามก็สูงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้อาจจะมีการนำ อากาศยานไร้คนขับกลอบขนสิ่งของผิดกฎหมาย ใช้เป็นอาวุธ หรือการกระทำอื่นที่ผิดต่อกฎหมาย ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายได้ ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อป้องกันปัญหา ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ ณ ปัจจุบันที่มีการใช้งานอยู่แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Area ในรัศมี 9 กิโลเมตร

ของสนามบิน จะมีการกระจายปีกเสาระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Area ดังแสดงในรูปที่ 1.4 หากโดรนเข้าพื้นที่เขตห้ามบิน โดรนจะถูกโจมตี โดยระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Area นั้นสามารถโจมตีอากาศยานไร้คนขับ (Drone) ได้พร้อมกันมากกว่า 10 จุด เมื่ออากาศยานไร้คนขับนั้นเข้ามาใน รัศมีเสาด้านอากาศยานไร้คนขับ สามารถค้นหาอากาศยานไร้คนขับได้ในรัศมี 1000 เมตร ต่อด้านระบุทิศ 600 เมตร และต่อด้านรอบทิศ 300 เมตร โดยทันทีที่อากาศยานไร้คนขับเข้าใกล้สนามบิน ในเขตห้ามบิน ระบบจะรายงานไปยังศูนย์รักษาความปลอดภัยของสนามบินพร้อมทั้งระบบเสาด้านอากาศยานไร้คนขับทำงานโจมตี



รูปที่ 1.4 ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Area

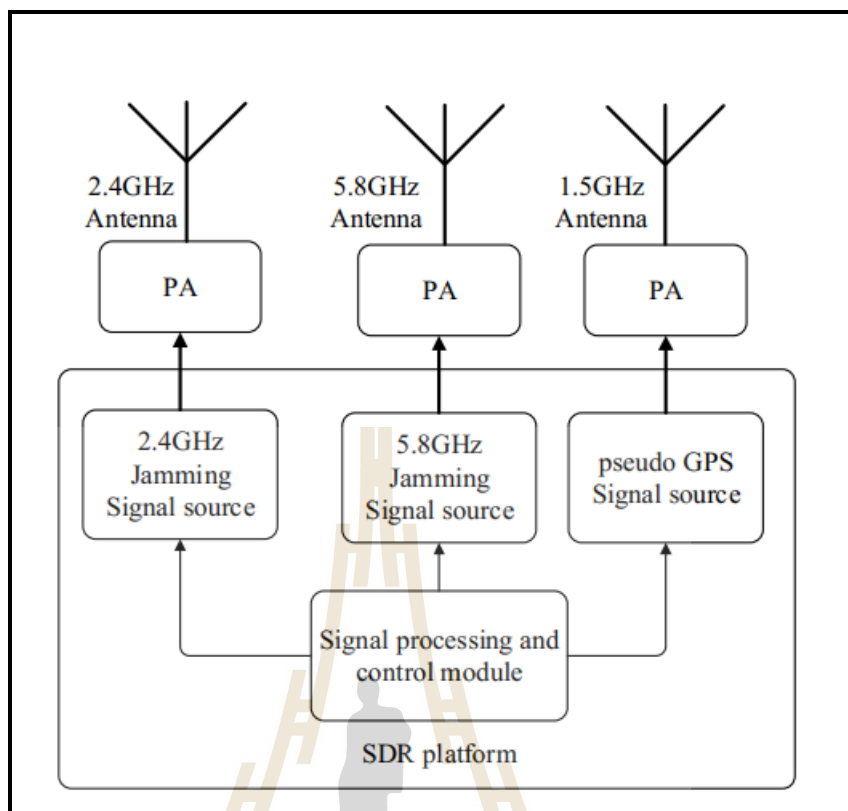
ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Pin Point ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Pin Point ดังแสดงในรูปที่ 1.5 เป็นรถเคลื่อนที่เร็ว เพื่อความคล่องตัวในการปฏิบัติการต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ สามารถตรวจค้นหาและต่อด้านระบุทิศ 2,000 เมตร โดยภายในรถเคลื่อนที่เร็วเพื่อต่อต้านอากาศยานไร้คนขับนั้น จะมีเรดาร์สำหรับค้นหาโดรนที่บินเข้ามาในเขตห้ามบิน มีกล้องความละเอียดสูงและขยายภาพได้ถึง 30 เท่า ติดตามอากาศยานไร้คนขับเป้าหมาย และมีเสาอากาศสำหรับไว้โจมตีอากาศยานไร้คนขับด้วยคลื่นสัญญาณทั้งการควบคุมและระบบนำทางอัตโนมัติ



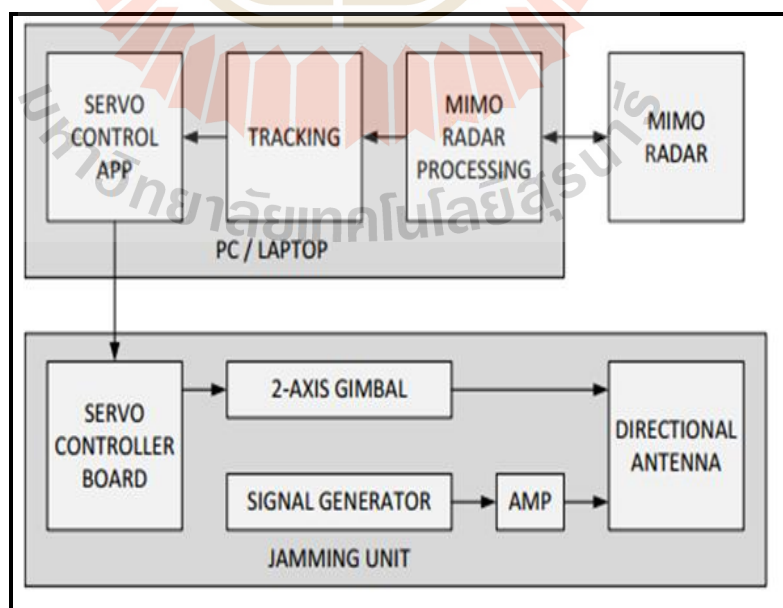
รูปที่ 1.5 ระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับแบบ Pin Point

จากงานวิจัยของ Ling Fang และคณะ ในปี ค.ศ.2018 ได้สร้างระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับซึ่งใช้ HackrF One platform ในการสร้างความถี่ 1.5 GHz ใช้ในการตัดสัญญาณระบบนำร่องอัตโนมัติ 2.4 GHz และ 5 GHz ใช้สร้างความถี่ในการตัดสัญญาณของการควบคุมการบินด้วยตนเอง โดย HackrF นั้นสามารถสร้างสัญญาณรบกวนได้ตั้งแต่ 10 MHz ถึง 6 GHz ซึ่งใช้เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและยังสามารถกำหนดทิศทางการบินในระบบนำร่องอัตโนมัติได้อีกด้วยแสดงแผนผังของระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ ดังแสดงดังรูปที่ 1.6 ในการทดสอบพบว่าที่ความถี่ 2.4 GHz ให้กำลังเอาต์พุตสูงสุด 45 dBm และที่ความถี่ 2.4 GHz ให้กำลังเอาต์พุตสูงสุด 41 dBm และสามารถตัดสัญญาณที่ระยะทาง 1200 เมตร

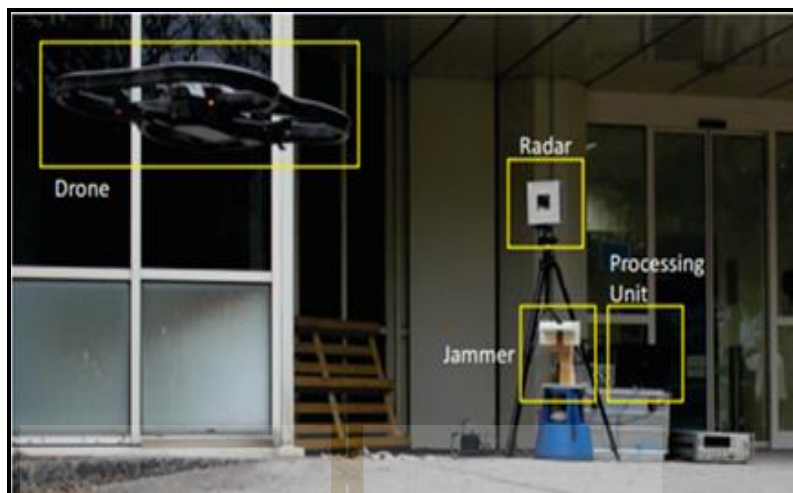
จากงานวิจัยของ Thomas และคณะ ในปี ค.ศ.2017 ได้สร้างระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับซึ่งใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป Commercial Off The Shelf (COTS) สร้างสัญญาณความถี่ระบบปรับตัวสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ หลักการคือมีเรดาร์ในการค้นหา อากาศยานไร้คนขับในรัศมี 250 เมตร และสั่งให้ระบบควบคุมส่งการไปยังชุดระบบควบคุมเพื่อให้ชุดตัดสัญญาณรบกวนทำงานและส่งผ่านสายอากาศ โดยกำลังงานส่งที่ 1 วัตต์ และอัตราขยายของสายอากาศ 16 dBi สามารถตัดสัญญาณได้ 60 เมตร ดังแสดงดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.6 แผนผังระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 1.7 แผนผังระบบควบคุมและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 1.8 การทดสอบระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อความมั่นคงของกองทัพ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนที่สำคัญคือ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวีลคิสสัน หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของวงจรขยายสัญญาณ และหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่

วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator or Waveform Generator) เป็นวงจรหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร วงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform) ซึ่งได้แก่ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น

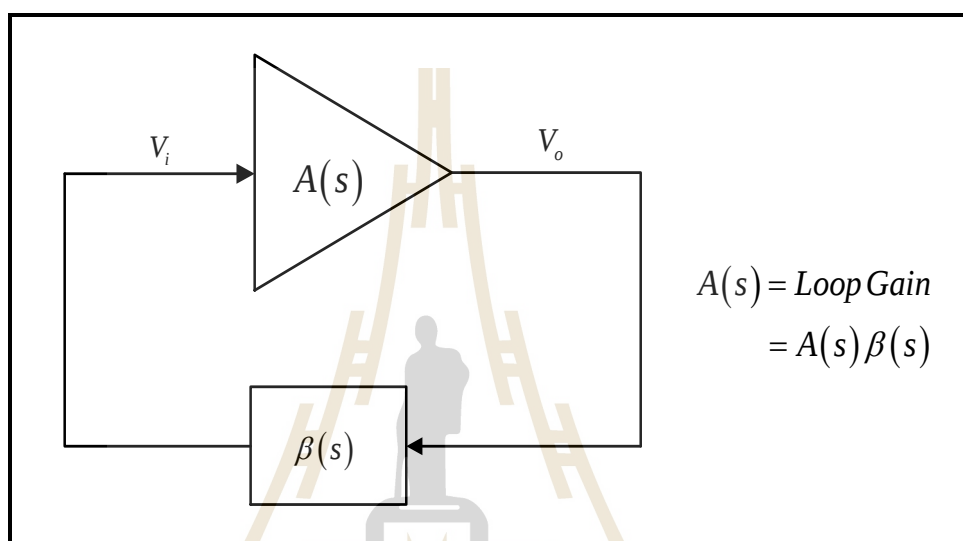
วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator) การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์แบบที่ง่ายที่สุด ทำได้โดยใช้วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงเช่น Op Amp ต่อกับเครือข่าย RC หรือ LC ในลักษณะป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ลักษณะนี้ควบคุมได้ โดยการปรับค่าความต้านทาน (R) และค่าความเก็บประจุ (C) บางตัวในวงจร ทั้งนี้จะต้องให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะ ที่จะทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation) ขนาดของสัญญาณไซน์ ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกจำกัดโดยย่านการทำงานเชิงเส้นของวงจรขยายที่ใช้ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ลักษณะนี้จึงถูกเรียกว่าเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear Oscillators) เกณฑ์ของ Barkhausen (Barkhausen's Criteria)

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ใดๆ จะต้องมีโครงสร้างพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูป $A(s)$ และ $\beta(s)$ เป็นอัตราขยายเดินหน้า (Forward) และอัตราขยายป้อนกลับ (feedback) ตามลำดับ เงื่อนไขสำคัญที่จะทำให้วงจรนี้เกิดการแกว่งได้เรียกว่า เกณฑ์ของ Barkhausen ซึ่งขึ้นกับอัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ของวงจรคือ $A_L(s) = A(s)\beta(s)$ เกณฑ์ของ Barkhausen

ประกอบด้วยเกณฑ์สำคัญสองประการคือ

$$\text{เกณฑ์ของเฟส:} \quad \angle A_L(j\omega_0) = 0 \pm 360^\circ \quad (2.1)$$

$$\text{เกณฑ์ของอัตราขยาย:} \quad |A_L(j\omega_0)| \geq 1 \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวก

ผลทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากเกณฑ์ทั้งสองนี้ ก็คือ สัญญาณขาออก V_o ที่มีความถี่ f_0 จะมีเฟสตรงกับสัญญาณ V_i ที่ถูกป้อนเข้าที่ขาเข้าของวงจรขยาย A เมื่อวนกลับมาครบรอบแต่จะมีแอมพลิจูดที่ใหญ่กว่าเดิม กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือวงจรนี้มีการป้อนกลับแบบบวกที่มีความถี่ f_0 นั้นเอง ด้วยเกณฑ์ทั้งสองนี้วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์จึงสามารถกำเนิดและรักษาการแกว่งของสัญญาณได้

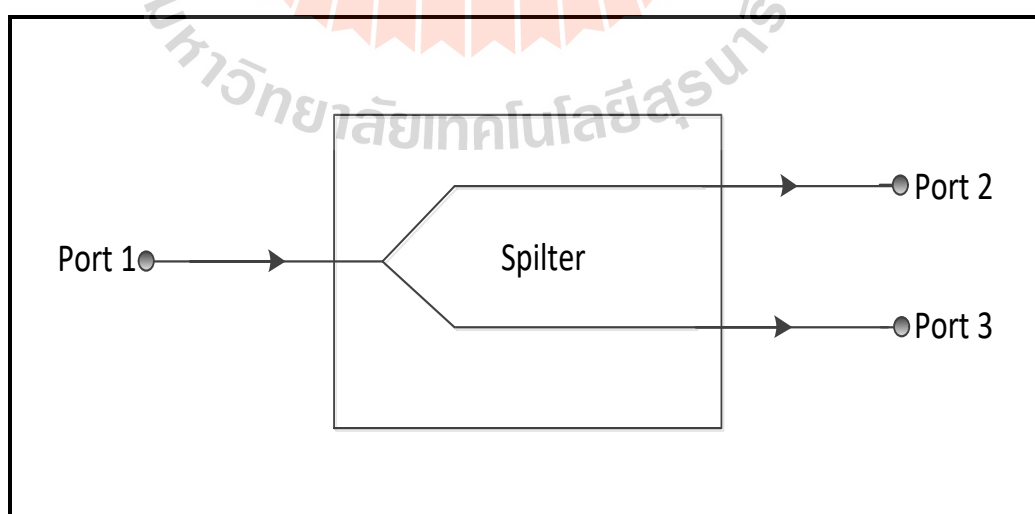
วงจรกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform Generator) วงจรกำเนิดสัญญาณแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปไซน์ ซึ่งพบได้บ่อย ก็คือวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square waveform generators) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular waveform generators) วงจรกำเนิดสัญญาณเหล่านี้ใช้วงจรพื้นฐานที่เรียกว่าวงจร Multi-vibrator เป็นส่วนประกอบหลัก เราสามารถสร้างวงจร Multivibrator ขึ้นได้โดยใช้เพียง Op Amp หรือ IC กำหนดเวลา เช่น IC 555 เป็นต้น ประกอบเข้ากับเครือข่าย RC วงจรกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่รูปไซน์มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรกำเนิดสัญญาณแบบผ่อนคลาย (Relaxation Oscillator) ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ขยายที่

ใช้ในวงจร จะทำงานอยู่ในย่าน cut-off หรืออิ่มตัว (saturation) เท่านั้น ในระหว่างที่อุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่าน cut-off จะไม่มีกระแสไหล จึงมองได้เสมือนกับว่า อุปกรณ์นั้นอยู่ในลักษณะผ่อนคลาย (Relaxing) จึงเป็นที่มาของชื่อเรียกวงจรนี้ สังเกตว่าวงจรแบบนี้จะต่างจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งอุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่านเชิงเส้น (Linear mode)

2.3 วงจรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน

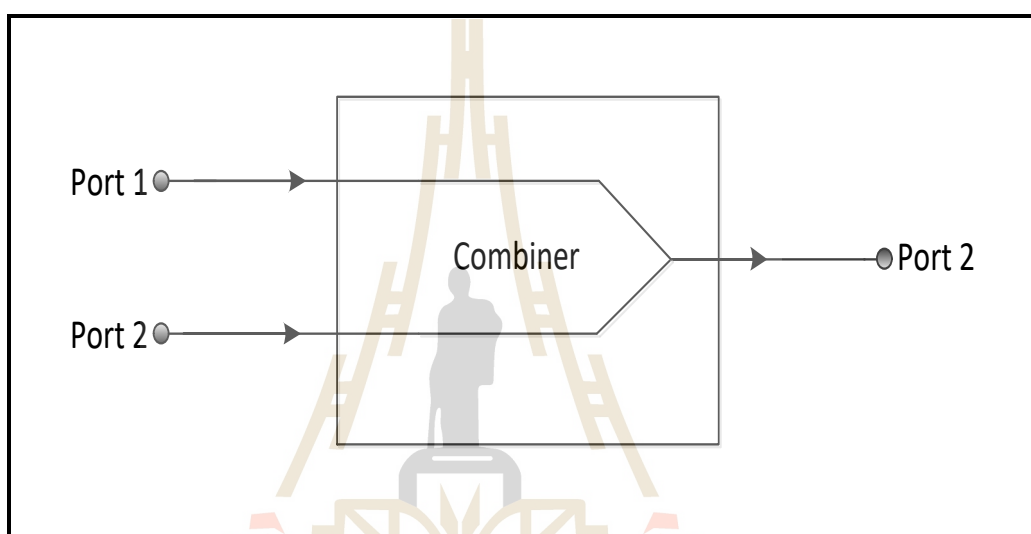
วงจรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน ได้ถูกนำเสนอขึ้นในปี 1960 โดย E.J. Wilkinson เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายกำลังภายใต้เงื่อนไขของเฟสและแอมพลิจูดที่เท่ากัน โดยการใช้สายนำสัญญาณที่มีความยาว $\lambda/4$ เป็นตัวแบ่งสัญญาณในแต่ละพอร์ต ข้อดีของวงจรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน คือ มีการสูญเสียน้อย เป็นได้ทั้งตัววงจรแบ่งสัญญาณและรวมสัญญาณได้ มีการแมตช์ซึ่งกันทุกพอร์ต โดยการใส่ตัวต้านทานระหว่างพอร์ตขาออกทั้ง 2 ด้านซึ่งจะช่วยทำให้ทั้ง 2 พอร์ตเป็นอิสระต่อกัน

การออกแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์เป็นวงจรแบบไมโครสตริปเหมาะกับงานที่ใช้กับความถี่สูงหรือช่วงกำลังงานไม่สูงมากนัก ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ (splitter) เป็นการแยกสัญญาณออกเป็นสองทางหรือหลายทางก็ได้แล้วแต่ความต้องการที่ออกแบบ แต่ต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรซึ่งคือการแมตช์ซึ่งกันของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตทั้งนี้ขนาดของสัญญาณจะลดลงตามจำนวนการแยกสัญญาณด้วย ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรการแยกสัญญาณจาก 1 เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นสัญญาณอินพุตให้กับภาควงจรอื่น



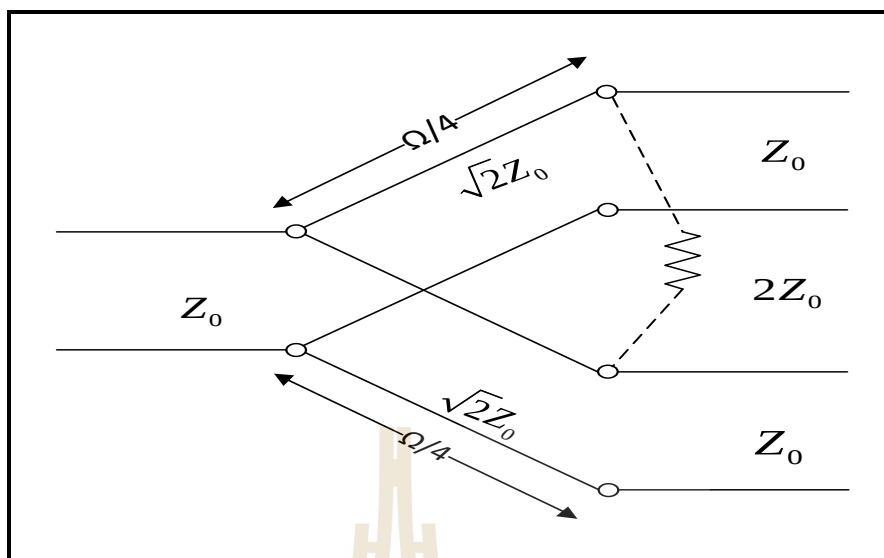
รูปที่ 2.2 ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ

ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ (combiner) เป็นการรวมสัญญาณจากสองทิศทางหรือหลายทิศทางให้เป็นสัญญาณรวมเพียงสัญญาณเดียว ซึ่งต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตเช่นเดียวกับวงจรแยกสัญญาณดังรูปที่ 2.3 จะเป็นบล็อกไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณของการรวมสัญญาณจาก 2 สัญญาณเป็นทิศทางเดียวเพื่อให้ได้กำลังรวมทั้งหมดของวงจร ซึ่งทางเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าเท่ากับ อิมพีแดนซ์ที่จะแมตช์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีการสูญเสียน้อยที่สุด



รูปที่ 2.3 ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ

สำหรับการออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณโดยใช้วงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าได้ออกแบบตามโครงสร้างของวงจรคลื่น ที่ดังรูปที่ 2.4 สัญญาณขาเข้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สัญญาณที่มีขนาดและเฟสที่เท่ากัน โดยใช้การแปลงความต้านทานของสายนำสัญญาณที่มีความยาว $\lambda/4$ ความต้านทานลักษณะเฉพาะของสายนำสัญญาณ (Impedance) เป็น $Z_0\sqrt{2}$ และตัวต้านทานระหว่างพอร์ตขาออกทั้ง 2 ด้านเท่ากัน $2Z_0$

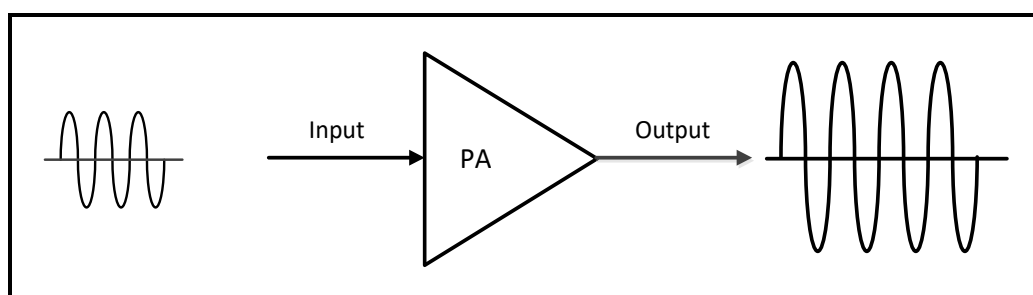


รูปที่ 2.4 รูปแบบพื้นฐานของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน

2.4 หลักการและทฤษฎีวงจรรขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF Power Amplifier)

วงจรรขยายกำลังความถี่วิทยุ (RF Power Amplifier) หากส่งออกไปด้วยความแรงมากจะทำให้สามารถส่งได้ระยะทางไกล ส่งผลทำให้ได้พื้นที่การตรวจจับวัตถุมีพื้นที่ครอบคลุมกว้างมากขึ้น

วงจรรขยายกำลังความถี่วิทยุหรือ RF Power Amplifier (PA) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายกำลังสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเล็กให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะส่งออกไปยังสายอากาศ สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นระบบคัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ใช้งานในย่านความถี่ 1.575 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และมีขนาดกำลังส่งสูง ดังนั้นวงจรรขยายกำลังความถี่วิทยุจึงต้องทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้สูงขึ้น รวมไปถึงต้องมีการตอบสนองด้านความถี่กับความถี่ที่ใช้งานด้วย



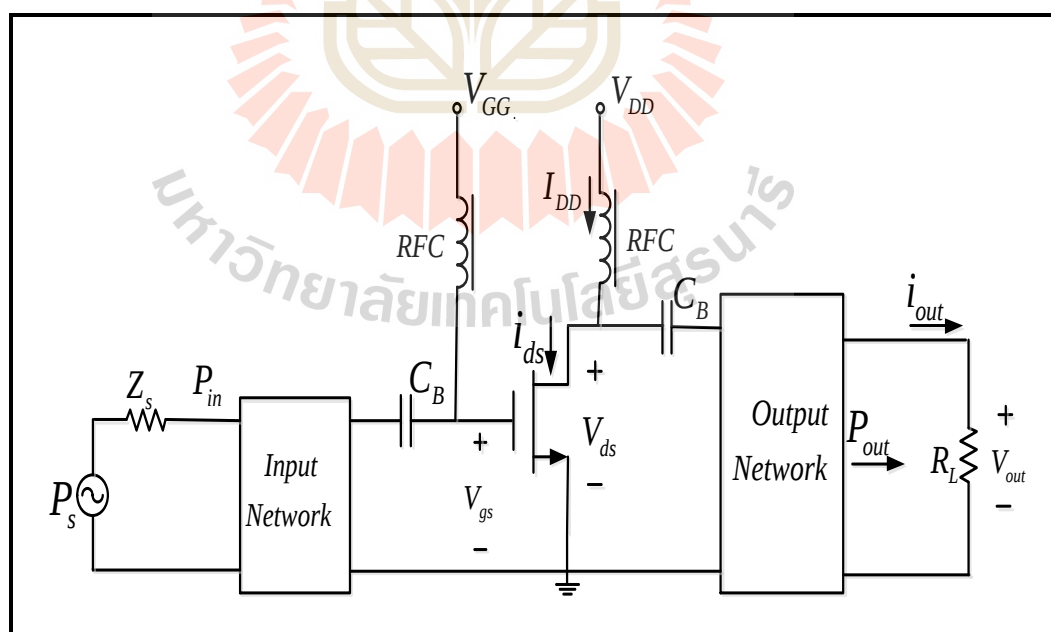
รูปที่ 2.5 หลักการขยายสัญญาณของ RF Power Amplifier

จากรูปที่ 2.5 เป็นการขยายสัญญาณในอุดมคติ คือ เมื่อมีสัญญาณขนาดเล็กเข้ามาที่ด้านขาเข้า (Input) Power Amplifier จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณออกทางด้านขาออก (Output) ให้มีขนาดมากกว่าเดิมและไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้เพราะมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้สัญญาณที่ด้านขาออกเปลี่ยนไป

2.4.1 กำลังเอาต์พุต (Output Power)

กำลังเอาต์พุต คือ กำลังไฟฟ้าที่วงจรขยายกำลังความถี่วิทยุสามารถโอนถ่ายไปยังโหลดได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ หากวงจรขยายสัญญาณให้กำลังต่ำก็จะทำให้สัญญาณที่ส่งไปสายอากาศน้อย ส่งผลให้การกระจายสัญญาณได้พื้นที่ครอบคลุมน้อยตามไปด้วย ตามรูปที่ 2.6 เมื่อเราให้แหล่งจ่ายพลังงานของวงจรขยายสัญญาณ (Power Supply) มีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง วงจรขยายสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงกระแส i_{out} ที่โหลด R_L ตามอินพุตที่ป้อนเข้ามาในวงจรจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด (V_{out}) และกำลังเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$P_{out} = \frac{1}{2} (v_{out} \times i_{out}) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบหลักของ Power Amplifier

2.4.2 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายหรือ Gain คือ หน่วยวัดความสามารถของการขยายสัญญาณของ Power Amplifier มีหน่วยเป็น dB โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Gain[dB] = \frac{P_{out}[dB]}{P_{in}[dB]} \quad (2.4)$$

โดยที่ P_{in} คือ กำลังสัญญาณทางด้านขาเข้า (Input)

P_{out} คือ กำลังสัญญาณทางด้านขาออก (Output)

โดยที่กำลังงานในหน่วย dB สามารถคำนวณได้จาก

$$P[dB] = 10 \log_{10} \frac{Power[Watt]}{1[Watt]} \quad (2.5)$$

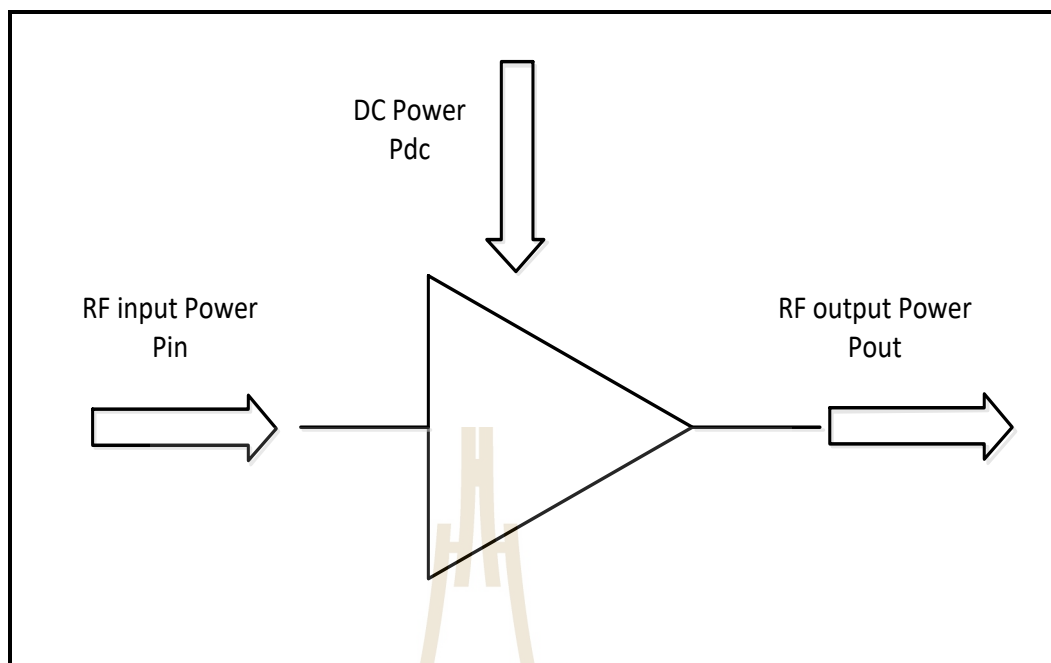
หรือ

$$P[dBm] = 10 \log_{10} \frac{Power[Watt]}{1[mWatt]} \quad (2.6)$$

เมื่อ Power คือ กำลังของสัญญาณ มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

2.4.3 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของวงจรขยายสัญญาณเป็นพารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่มีความสำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเป็นอย่างมาก หากวงจรขยายสัญญาณมีประสิทธิภาพต่ำจะทำให้ได้อัตราขยายที่ต่ำใน ขณะที่ยังคงใช้พลังงานเท่าเดิมทำให้สูญเสียพลังงานไปในรูปแบบของพลังงานความร้อนแทน ในการประมาณค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณโดยทั่วไปแล้วจะพิจารณา 2 รูปแบบคือ



รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency)

Power Efficiency (PE)

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2.7)$$

Power Added Efficiency (PAE)

$$PE = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (2.8)$$

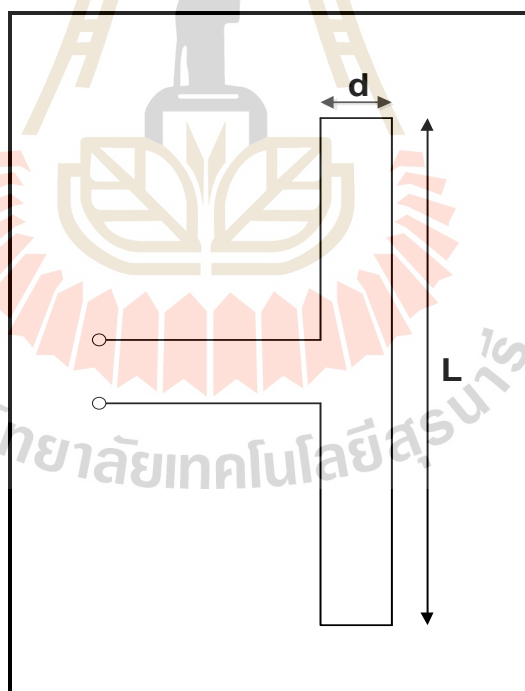
เมื่อ P_{DC} คือ

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \quad (2.9)$$

2.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ

2.5.1 สายอากาศไดโพล

สายอากาศไดโพล (dipole antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดมีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.8 โดยจุดกึ่งกลางของไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยสายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพลและไหลกลับมายังขั้วหนึ่งของไดโพล ดังแสดงในรูป 2.9 ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพลการแจกแจงรูปของกระแส (current distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากันโดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่น ๆ บนสายอากาศไดโพลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องรับ



รูปที่ 2.8 สายอากาศไดโพล

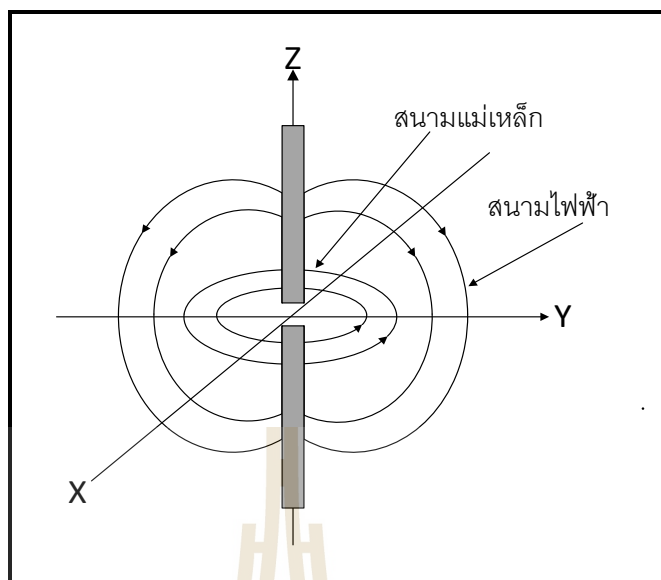
ไดโพลอุดมคติ (ideal dipole) เป็นสายอากาศสมมุติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่น ๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบเล็ก ๆ ของความยาวไดโพล

(infinitesimal dipole) ที่มีการแจกแจงของกระแสที่เท่ากันตลอดความยาวคุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก ๆ โดยแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคือการแสดงรูปแบบของกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศเป็นรูปภาพ 3 มิติที่วัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล (far field region) คุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (space coordinates) บริเวณของสนามระยะไกลคือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทาง ที่อยู่ห่างจากสายอากาศแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศใด ๆ สามารถที่จะทราบ ได้ด้วยการวัดทดลองและถ้าเราทราบลักษณะการแจกแจงของกระแสบนตัวสายอากาศก็จะสามารถคำนวณหาจากการคำนวณได้เช่นเดียวกันการวัดรูปแบบการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศจะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far field region) โดย สามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.10)$$

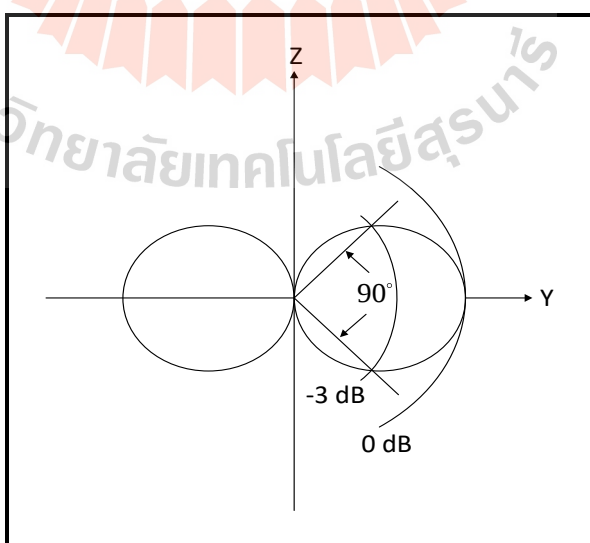
เมื่อ	R	คือ ระยะของสนามระยะไกล
	D	คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
	λ	คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไป ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับ ด้วยตาม ทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (reciprocity theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็กโดยเรียกว่า E-plane และ H-plane ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่ง ๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้น ๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจาย กำลังงานที่ถูกต้องควรจะต้องจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใด ๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

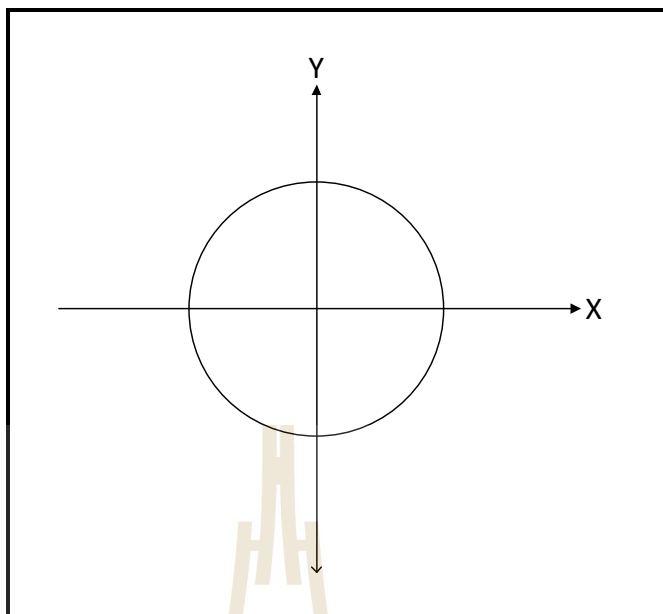


รูปที่ 2.9 ระบายสนามไฟฟ้าและระบายสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศไดโพล

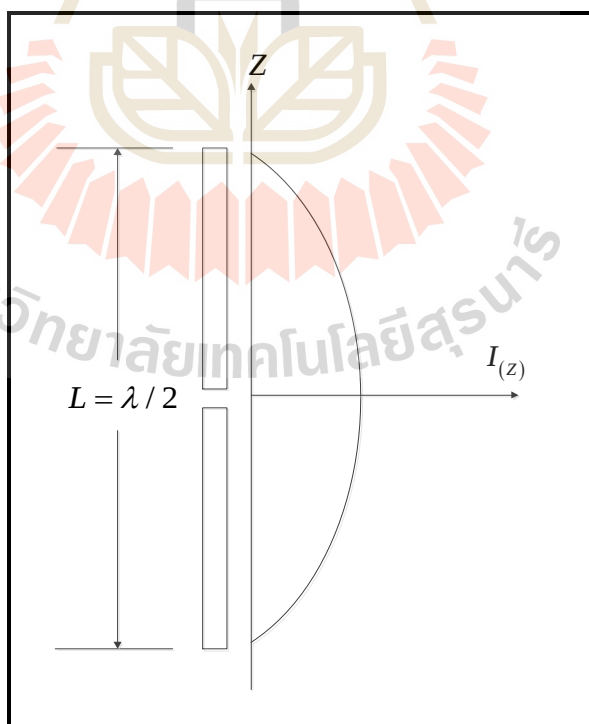
รูปที่ 2.9 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพล อุดมคติแบบรูปการกระจายกำลังงาน นี้แสดงให้เห็นว่าไดโพลในอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วย เพราะว่า การแผ่กระจายกำลังงานในสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งในรูปแบบนี้ การแผ่กระจายกำลังงานจะเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลในอุดมคติ

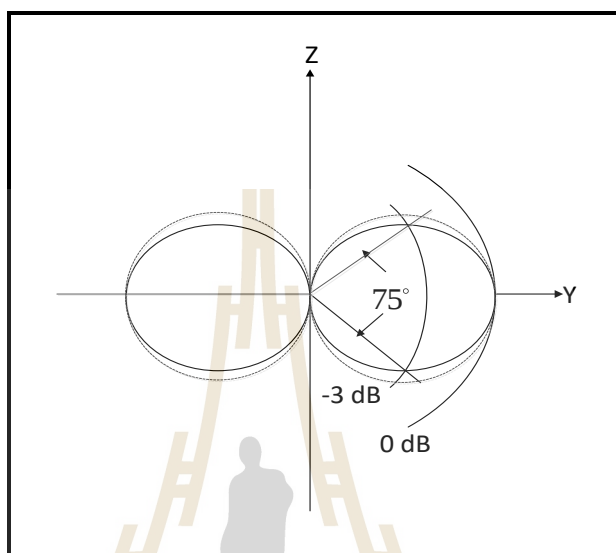


รูปที่ 2.11 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพล
ในอุดมคติ



รูปที่ 2.12 ที่กระจายตามความยาวกระแสในไดโพล $\lambda / 2$

ในรูปที่ 2.12 แสดงแพทเทิร์นการแผ่คลื่น ของไดโพล $\lambda/2$ แบบ E-Plane ชนิดคู่ของไดโพลอุดมคติโดยไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW 78 องศา ใน E-plane ซึ่งจะมีผลให้มุมแคบกว่าลักษณะของไดโพลอุดมคติ ส่วนการแพร่ของ H-plane สำหรับไดโพล $\lambda/2$ มีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.13

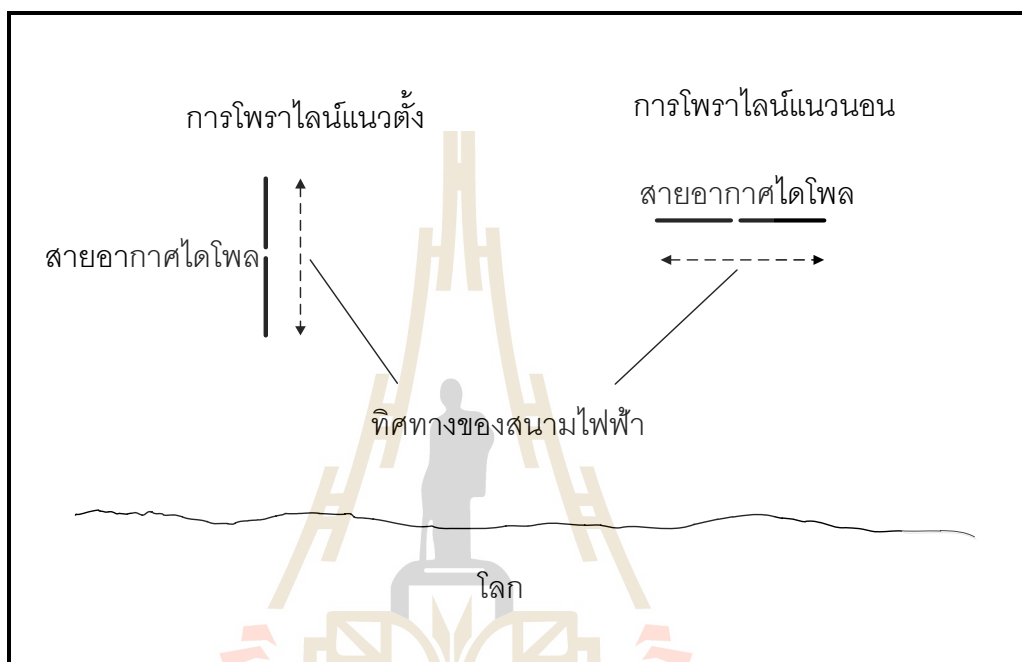


รูปที่ 2.13 แพทเทิร์นการแผ่คลื่น E-plane ไดโพล $\lambda/2$ (solid line) และไดโพลอุดมคติ

2.5.2 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดและวัดได้ในสนามระยะไกล สายอากาศจำนวนมากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (linear polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (cycle) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและยังถูกแบ่งออกเป็น การโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular) และแบบรูปวงรี (Elliptical) บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะพิจารณาจากรูปทรงของตัวสายอากาศเองเช่นในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะมีส่วนประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน เช่นสายอากาศไดโพลและยากิเราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นขนานไปกับส่วนประกอบของตัวสายอากาศแต่ก็มีสายอากาศบางชนิดซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของโครงสร้างมาทำนายการโพลาไรซ์ได้เช่นสายอากาศปากแตร (horn) แบบบ่วง (loop) และแบบร่อง (slit) เป็นต้นเพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศ ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมี

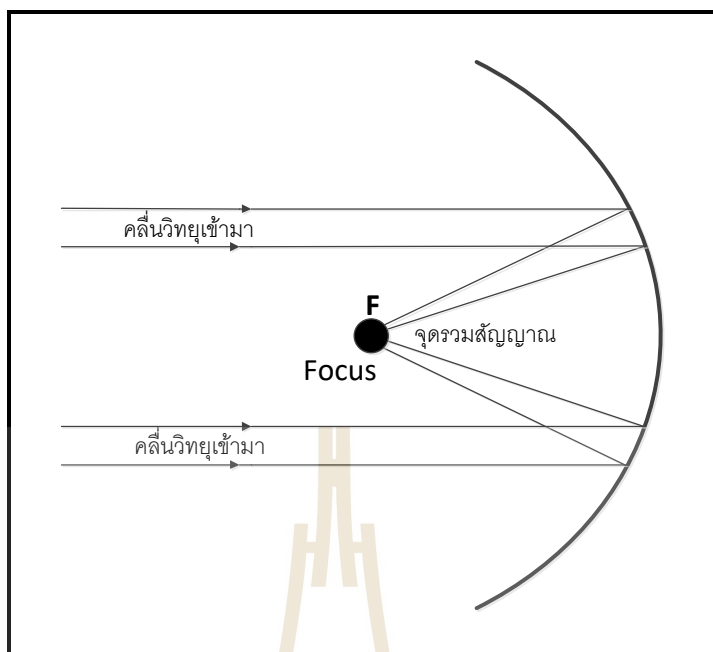
การโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสัญญาณที่ส่งมาหากเกิดการสูญเสียสัญญาณ อันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่นสัญญาณที่รับได้เป็นการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศ ที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เรียกว่าเกิดการแยกการโพลาไรซ์แบบไขว้ (cross-polarization isolation)



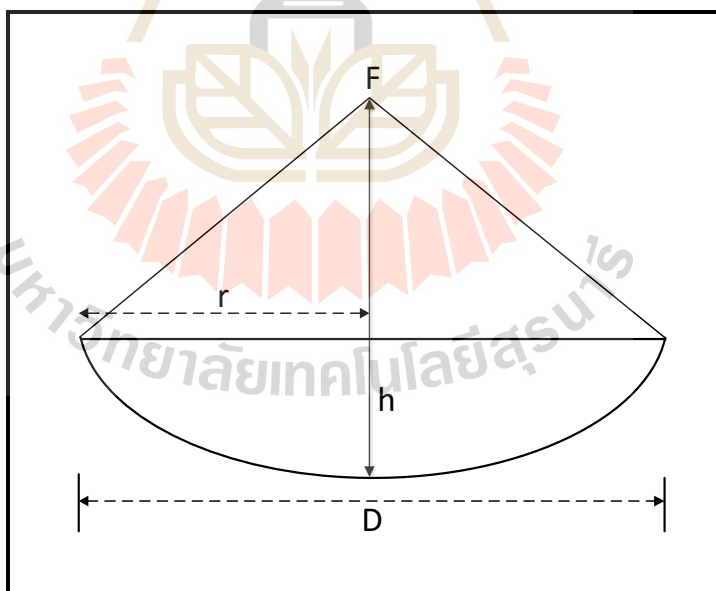
รูปที่ 2.14 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

2.5.3 จานดาวเทียมแบบออฟเซตพาราโบลอยด์ (Offset paraboloid)

จานแบบนี้ กล่าวง่าย ๆ ก็คือจานสะท้อนเป็นส่วนหนึ่งของพาราโบลอยด์ และ LNB จะวางอยู่ที่จุดโฟกัสของพาราโบลอยด์ ลักษณะเฉพาะของจานแบบนี้ คือ ตัว LNB และ ฟีดชัฟพอร์ต จะไม่อยู่ตรงกลางจาน และส่วนใหญ่จะอยู่นอกบริเวณของทางผ่านคลื่น จานแบบนี้ มีข้อดีที่มีพื้นที่ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง เพราะไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใด บังเส้นทางผ่านของคลื่น แต่ก็มีข้อเสียตรงที่โครงสร้างแบบไม่สมมาตรจะทำให้มี cross polarization ในทิศทางที่ไม่ใช่ด้านหน้ามีค่อนข้างสูง โครงสร้างจานแบบพาราโบลาโบลิดมีจุดเด่นคือสามารถทำอัตราขยายสัญญาณได้มากถึงหลายสิบ dBi เพราะโครงสร้างจานแบบพาราโบลาโบลิดใช้หลักการสะท้อนคลื่นวิทยุที่เข้ามาตกกระทบ reflector ที่ออกแบบเป็นส่วนโค้ง ทำให้สามารถรวมคลื่นวิทยุเข้ามารวมอยู่จุดเดียวที่ focus point ทำให้สัญญาณรวมที่จุดรวมสัญญาณ ทำให้คลื่นที่สะท้อนจาก reflector เข้ามาที่ตัวรับสัญญาณได้เข้มมาก ทำให้เหมาะกับการสื่อสารทางไกล



รูปที่ 2.15 จานดาวเทียมแบบออฟเซตพาราโบลา



รูปที่ 2.16 โครงสร้างจานแบบพาราโบลา

สามารถพิจารณาการหาระยะของจุดโฟกัสได้จาก โครงสร้างงานแบบพาราโบลาได้ดังสมการที่

2.11

$$\text{Focal length}(F) = D^2 / 16h \quad (2.11)$$

เมื่อ F คือ ระยะของจุดโฟกัส (สำหรับติดตั้งตัวรวมสัญญาณ)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของจานรับสัญญาณ (มีหน่วยเป็นเมตร)

h คือ ความลึกของจาน จากท้องถึงปากขอบจานในแนวดิ่ง (มีหน่วยเป็นเมตร)

2.6 การสูญเสียในอากาศ (Free Space Path Loss)

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศค่าความแรงของสัญญาณจะลดทอนเป็นส่วนกลับกับระยะทางทำให้ค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะทางห่างออกไปจากเสาสัญญาณมีความแรงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการวัดค่าการลดทอนสัญญาณในอากาศ (free space path loss : FSPL) หรืออาจเรียกการอีกอย่างว่า Line of Sight Loss โดยจะหาได้จากสมการ 2.12 และ 2.13

ในแง่ของความยาวคลื่น

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.12)$$

ในแง่ของความถี่

$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ $FSPL$ คือ การสูญเสียในอากาศ (Free space path loss)

λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ (หน่วยเมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (เมตร)

f คือ ความถี่ของคลื่น (หน่วยเฮิรตซ์)

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตร/วินาที)

จะเห็นว่า Free Space Loss ขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวคือระยะทาง (Distance) กับ ความถี่ Frequencies ดังนั้นยิ่งระยะทางยิ่งไกลยิ่งเกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้นและที่ความถี่สูงจะ สูญเสียพลังงานมากกว่าความถี่ต่ำ ด้วยเช่นกัน

ในกรณีที่ต้องการทำเป็นหน่วย dB เพื่อง่ายต่อการคำนวณ สามารถทำได้โดย

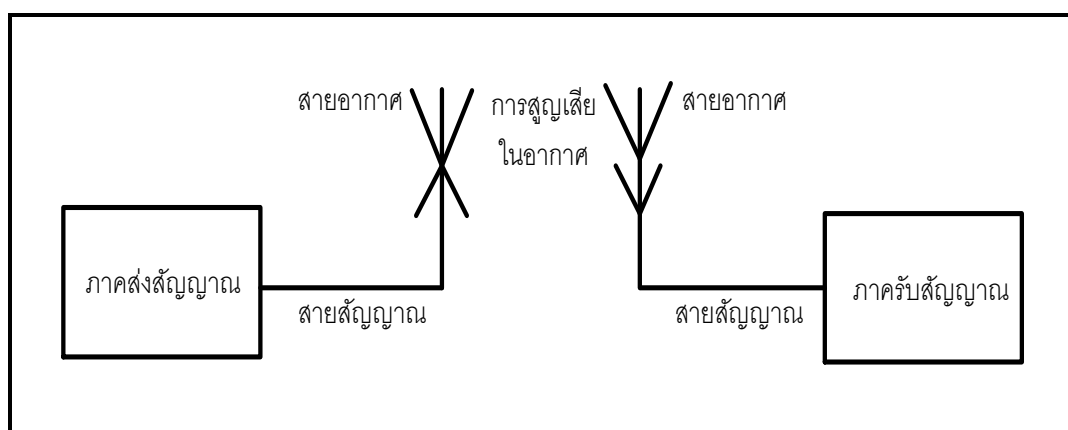
$$\begin{aligned}
 FSPL &= 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \\
 &= 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \\
 FSPL (dB) &= 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right)
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (เมตร)
 f คือ ความถี่ของคลื่น (หน่วยเฮิรตซ์)

เป็นที่น่าสังเกตว่าสมการข้างต้นไม่ได้รวมถึงการเพิ่มขึ้นของเสาอากาศและการสูญเสีย ตัวป้อนมันมีไว้สำหรับเสาอากาศแบบไอโซโทรปิกสองเสา คือที่แผ่ออกไปทุกทิศทางอย่างเท่าเทียมกันมันเป็นไปได้ที่จะเพิ่มเสาอากาศที่ได้รับลงในสมการ

$$F = 20 \log(d) + 20 \log(f) + \left(\frac{4\pi}{c} \right) - G_{Tx} - G_{Rx} \tag{2.15}$$

เมื่อ G_{Tx} คือ อัตราขยายของเสาอากาศด้านส่ง
 G_{Rx} คือ อัตราขยายของเสาอากาศด้านรับ



รูปที่ 2.17 รูปโครงสร้างการสูญเสียในอากาศ

เมื่ออัตราขยายของการส่งกำลังงานภาคส่ง (G_t) ในระบบ GPS คือ 1.575 GHz และในระบบไร้สาย (Wi-Fi) คือ 2.4 GHz สามารถคำนวณได้จาก

$$G_t(dBi) = 10 \log \left(k \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (2.16)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานพาราโบลา
 k คือ efficiency factor มีค่าประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์
 G_r คือ อัตราขยายภาครับ ประมาณ -3dBi จากอัตราขยายของสายอากาศภาครับ
 λ คือ ความยาวคลื่น เท่ากับ $\frac{c}{f}$

2.7 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบติดตั้งสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนที่สำคัญคือ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิคติลสัน หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในส่วนของวงจรขยายสัญญาณ และหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ และนำไปออกแบบระบบติดตั้งสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร นำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3

ออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง

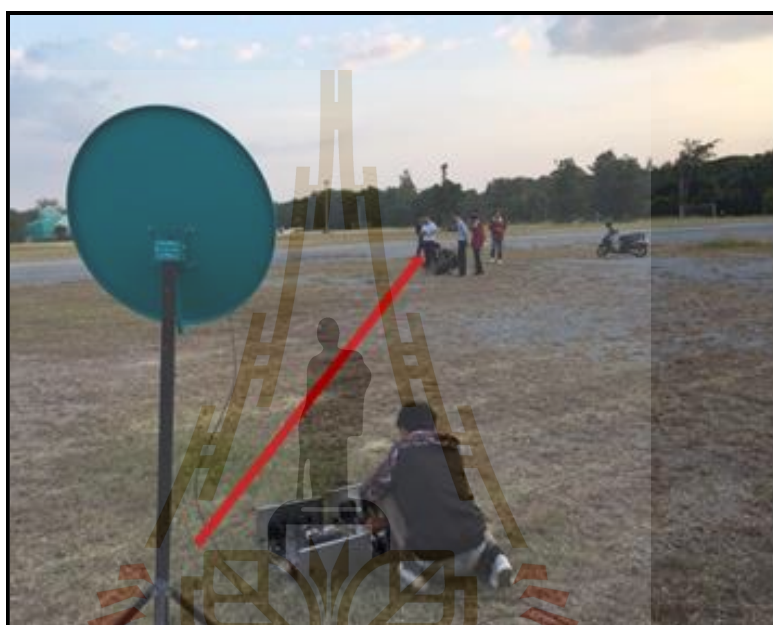
3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อความมั่นคงของกองทัพ ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณ (oscillator) วงจรขับกำลังสัญญาณ (pre-amplifier) วงจรแยกสัญญาณ (splitter) วงจรขยายสัญญาณกำลังสูง (power amplifier) วงจรรวมสัญญาณ (combiner) และ สายอากาศ (antenna)

การที่จะออกแบบระบบให้สามารถตัดสัญญาณรบกวนและควบคุมสัญญาณของอากาศยานไร้คนขับได้นั้น ต้องทราบระบบการส่งสัญญาณของอากาศยานไร้คนขับ เพื่อการออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการศึกษาถึงลักษณะการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ มีลักษณะการส่งสัญญาณอยู่ 3 รูปแบบ คือ การควบคุมโดยระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ (GPS) ซึ่งเป็นระบบหลักของอากาศยานไร้คนขับ การควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเองคือ การบังคับด้วยคลื่นความถี่วิทยุจากพื้นดิน และการส่งสัญญาณวิดีโอ หรือการส่งสัญญาณภาพและเสียงนั่นเอง สำหรับการควบคุมโดยระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ เพื่อการควบคุมแบบอัตโนมัตินั้น ใช้เทคนิคการรับส่งสัญญาณแบบ Speed Spectrum ซึ่งเป็นเรื่องยากสำหรับการรบกวนสัญญาณซึ่งการที่จะรบกวนและตัดสัญญาณการควบคุมได้นั้นสัญญาณที่ส่งต้องมีความแรงมากพอเพื่อจะสามารถรบกวนและตัดสัญญาณได้โดยจากการศึกษาหาข้อมูลที่มาตฐานนั้นพบว่าที่ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับ ที่จะทำการตัดสัญญาณนั้นจะต้องได้รับกำลังงานไม่ต่ำกว่า -120 dBm ในระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (GPS) และในระบบไร้สาย (Wi-Fi) จะต้องได้รับกำลังงานไม่ต่ำกว่า -100 dBm เพื่อป้องกันการสูญเสียในอากาศ ระบบจึงสามารถรบกวนและตัดสัญญาณการควบคุมได้ และโดยทั่วไปสายอากาศภาครับของอากาศยานไร้คนขับจะมีอัตราขยายประมาณ 2 dB (Gr)

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบตัดสัญญาณโดยทดสอบทั้ง 2 ความถี่คือ 1.575 GHz ในระบบ GPS และ 2.4 GHz แสดงดังรูปที่ 3.1 ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ส่งกำลังงานที่ 30 dBm โดยมีงานแบบพาราโบลารัศมี 85 เซนติเมตร มีอัตราขยายประมาณ 21.38 dB ผลจากการทดสอบพบว่าสามารถ ตัดสัญญาณ GPS ได้สูงสุด 100 เมตร แต่ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ส่งกำลังงานที่ 29 dBm โดยมีงานแบบพาราโบลารัศมี 85 เซนติเมตร มีอัตราขยายประมาณ 25.04 dB

ผลจากการทดสอบพบว่าสามารถตัดสัญญาณ Wi-Fi ได้สูงสุด 60 เมตร จากผลการทดลองพบว่าในการส่งสัญญาณความถี่สูงในคลื่นเดียวกันสามารถทำให้ตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับได้นั้น ภาครับจะต้องได้รับกำลังงานไม่ต่ำกว่า -23 dBm ในย่านความถี่ 1.575 GHz และ -19.5 dBm ในย่านความถี่ 2.4 GHz จึงนำมาคำนวณเพื่อออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ กำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร



รูปที่ 3.1 การทดสอบระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับ

สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้ โดยใช้แบบจานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 – 2.4 เมตร ซึ่งความถี่ในการควบคุมอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนขับในระบบ GPS/GNSS ที่ความถี่ 1.575 GHz โดยที่ภาครับของอากาศยานไร้คนขับจะต้องได้รับกำลังงานไม่ต่ำกว่า -23 dBm และระบบการบินด้วยตนเอง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยที่ภาครับจะต้องได้รับกำลังงานไม่ต่ำกว่า -19.5 dBm

ดังนั้นกำลังงานภาคส่งสามารถคำนวณได้จากการใช้สมการการสูญเสียในอากาศ Free space path loss (FSPL) ดังสมการดังนี้

$$FSPL = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ *FSPL* คือ การสูญเสียในอากาศ (Free space path loss)

λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ (หน่วยเมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (เมตร)

f คือ ความถี่ของคลื่น (หน่วยเฮิรตซ์)

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตร/วินาที)

เมื่อมีอัตราการขยายกำลังงานของจานสายอากาศจะสามารถคำนวณหาการสูญเสียในอากาศ Free space path loss (FSPL) ดังสมการดังนี้

$$F = 20 \log(d) + 20 \log(f) + \left(\frac{4\pi}{c} \right) - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (3.2)$$

เมื่ออัตราการขยายกำลังงานภาคส่ง (G_{Tx}) ใช้จานแบบจานพาราโบลาในการเพิ่มอัตราการขยายของภาคส่งในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz และในระบบไร้สาย (Wi-Fi) ที่ความถี่ 2.4 GHz สามารถคำนวณได้จาก

$$G_{Tx} (dBi) = 10 \log \left(k \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานพาราโบลา

k คือ efficiency factor มีค่าประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

G_r คือ อัตราขยายภาครับ ประมาณ 2 dB จากอัตราการขยายของสายอากาศภาครับ

λ คือ ความยาวคลื่น เท่ากับ $\frac{c}{f}$ ประมาณ

ดังนั้นกำลังงานที่ต้องการเพื่อการส่งกำลังงานสำหรับระบบและตัดสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ ซึ่งทำให้สามารถออกแบบระบบและคำนวณระยะการรับและตัดสัญญาณได้โดย

$$P_{TX} = P_{RX} + FSPL - G_{TX} - G_{RX} \quad (3.4)$$

ตัวอย่างการออกแบบแสดงได้ดังนี้ เมื่อกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานพาราโบลาเท่ากับ 0.85 เมตร และออกแบบเพื่อรับทวนและตัดสัญญาณของระบบ GPS และ Wi-Fi ที่ระยะทาง 100 เมตร กำลังงานที่ต้องการเพื่อส่งกำลังงานสำหรับรับทวนและตัดสัญญาณ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$G_t(dBi) = 10 \log \left(0.7 \left(\frac{\pi (0.85)}{0.19038} \right)^2 \right) = 21.38 dB \quad (3.5)$$

$$G_t(dBi) = 10 \log \left(0.7 \left(\frac{\pi (0.85)}{0.12500} \right)^2 \right) = 25.04 dB \quad (3.6)$$

อัตราขยายของสายอากาศแบบพาราโบลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 เมตร มีค่าเท่ากับ 21.389 dB ที่ความถี่ 1.575 GHz และ มีค่าเท่ากับ 25.044 dB ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 100 เมตร สามารถคำนวณการสูญเสียในอากาศได้ดังนี้

$$FSPL = 20 \log(100) + 20 \log(1.575 \times 10^9) + 20 \log \left(\frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right) = 76.38 dB \quad (3.7)$$

$$FSPL = 20 \log(100) + 20 \log(2.4 \times 10^9) + 20 \log \left(\frac{4\pi}{3 \times 10^8} \right) = 80.04 dB \quad (3.8)$$

ดังนั้น ที่ความถี่ 1.575 GHz กำลังงานที่ต้องการเพื่อส่งกำลังงานสำหรับรับทวนและตัดสัญญาณของจานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 เมตร ที่ระยะ 100 เมตร ได้คือ

$$P_{TX} = -23 dBm + 76.38 dB - 21.38 dB - 2 dB = 30 dBm \quad (3.9)$$

ที่ความถี่ 2.4 GHz กำลังงานที่ต้องการเพื่อการส่งกำลังงานสำหรับรับทวนและตัดสัญญาณของจานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.85 เมตรที่ระยะ 100 เมตร ได้ดังนี้

$$P_{TX} = -19.5 \text{ dBm} + 75.60 \text{ dB} - 25.04 \text{ dB} - 2 \text{ dB} = 33.5 \text{ dBm} \quad (3.10)$$

ที่ความถี่ 1.575 GHz ในการคำนวณเพื่อหากำลังงานที่ต้องการส่งกำลังงานสำหรับบริเวณ และตัดสัญญาณ ที่ระยะ ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการคำนวณจากการออกแบบโดยใช้จานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 2.4 เมตร และที่ระยะการทำการตั้งแต่ 100 เมตร ถึง 2,000 เมตร ซึ่งพบว่า ที่ระยะ 100 เมตร หากใช้ จานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร จะต้องใช้กำลังงานภาคส่งประมาณ 37.71 วัตต์ และที่ระยะ 2,000 เมตร จะต้องใช้กำลังงานภาคส่งประมาณ 2361.61 วัตต์ และที่ระยะ 100 เมตร หากใช้จานพาราโบลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร จะต้องใช้กำลังงานภาคส่ง ประมาณ 0.28 วัตต์ และที่ระยะสูงสุด 2,000 เมตร จะต้องใช้กำลังงานภาคส่ง ประมาณ 112.44 วัตต์

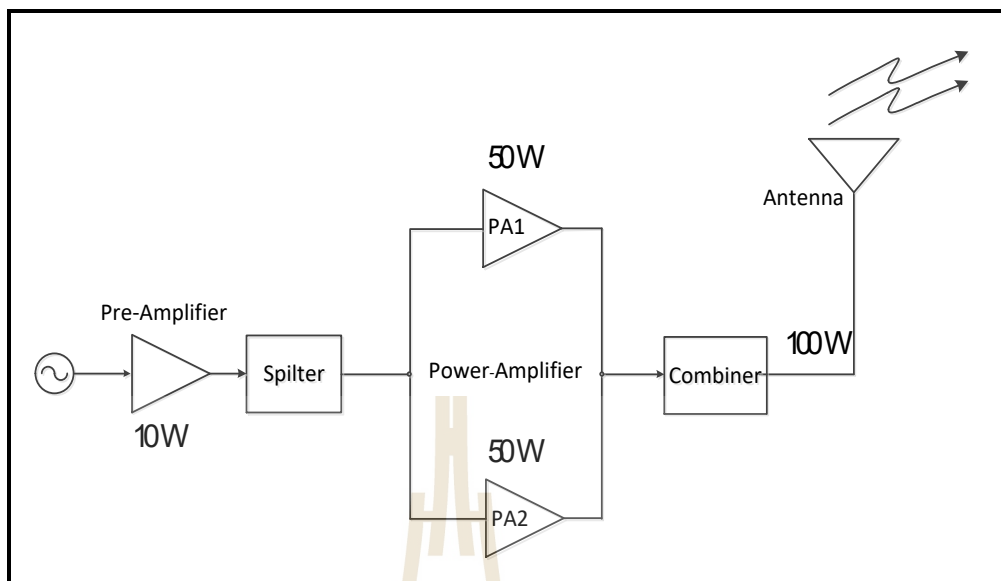
ตารางที่ 3.1 กำลังงานภาคส่งสำหรับบริเวณสำหรับตัดสัญญาณ ที่ระยะต่าง ๆ และจานพาราโบลาที่มีขนาดต่าง ๆ ในหน่วย (วัตต์) ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz

ระยะทาง (เมตร) เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	100	500	1000	1500	2000
0.35	37.71	147.60	590.40	1,328.41	2,361.61
0.85	1.00	25.03	100.10	225.23	400.41
1.2	0.50	12.56	50.23	113.01	200.90
1.8	0.22	5.58	22.32	50.23	89.29
2.4	0.13	3.14	12.56	28.25	50.23

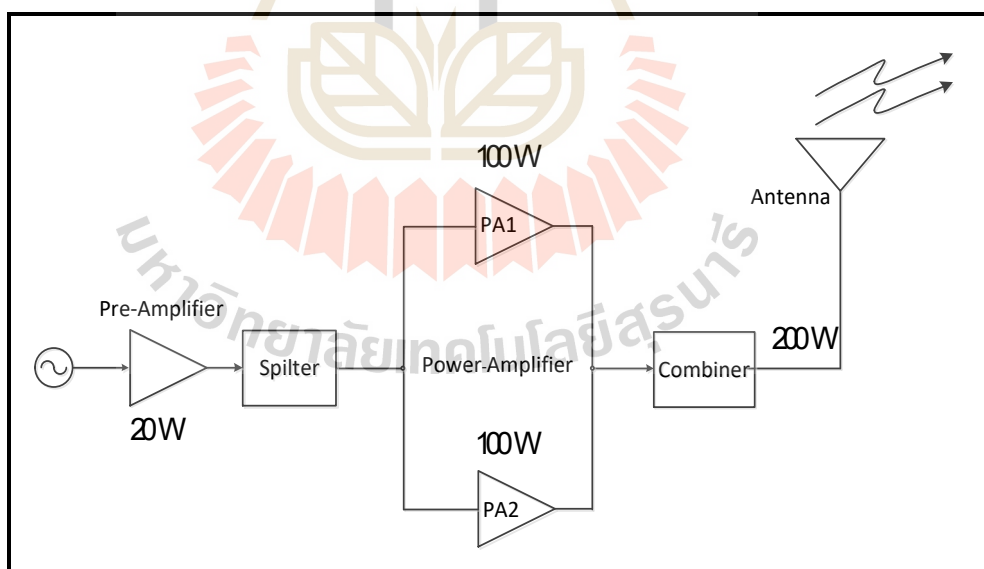
ตารางที่ 3.2 กำลังงานภาคส่งสำหรับรบกวนสำหรับติดตั้งสัญญาณ ที่ระยะต่าง ๆ และงานพาราโบลาที่ขนาดต่าง ๆ ในหน่วย (วัตต์) ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz

ระยะทาง (เมตร) เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	100	500	1,000	1,500	2,000
0.35	13.22	330.44	1,321.75	2973.94	5,287.00
0.85	2.24	56.03	224.10	504.23	896.41
1.2	1.12	28.11	112.44	252.99	449.76
1.8	0.50	12.49	49.97	112.44	199.89
2.4	0.28	7.03	28.11	63.25	112.44

หลังจากได้คำนวณในการออกแบบระบบติดตั้งสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร โดยที่ความถี่ 1.575 GHz โดยเลือกใช้จานพาราโบลาที่มีขนาด 1.8 เมตร จะต้องออกแบบชุดขับกำลังงานสูงที่ประมาณ 89.29 วัตต์ ในขณะที่ความถี่ 2.4 GHz เลือกใช้จานพาราโบลาที่มีขนาด 1.8 เมตร จะต้องออกแบบชุดขับกำลังงานสูงที่ประมาณ 199.89 วัตต์ โดยแสดงโครงสร้างในการออกแบบที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



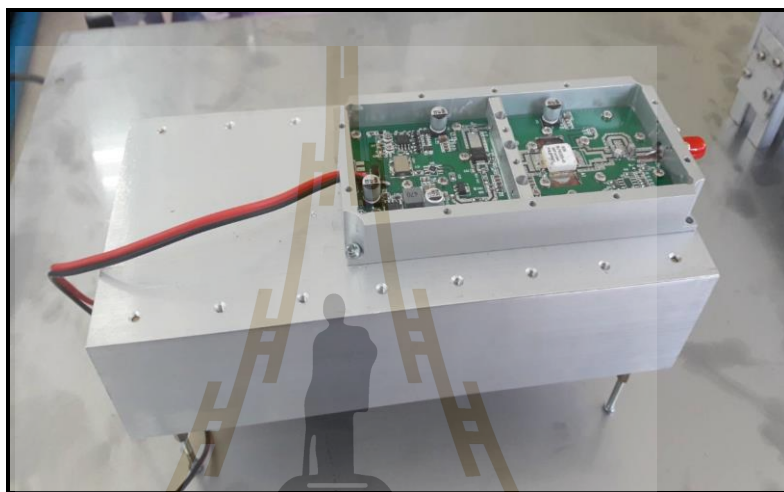
รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับ
ป้องกันภัยคุกคามระยะไกลในความถี่ 1.575 GHz



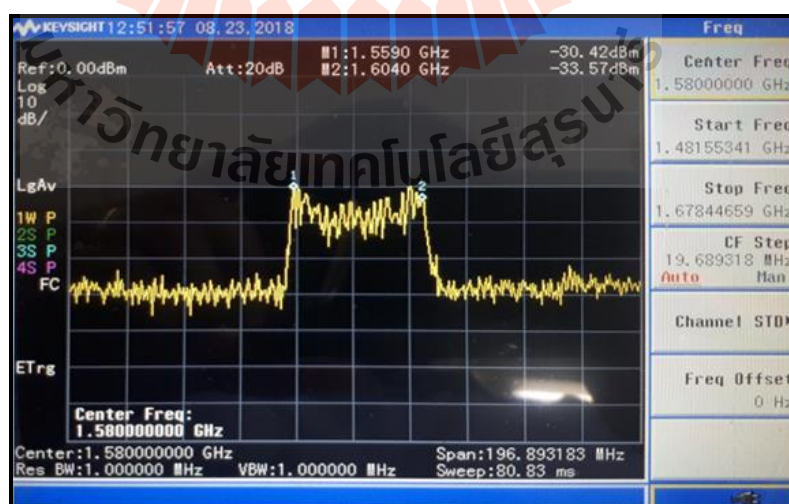
รูปที่ 3.3 โครงสร้างระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับ
ป้องกันภัยคุกคามระยะไกลในความถี่ 2.4 GHz

3.2 การออกแบบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS และ Wi-Fi

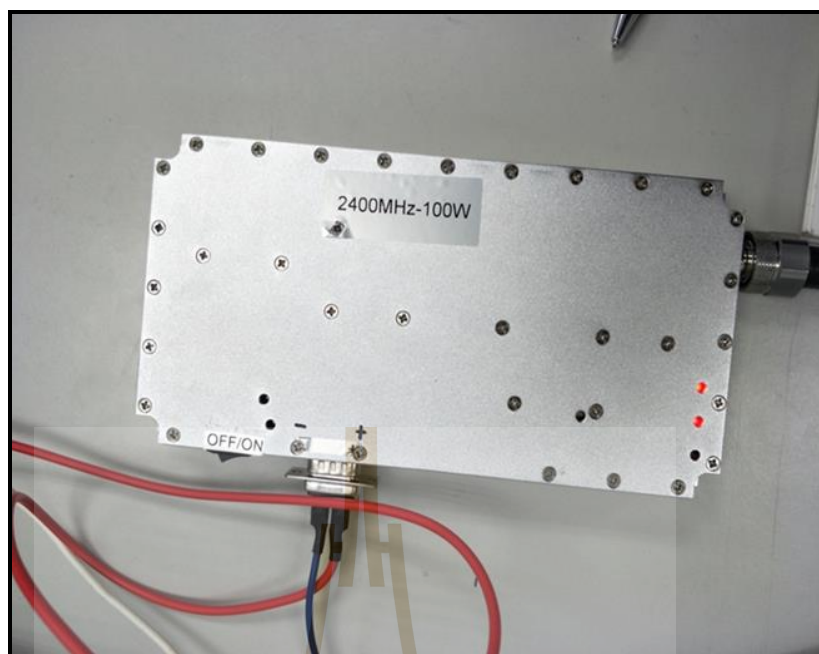
การออกแบบเพื่อใช้งานทั้ง 2 ย่านความถี่ (1.575 GHz, 2.4 GHz) โดยได้ดำเนินการออกแบบและวัดผลการทดสอบเบื้องต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ และรูปที่ 3.3 แสดงชุดกำเนิดคลื่นความถี่ 1.575 GHz และผลการทดสอบในรูปที่ 3.4 สำหรับรูปที่ 3.5 แสดงชุดกำเนิดคลื่นความถี่ 2.4 GHz และผลการทดสอบ



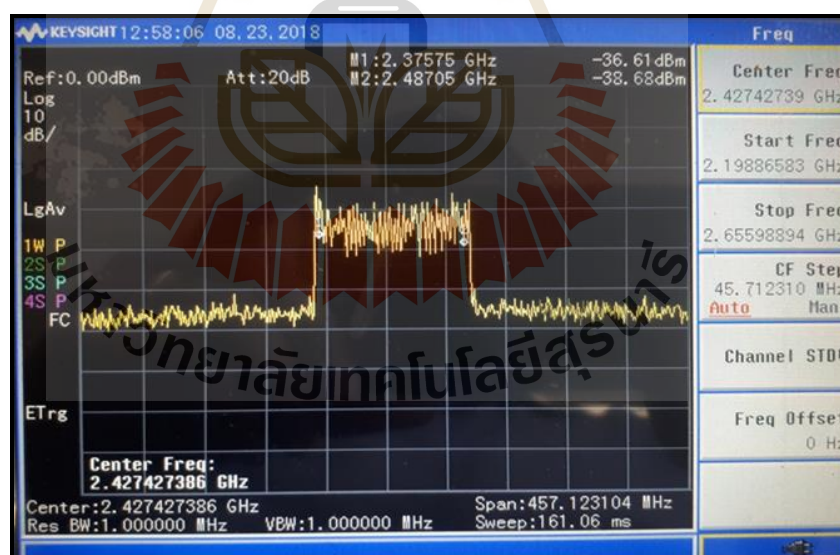
รูปที่ 3.4 ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS 1.575 GHz



รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบสัญญาณ GPS 1.575 GHz



รูปที่ 3.6 ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ Wi-Fi 2.4 GHz

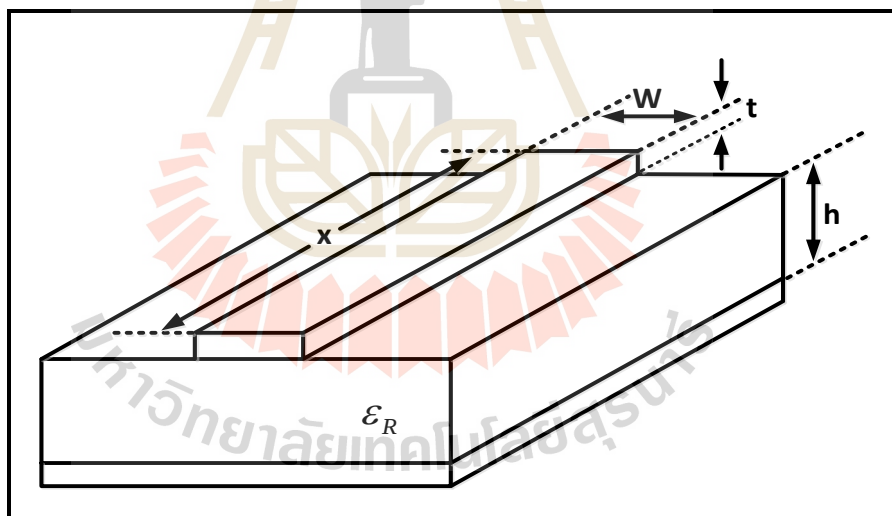


รูปที่ 3.7 ชุดกำเนิดคลื่นความถี่ Wi-Fi 2.4 GHz

จากผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS และ Wi-Fi ที่ความถี่ 1.575 GHz และความถี่ 2.4 GHz ได้ทำการออกแบบเพื่อใช้งานทั้ง 2 ย่านความถี่ (1.575 GHz, 2.4 GHz) พบว่าชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS สามารถกำเนิดความถี่ใช้งาน อยู่ในย่านการทำงานของ GPS เช่นเดียวกับย่านความถี่ Wi-Fi ซึ่งสามารถกำเนิดความถี่ ได้ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานเช่นเดียวกัน

3.3 การออกแบบวงจรรวมสัญญาณและวงจรแยกสัญญาณแบบวิลคินสัน

ไมโครสตริปเป็นสายส่งที่นิยมใช้งานมากกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และสื่อสารในย่านความถี่ ไมโครเวฟที่สร้างอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์โดยวงจรส่วนใหญ่ที่ถูกสร้างขึ้นได้แก่วงจรกรองความถี่ อุปกรณ์พาสซีฟ สายอากาศเป็นต้น และมีการเชื่อมโยงกับสายส่งไมโครสตริปได้แก่วงจรขยายสัญญาณ วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรมิกเซอร์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากไมโครสตริปมีโครงสร้าง เช่นเดียวกับ เส้นตัวนำของลายวงจร บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลักษณะรูปร่างตามภาพตัดขวางของวงจร ไมโครสตริป แสดงดังภาพที่ 3.7



รูปที่ 3.8 โครงสร้างวงจรไมโครสตริป

การคำนวณหาความกว้างของสายส่ง (w) สามารถคำนวณได้โดยมีความสัมพันธ์ของ ค่าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ความหนาของวัสดุ (h) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_0) ดังนี้กรณีที่

$$\frac{w}{h} \leq 2$$

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (3.11)$$

โดยที่

$$A = \frac{Z_0}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right\}^{0.5} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.12)$$

กรณีที่ $\frac{W}{h} \geq 2$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B-1) - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B-1) + 0.39 \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (3.13)$$

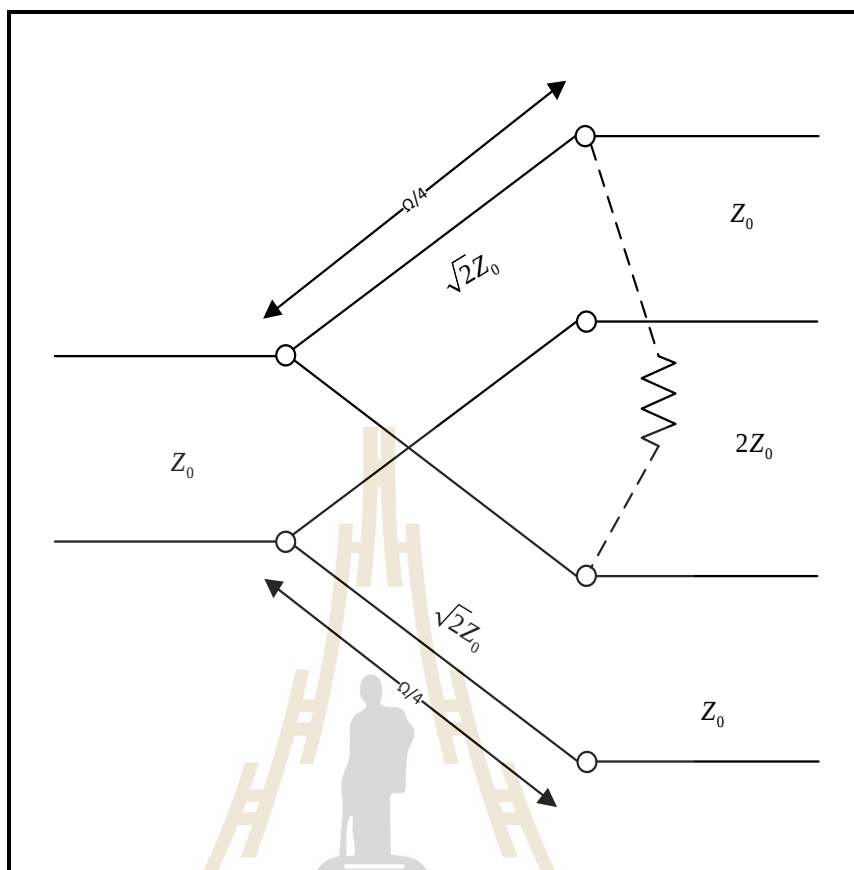
โดยที่

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.14)$$

ค่าความยาวคลื่น λ สามารถคำนวณได้จาก

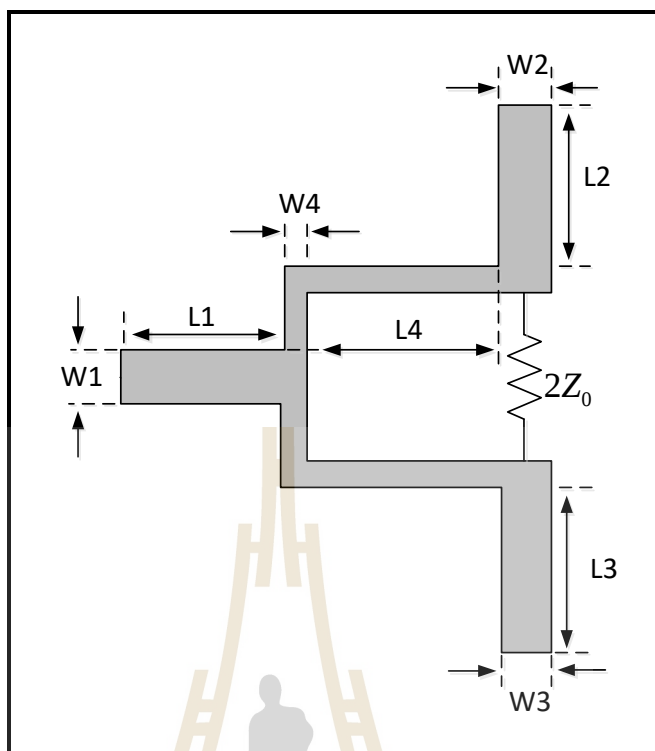
$$\lambda = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.15)$$

สำหรับการออกแบบวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิคคินสัน (Wilkinson Power Divider/Power Combiner) โครงสร้างของวิคคินสัน ที่ดังรูปที่ 3.8 สัญญาณขาเข้า จะถูกแบ่งออกเป็น 2 สัญญาณที่มีขนาดและเฟสที่เท่ากัน โดยใช้การแปลงความต้านทานของ สายนำสัญญาณที่มีความยาว $\lambda/4$ ความต้านทานลักษณะเฉพาะของสายนำสัญญาณ (Impedance) เป็น $Z_0 \sqrt{2}$ และตัวต้านทานระหว่างพอร์ตขาออกทั้ง 2 ด้านเท่ากัน $2Z_0$

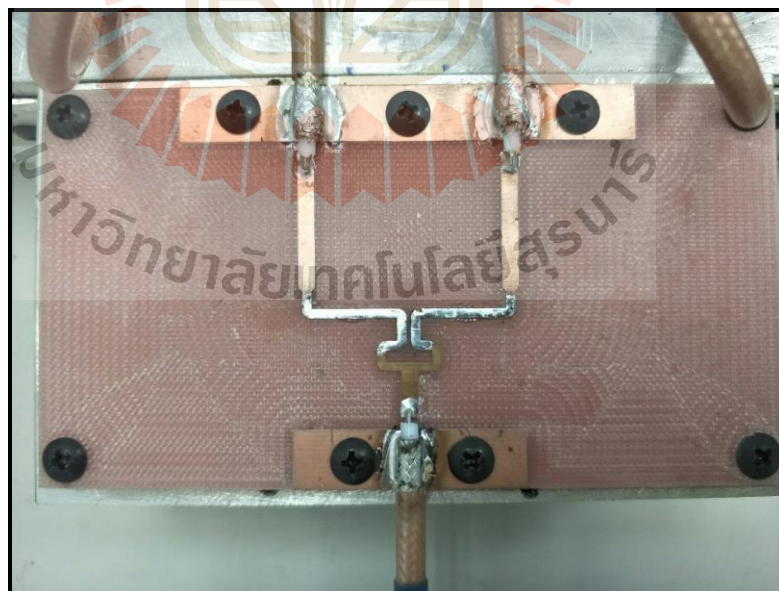


รูปที่ 3.9 รูปแบบพื้นฐานของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบวิลคินสัน

โครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปแสดงในที่ 3.9 โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่มีความหนาของวัสดุ (h) 1.6 มม. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.6 ที่ออกแบบใช้งานในย่านความถี่ 1.575 GHz ที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งเท่ากับ 50Ω โดยใช้ค่าของตัวต้านทานที่ต่อขนานวงจรมีค่าเท่ากับ $2Z_0 = 100\Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งที่มีความยาวคลื่น $\lambda / 4$ มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2Z_0} = 70\Omega$ ทำให้ได้ขนาดโครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้า ที่ขนาดความกว้างของพอร์ตทั้งสาม (W1, W2, W3) เท่ากับ 3 มม. และมีความยาว L1, L2, L3 เท่ากับ 9.5 มม. มีความกว้างช่อง W4 เท่ากับ 1.5 มม. และความยาว L4 เท่ากับ 13.92 มม. แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าที่ออกแบบ



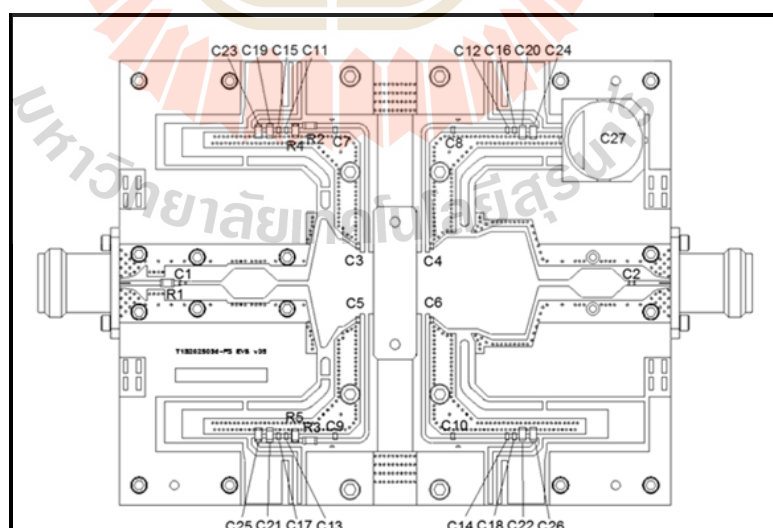
รูปที่ 3.11 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแบ่งกำลังไฟฟ้าแบบ FR4

3.4 การออกแบบชุดขับกำลังสัญญาณ

สำหรับการออกแบบชุดขยายกำลังสัญญาณคลื่นความถี่ในย่าน GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz วงจรขยายกำลังสัญญาณนั้นจะเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ T1G2028536-FL ดังแสดงในรูปที่ 3.12 มีอัตราขยายสัญญาณ 18 เท่า ในการขยายสัญญาณซึ่งสามารถให้กำลังงานเอาต์พุตสูงสุดได้ถึง 260 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

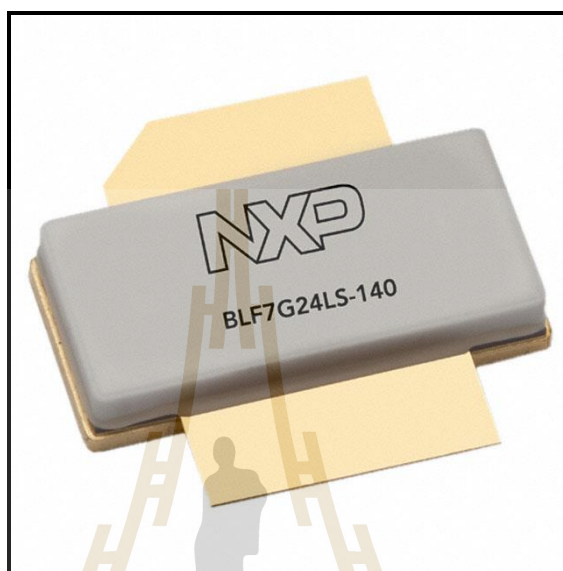


รูปที่ 3.12 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ T1G2028536-FL สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ 1.575 GHz

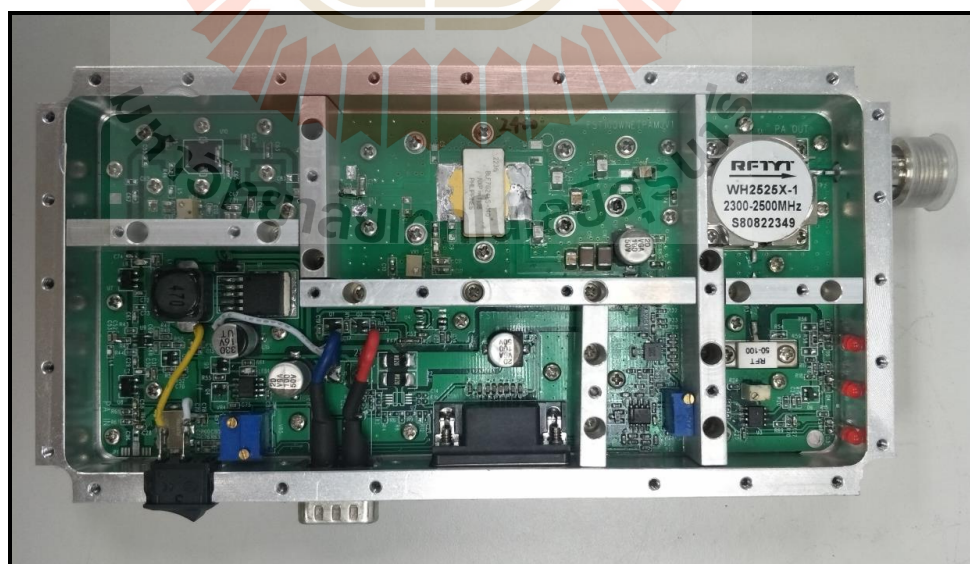


รูปที่ 3.13 วงจรทรานซิสเตอร์ เบอร์ T1G2028536-FL สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ GPS

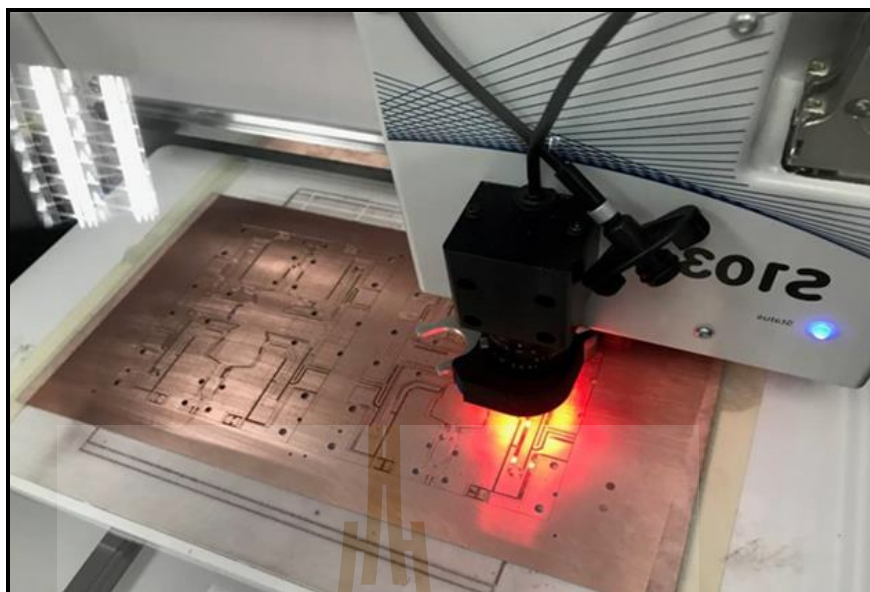
สำหรับการออกแบบชุดขับกำลังสัญญาณในคลื่นความถี่ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งวงจรขยายกำลังสัญญาณนั้นจะเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ MRF24300N ดังแสดงในรูปที่ 3.14 มีอัตราขยายสัญญาณ 15 เท่า ซึ่งสามารถให้กำลังงานเอาต์พุตสูงสุดได้ถึง 320 วัตต์



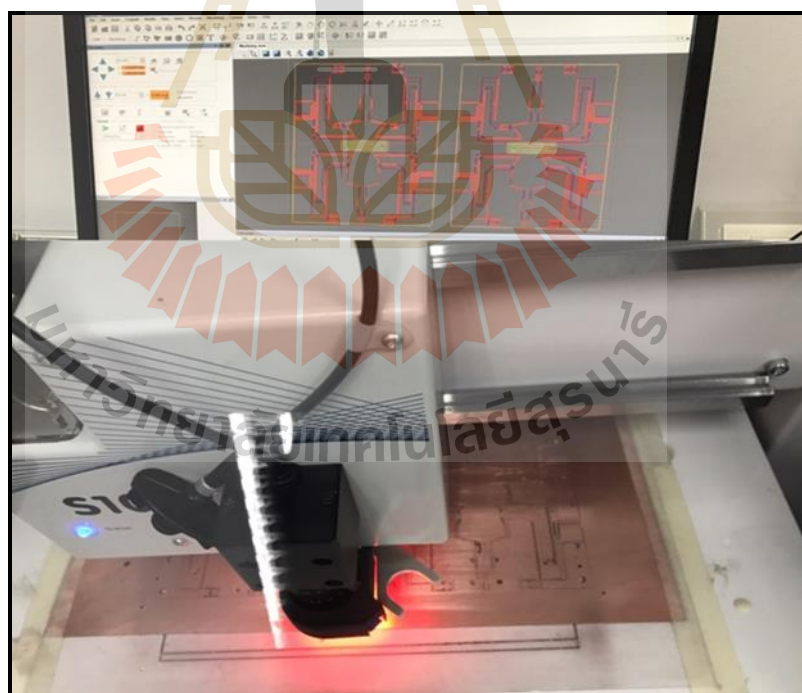
รูปที่ 3.14 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ Wi-Fi



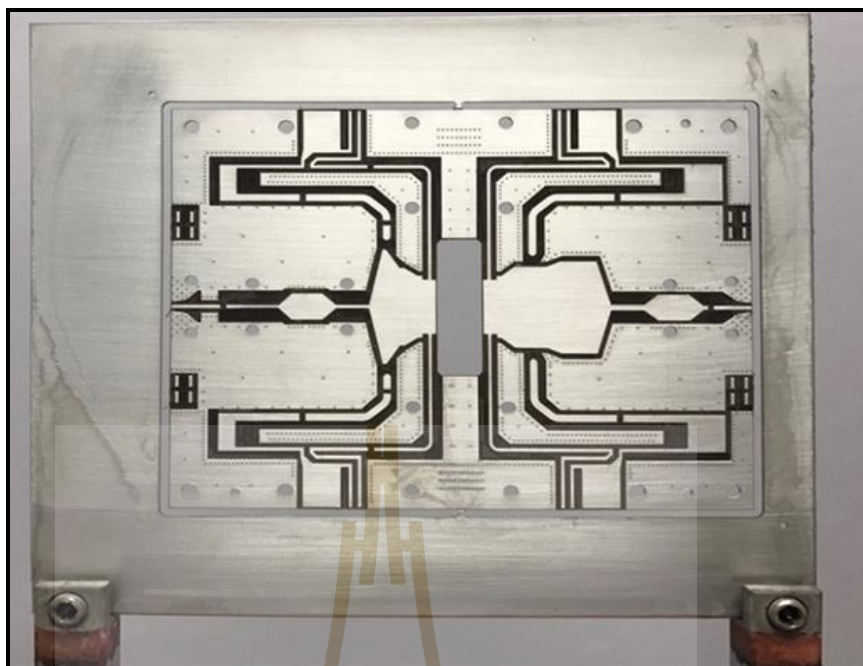
รูปที่ 3.15 ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบคลื่นความถี่ Wi-Fi



รูปที่ 3.16 การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ



รูปที่ 3.17 การออกแบบและสร้างชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ

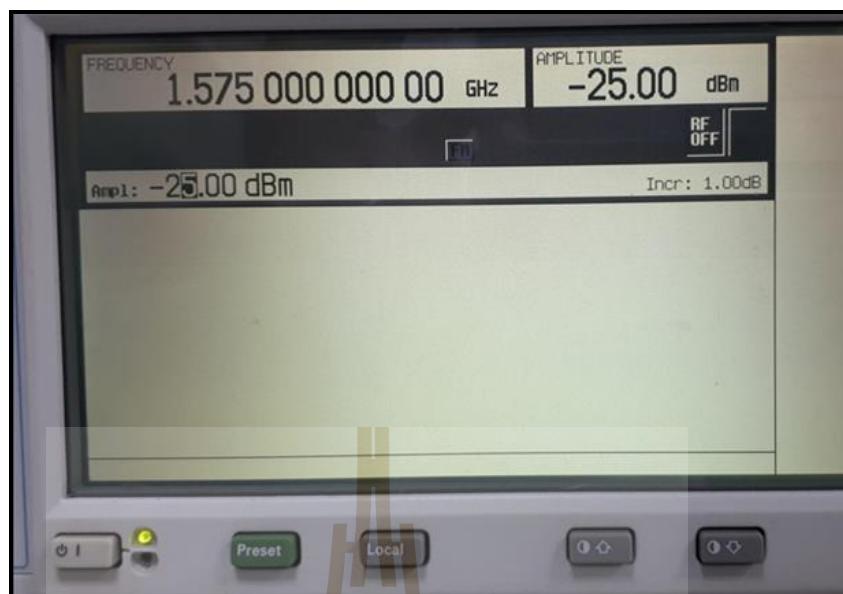


รูปที่ 3.18 การออกแบบและสร้างชุดวงจรจับกำลังสัญญาณ

3.4.1 การทดสอบชุดวงจรจับกำลังสัญญาณที่ความถี่ 1.575 GHz

ในการทดสอบวงจรจับกำลังสัญญาณในห้องปฏิบัติการจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (E4433B, Agilent Signal generator) ในการสร้างสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 1.575 GHz และความแรงตั้งแต่ -20 dBm ถึง 10 dBm ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ส่งต่อไปยังวงจรจับกำลังสัญญาณต่อไป ในการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากรับกำลังสัญญาณ จะถูกลดทอนสัญญาณด้วย Attenuator ขนาด 40 dB ก่อนที่จะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (N9340B, Keysight Spectrum analyzer) เพื่อวัดความแรงสัญญาณ สามารถแสดงการเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

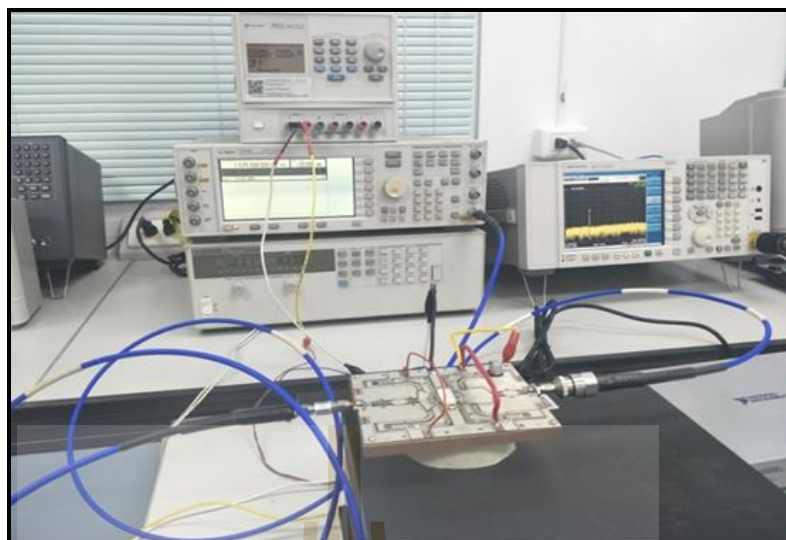
การทดสอบโดยใช้ความถี่ 1.575 GHz โดยจ่ายกำลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ ที่ขนาดความแรง -20 dBm ถึง 10 dBm ส่งต่อไปยังวงจรจับกำลังสัญญาณและวัดผลที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.20 พบว่าสามารถวัดผลได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 เมื่อคำนวณหาอัตราขยายกำลังงานของวงจรจับกำลังสัญญาณ พบว่ามีอัตราขยายสัญญาณประมาณ 10.18 dB ซึ่งสามารถใช้งานเป็นส่วนประกอบหลักในระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลได้เป็นอย่างดี โดยสามารถทดสอบถึงระดับกำลังงาน ที่สูงขึ้นต่อไป



รูปที่ 3.19 การป้อนกำลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่



รูปที่ 3.20 การวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



รูปที่ 3.21 การเตรียมการทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ

3.4.2 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz

ในการทดสอบการทำงานของวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 1.575 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการใช้งานโดยเริ่มป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความแรงตั้งแต่ -20 dBm จนถึง 10 dBm ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz

Power Amplifier			
Input power	Output power	Watt	Gain
dBm	dBm	mW	dB
-20	-9.63	0.10	10.37
-15	-4.48	0.32	10.14
-10	1.12	1.30	11.12
-5	6.33	4.30	11.33
0	11.34	13.6	11.34
5	16.53	45.10	11.53
10	22.02	159.20	12.02

3.4.3 การทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz

ในการทดสอบวงจรขับกำลังสัญญาณในห้องปฏิบัติการจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (E4433B Agilent Signal generator) ในการสร้างสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 2.4 GHz และความแรงตั้งแต่ 0 dBm ถึง 10 dBm ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ส่งต่อไปยังวงจรขับกำลังสัญญาณต่อไป ในการวัดสัญญาณเอาต์พุต ที่ออกวงจรขับกำลังสัญญาณสัญญาณจะถูกลดทอนสัญญาณด้วย Attenuator ขนาด 40 dB ก่อนที่จะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (N9340B, Keysight Spectrum analyzer) เพื่อวัดความแรงสัญญาณ สามารถแสดงการเชื่อมต่อได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.22

การทดสอบโดยใช้ความถี่ 2.4 MHz โดยจ่ายกำลังงานจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ ที่ขนาดความแรง 0 dBm ถึง 10 dBm ส่งต่อไปยังวงจรขับกำลังสัญญาณและวัดผลที่ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.20 พบว่าสามารถวัดผลได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 เมื่อคำนวณหาอัตราขยายกำลังงานของวงจรขับกำลังสัญญาณ พบว่ามีอัตราขยายสัญญาณประมาณ 10.18 dB ซึ่งสามารถใช้งานเป็นส่วนประกอบหลักในระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลได้เป็นอย่างดี โดยสามารถทดสอบถึงระดับกำลังงานที่สูงขึ้นต่อไป



รูปที่ 3.22 การเตรียมการทดสอบชุดวงจรขับกำลังสัญญาณ

3.4.4 ผลการทดสอบวงจรรขยายสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz

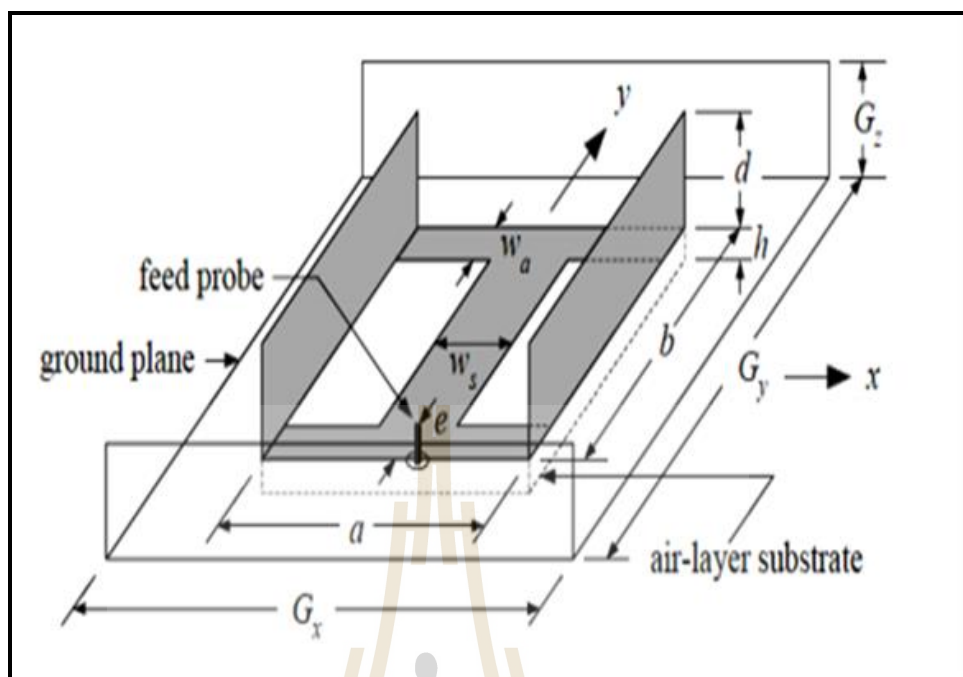
ในการทดสอบการทำงานของวงจรรขยายสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความแรงตั้งแต่ -20 dBm จนถึง 10 dBm ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบวงจรรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 2.4 GHz

Power Amplifier			
Input power	Output power	Watt	Gain
dBm	dBm	mW	dB
0	12.03	16.0	12.03
2	14.21	26.4	12.21
4	16.58	45.5	12.58
6	18.88	77.3	12.88
8	20.46	111.2	12.46
10	22.58	181.1	12.58

3.5 การออกแบบชุดสายอากาศ (Antenna)

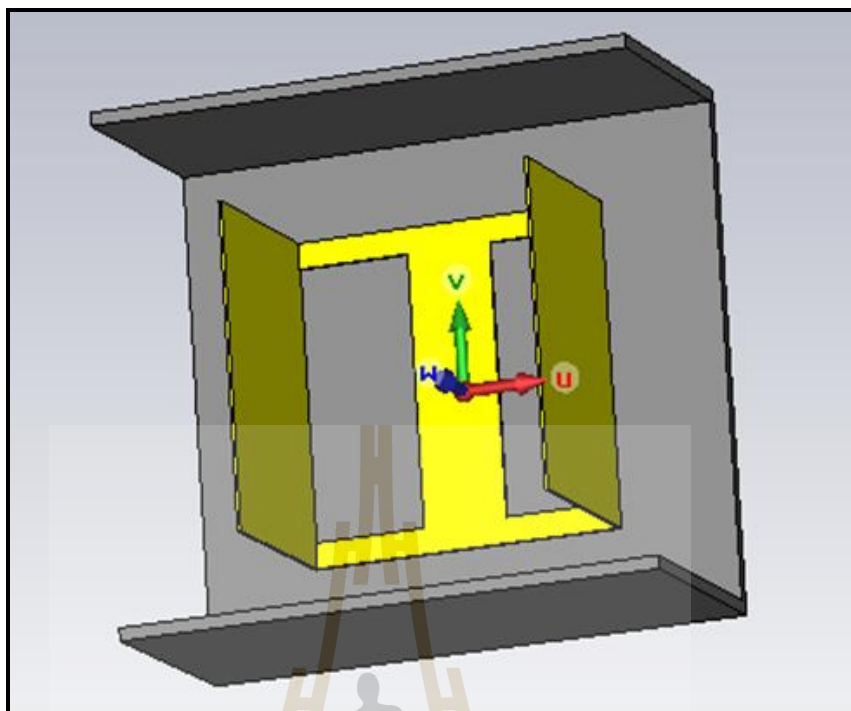
การออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานทั้ง 2 ย่านความถี่ 1.575 GHz และ 2.4 GHz โดยใช้โปรแกรม CST ในการจำลองผล ซึ่งผลที่ได้ครอบคลุมการใช้งานทั้ง 2 ย่านความถี่ โครงสร้างของสายอากาศสองย่านความถี่ดังรูปที่ 3.23 โดยมาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นได้ออกแบบสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.24 และทดสอบผลการสูญเสียย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 พบว่าสายอากาศสามารถใช้งานและอยู่ในย่านการทำงานของ GPS เช่นเดียวกับย่านความถี่ Wi-Fi ซึ่งสามารถกำเนิดความถี่ได้ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ



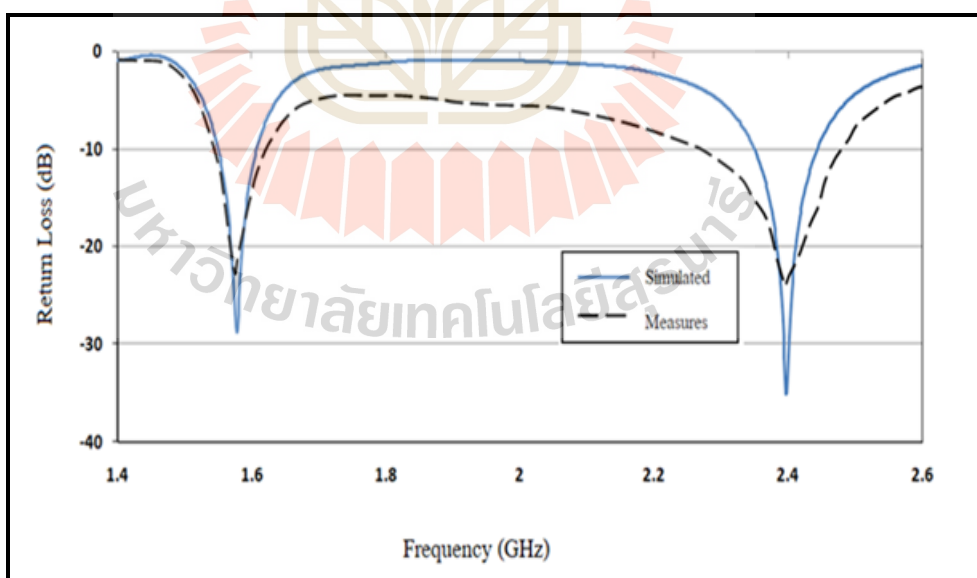
รูปที่ 3.23 โครงสร้างสายอากาศสองย่านความถี่

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศสองย่านความถี่

Parameter	Dimensions(mm)
a	52
b	60
d	39
G_x	90
G_y	80
G_z	45
h	3
W_a	4
W_s	14
Aluminum grond plane thickness	2
Copper mount thickness	0.5



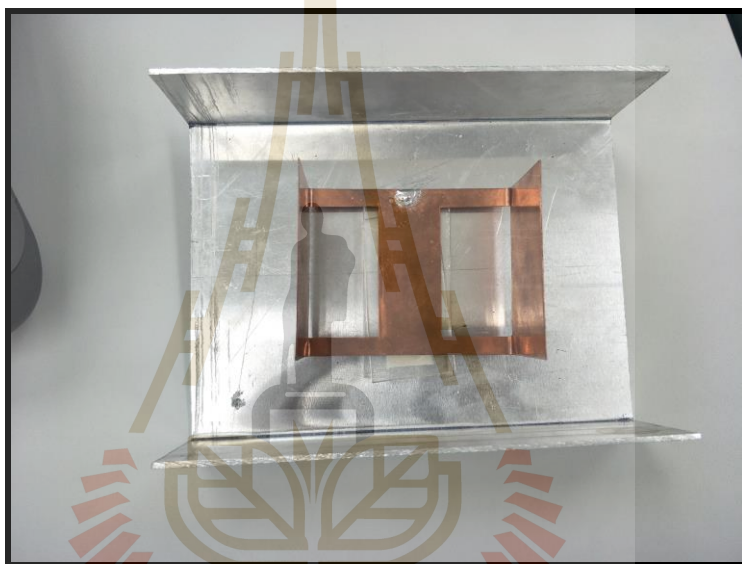
รูปที่ 3.24 การจำลองแบบสายอากาศสองย่านความถี่



รูปที่ 3.25 ผลจำลองการสูญเสียย้อนกลับ (S11)

จากการออกแบบสายอากาศสองย่านความถี่โดยย่านความถี่ 1.575GHz มีแบนด์วิธ 100 MHz และที่ย่านความถี่ 2.4 GHz มีแบนด์วิธ 80 MHz

จากการออกแบบสายอากาศและจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ โดยได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบออกมา และจำเป็นต้องนำขนาดที่ได้จริงจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio มาเพื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบนั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 สายอากาศสองย่านความถี่ใช้ในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล เพื่อใช้งานที่ความถี่ 1.575 GHz และ 2.4 GHz ในการป้องกันอากาศยานไร้คนขับระยะไกล ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร

สำหรับส่วนของการออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงสำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกลเพื่อให้สามารถตัดสัญญาณได้ทั้งสองระบบคือ GPS และ Wi-Fi เพื่อสามารถวิเคราะห์และทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ สำหรับทดสอบในบทต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและการติดตั้ง

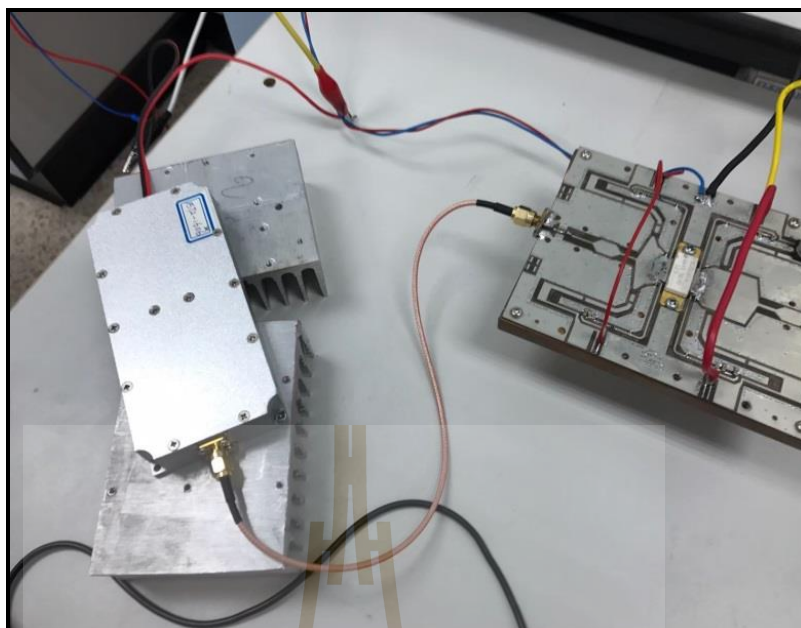
4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล ในบทที่ผ่านมาโดยมีการใช้ทฤษฎีและวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น เพื่อนำมาสร้างระบบจำลองที่สามารถตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับที่ระยะทาง 2 กิโลเมตร เพื่อแสดงให้เห็นว่าการออกแบบและการวิเคราะห์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับทฤษฎี ซึ่งในบทนี้จะได้นำผลการออกแบบดังกล่าวมาสร้างและวัดทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบและการจำลองแบบที่ได้ในบทก่อนหน้านี้ ดังนั้นในบทนี้ ได้ทำการวัดทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันผล สามารถตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับที่ระยะไกลได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Keysight รุ่น N9340B และเครื่องวัดกำลังงานแบบเทอร์มิสเตอร์ (N432A, Keysight Thermistor Power Meter) ในการวัดทดสอบระดับความแรงของสัญญาณที่ระยะต่างๆ และสุดท้ายจะทำการเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบจริงเทียบกับ การวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อสรุปผลการวิจัยต่อไป

4.2 การวัดผลทดลองระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะไกล

4.2.1 การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS และ Wi-Fi

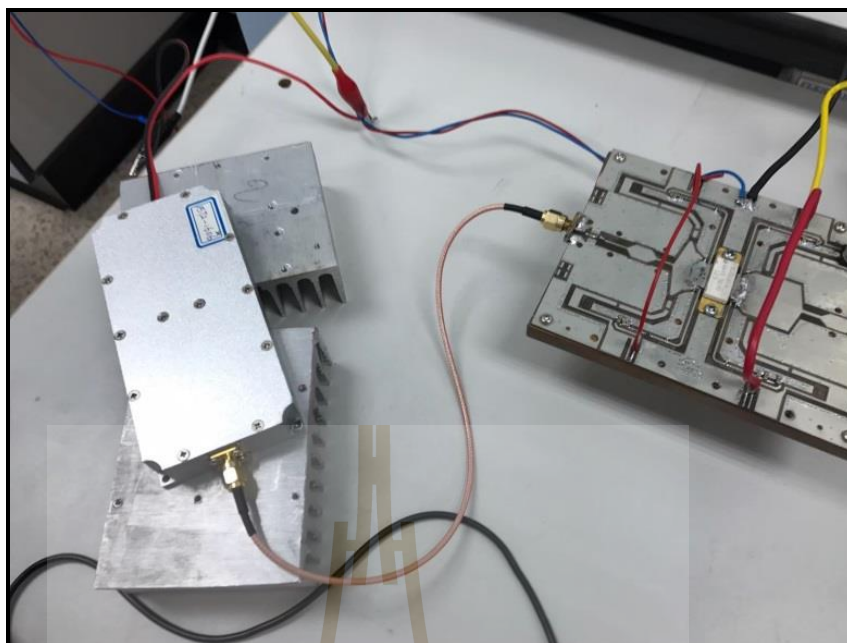
จากผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz โดยรับอินพุตแรงดันไฟฟ้า 5 ถึง 10 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และวัดสัญญาณเอาต์พุตด้วยเครื่องวัดกำลังงานแบบเทอร์มิสเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และชุดกำเนิดคลื่นความถี่ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยรับอินพุตแรงดันไฟฟ้า 10 ถึง 15 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และวัดสัญญาณเอาต์พุตด้วยเครื่องวัดกำลังงานแบบเทอร์มิสเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งได้ทำการออกแบบเพื่อใช้งานทั้ง 2 ย่านความถี่ (1.575 GHz, 2.4 GHz) พบว่าชุดกำเนิดคลื่นความถี่ GPS สามารถกำเนิดความถี่ใช้งานและอยู่ในย่านการทำงานของ GPS เช่นเดียวกับย่านความถี่ Wi-Fi ซึ่งสามารถกำเนิดความถี่ได้



รูปที่ 4.1 การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 1.575 GHz

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 1.575 GHz

V_D (V)	I_D (A)	dBm	Watt
5	1.10	30.00	1.00
6	2.38	34.07	2.55
7	2.90	35.75	3.75
8	3.17	37.26	5.32
9	3.42	39.01	7.96
10	3.76	40.81	12.05



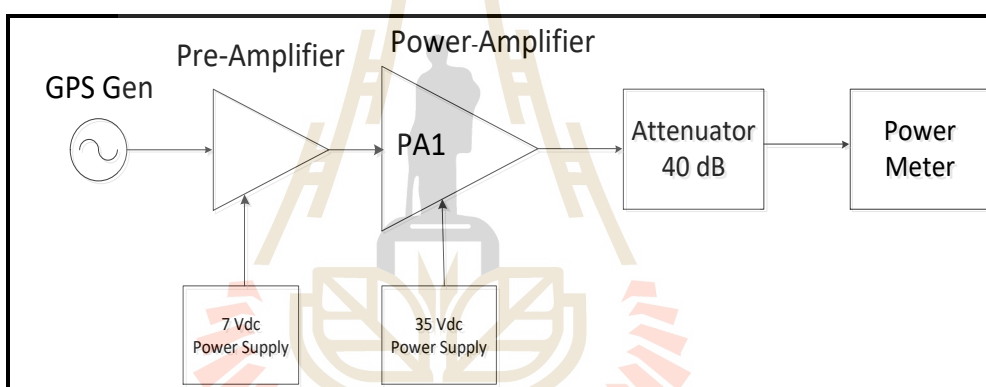
รูปที่ 4.2 การวัดผลการทดลองชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบชุดกำเนิดคลื่นความถี่ย่าน 2.4 GHz

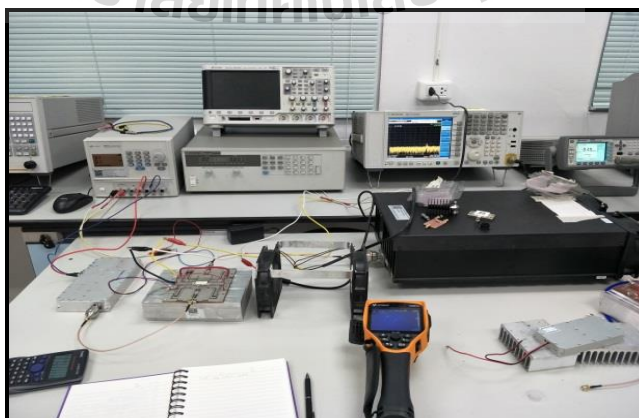
V_D (V)	I_D (A)	dBm	Watt
10	2.18	30.00	1.00
11	2.73	33.88	2.44
12	3.34	36.38	4.34
13	3.90	38.20	6.61
14	4.45	39.72	9.37
15	4.96	41.51	12.61

4.2.2 การวัดผลการทดลองชุดขยายกำลังสัญญาณในย่าน GPS ความถี่ 1.575 GHz

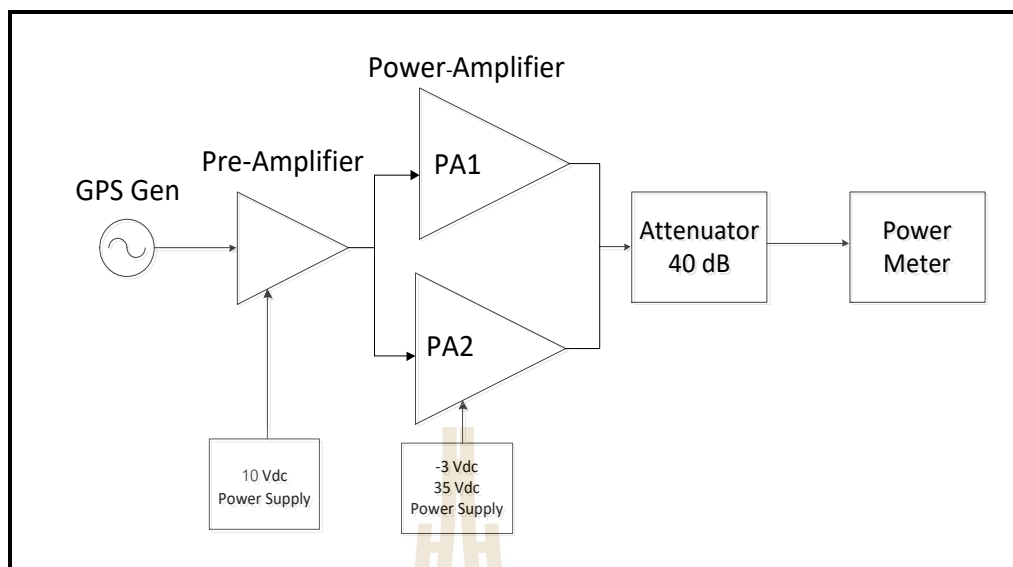
ในการทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงจากการออกแบบในบทที่ 3 นั้นต้องใช้ วงจรขยาย 2 วงจร จะได้กำลังงานเอาต์พุต 100 วัตต์ โดยแต่ละวงจรจะมีกำลังงานเอาต์พุต 50 วัตต์ โดยแสดงการต่ออุปกรณ์ 1 วงจรดังแสดงรูปที่ 4.3 - 4.4 และการต่ออุปกรณ์ 2 วงจรดังแสดงรูปที่ 4.5 - 4.6 โดยรับสัญญาณชุดกำเนิดความถี่ 1-12 วัตต์ ส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณความถี่สูง วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงนั้นจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขาเดรนเท่ากับ 35 โวลต์ และป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขาเกตเท่ากับ -3 โวลต์ ก่อนสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Power Amplifier สัญญาณจะถูกลดทอนสัญญาณด้วย Attenuator ขนาด 40 dB และวัดผลกำลังงานที่เอาต์พุตด้วยเครื่องวัดกำลังงานแบบเทอร์มิสเตอร์ (N432A, Keysight Thermistor Power Meter) โดยวัดผลกำลังงานความถี่สูงที่เอาต์พุต แต่ละจุดดังแสดงในรูปที่ 4.7 - 4.9



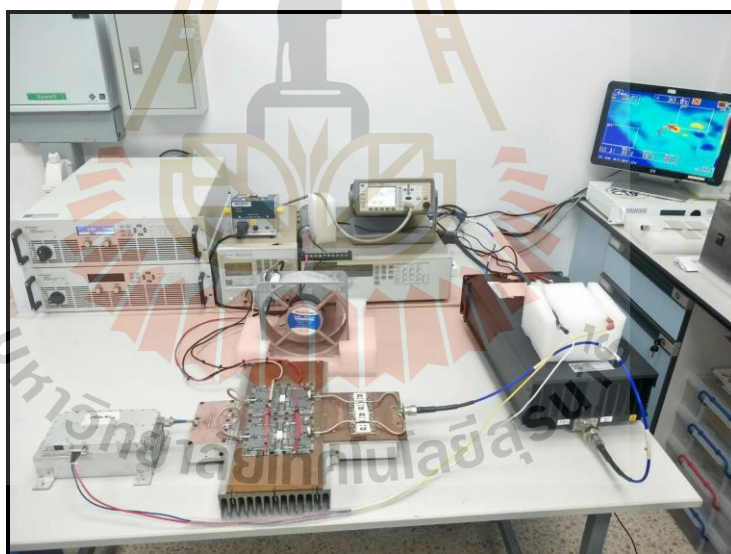
รูปที่ 4.3 แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร



รูปที่ 4.4 การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วงจร



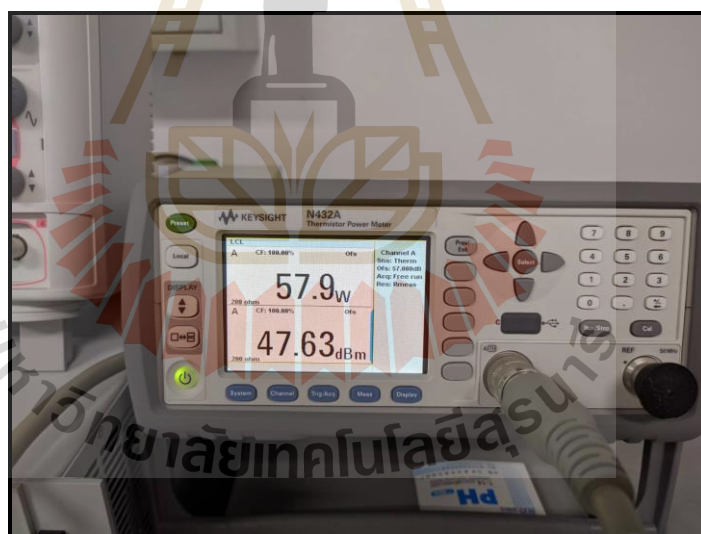
รูปที่ 4.5 แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วัตต์



รูปที่ 4.6 การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วัตต์



รูปที่ 4.7 วงจรขับเคลื่อนกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 1



รูปที่ 4.8 วงจรขับเคลื่อนกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 2



รูปที่ 4.9 วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุต 2 วงจร

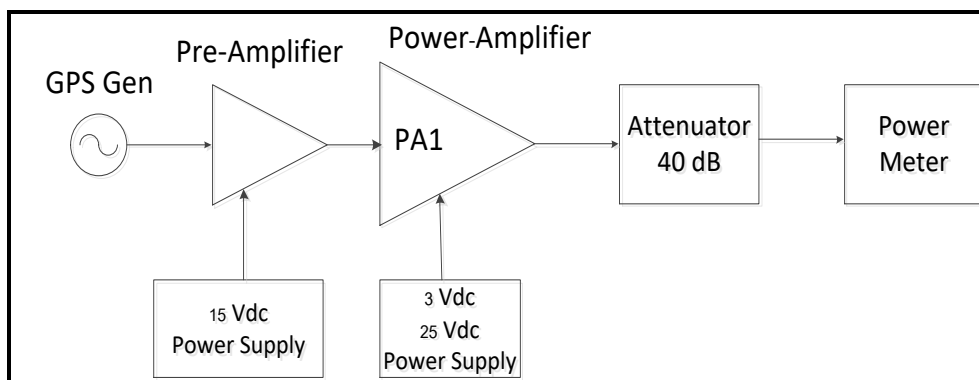
จากผลการทดลองวัดกำลังเอาต์พุตของวงจรแต่ละวงจรแต่ละวงจะและผลจากการวัดกำลังงานที่อินพุตจะทำให้ค่าที่ได้นั้นมาคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณจากสมการที่ 2.4 โดยจะมีอัตราขยายสัญญาณอยู่ที่ 11 dB ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการทดสอบพบว่าอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ 105 วัตต์ และคงเริ่มคงที่ และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณความถี่สูงได้จากสมการที่ 2.4 โดยมาประสิทธิภาพประมาณ 24 % และเริ่มลดลงเมื่อกำลังงานเอาต์พุตที่ 105 วัตต์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 1.575 GHz

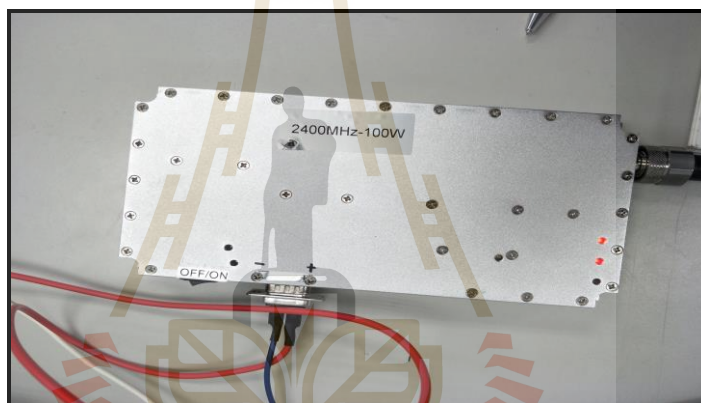
Power Amplifier			
Input power	Output power	Watt	Gain
dBm	dBm	W	dB
30.00	41.03	12.67	11.03
34.07	45.96	39.44	11.89
35.75	46.58	45.49	10.83
37.26	48.86	76.91	11.60
39.01	50.22	105.19	11.21
40.81	51.30	134.89	10.49

4.2.3 การวัดผลการทดลองชุดขยายกำลังสัญญาณในย่าน Wi-Fi ความถี่ 2.4 GHz

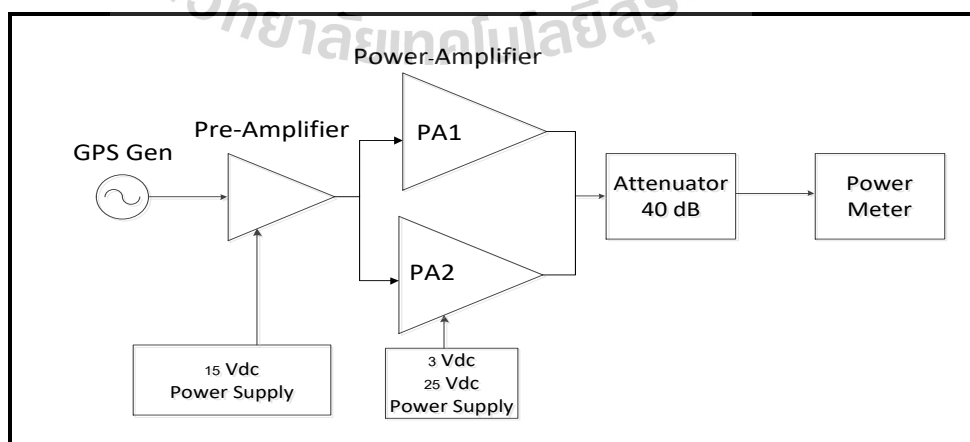
ในการทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงจากการออกแบบใช้วงจรขยาย 2 วงจร จะได้กำลังงานเอาต์พุต 100 วัตต์ โดยแต่ละวงจรจะมีกำลังงานเอาต์พุต 100 วัตต์ โดยแสดงการต่ออุปกรณ์ 1 วงจรดังแสดงรูปที่ 4.10 ถึง 4.11 และการต่ออุปกรณ์ 2 วงจรดังแสดงรูปที่ 4.12 ถึง 4.13 โดยรับสัญญาณชุดกำเนิดความถี่ 1 ถึง 12 วัตต์ ส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณความถี่สูง วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงนั้นจะป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขาเดรนเท่ากับ 25 โวลต์ และป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขากเกตเท่ากับ 3 โวลต์ ก่อนสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Power Amplifier สัญญาณจะถูกลดทอนสัญญาณด้วย Attenuator ขนาด 40 dB และวัดผลกำลังงานที่เอาต์พุตด้วยเครื่องวัดกำลังงานแบบเทอร์มิสเตอร์ (N432A, Keysight Thermistor Power Meter) โดยวัดผลกำลังงานความถี่สูงที่เอาต์พุต แต่ละจุดดังแสดงในรูปที่ 4.14 - 4.16



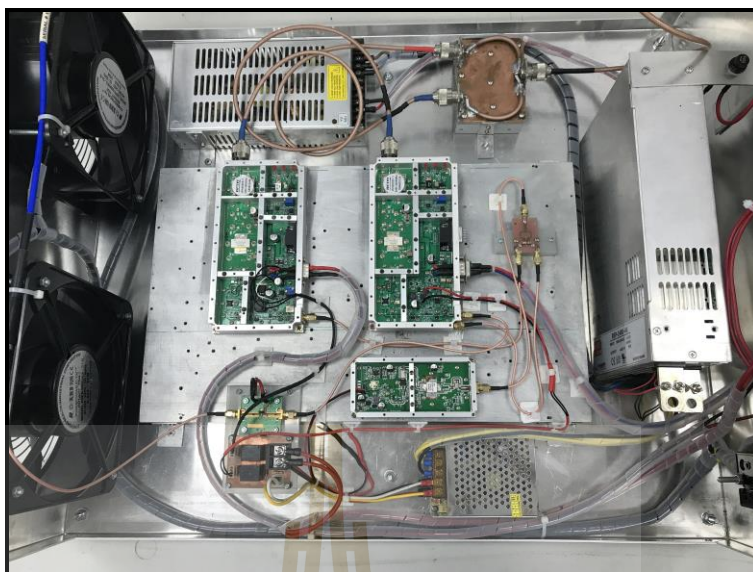
รูปที่ 4.10 แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วัตต์



รูปที่ 4.11 การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 1 วัตต์



รูปที่ 4.12 แผนผังการต่อเพื่อทดสอบวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วัตต์



รูปที่ 4.13 การวัดผลวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง 2 วัตต์



รูปที่ 4.14 วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 1



รูปที่ 4.15 วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุตวงจรที่ 2



รูปที่ 4.16 วงจรขับกำลังงานสัญญาณเอาต์พุต 2 วงจร

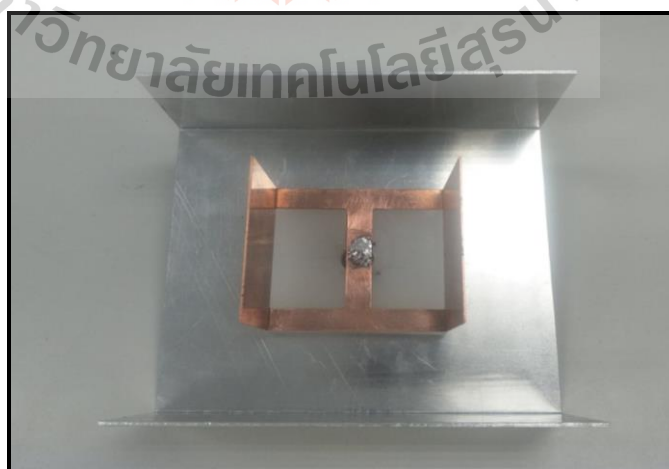
จากผลการทดลองวัดกำลังเอาต์พุตของวงจรแต่ละวงจรแต่ละวงจะและผลจากการวัดกำลังงานที่อินพุตจะทำให้ค่าที่ได้นั้นมาคำนวณหาอัตราขยายสัญญาณจากสมการที่ 2.4 โดยจะมีอัตราขยายสัญญาณอยู่ที่ 12 dB ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดสอบพบว่าอัตราขยายสูงสุดอยู่ที่ 190 วัตต์ และคงเริ่มคงที่ และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องขยายสัญญาณความถี่สูงได้จากสมการที่ 2.4 โดยมาประสิทธิภาพประมาณ 25 % และเริ่มลดลงเมื่อกำลังงานเอาต์พุตที่ 190 วัตต์

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณ ที่ความถี่ 2.4 GHz

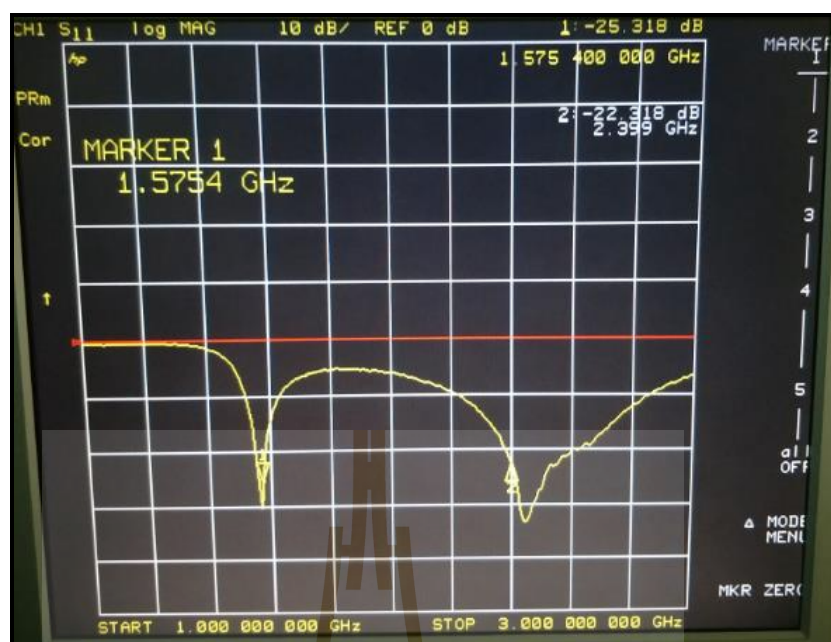
Power Amplifier			
Input power	Output power	Watt	Gain
dBm	dBm	W	dB
30.00	42.86	19.32	12.86
33.88	45.23	33.34	11.35
36.38	48.78	75.50	12.40
38.20	50.50	112.72	12.30
39.72	51.69	147.57	11.97
40.02	52.79	190.12	12.77

4.2.4 การวัดผลการทดลองการออกแบบชุดสายอากาศ

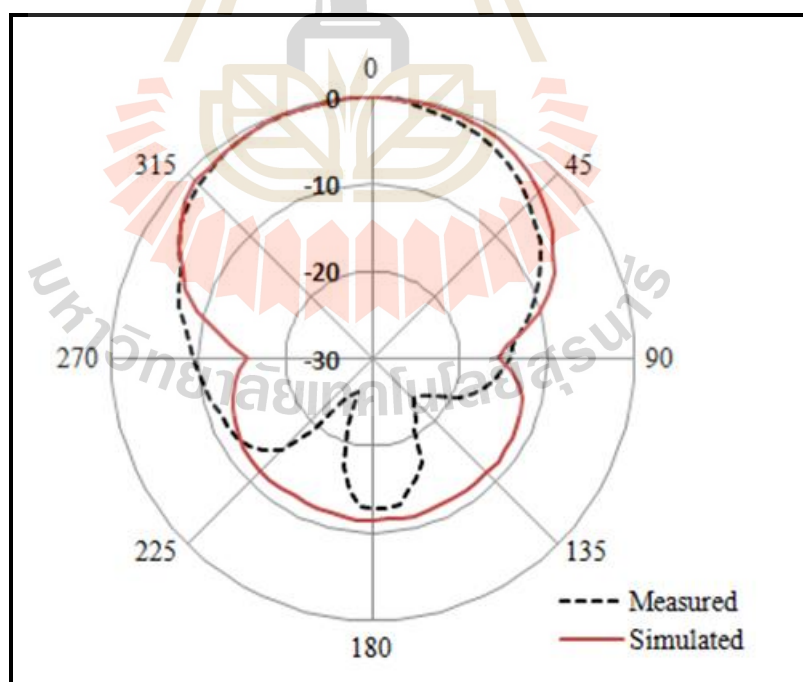
จากการออกแบบสายอากาศและจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ โดยได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบออกมา และจำเป็นต้องนำขนาดที่ได้จริงจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio มาเพื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบนั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 4.17



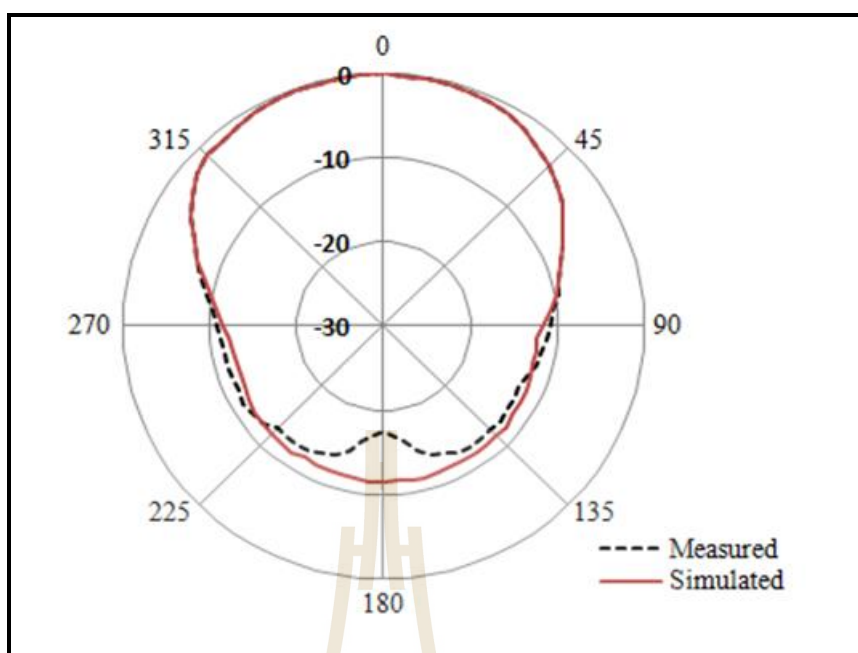
รูปที่ 4.17 สายอากาศสองย่านความถี่ใช้ในการตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับ



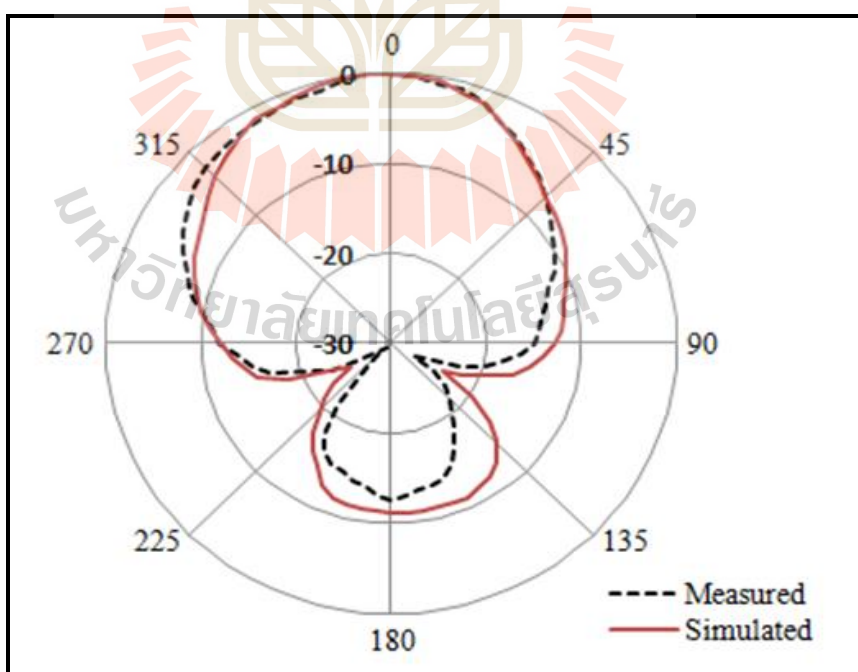
รูปที่ 4.18 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ



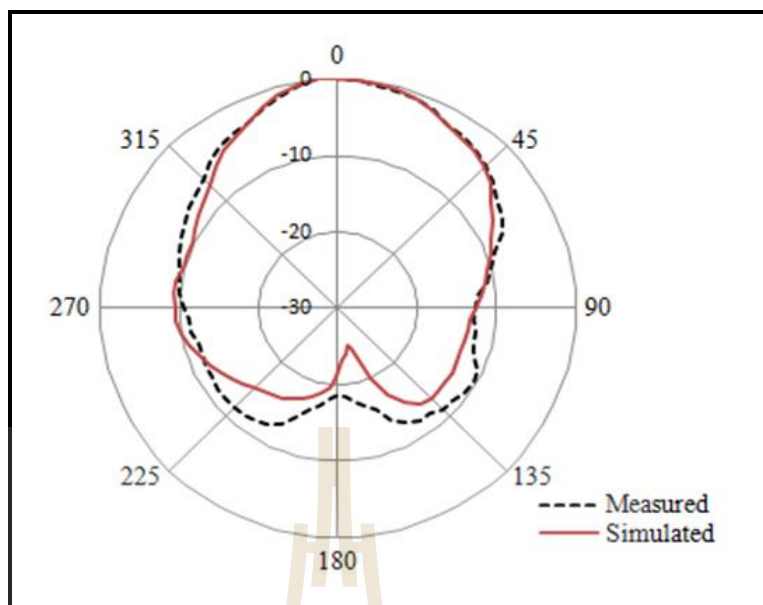
รูปที่ 4.19 ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)
ที่ความถี่ 1.575 GHz



รูปที่ 4.20 ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)
ที่ความถี่ 1.575 GHz



รูปที่ 4.21 ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)
ที่ความถี่ 2.4 GHz



รูปที่ 4.22 ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่ความถี่ 2.4 GHz

หลังจากได้ออกแบบสายอากาศแล้วนั้นจากการคำนวณได้เลือกให้จานพาราโบลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสัญญาณมีอัตราขยาย 35 dB ทำให้สามารถส่งสัญญาณรบกวนอากาศยานไร้คนขับที่ระยะทาง 2 กิโลเมตรได้ดังแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 จานพาราโบลารายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 เซนติเมตร

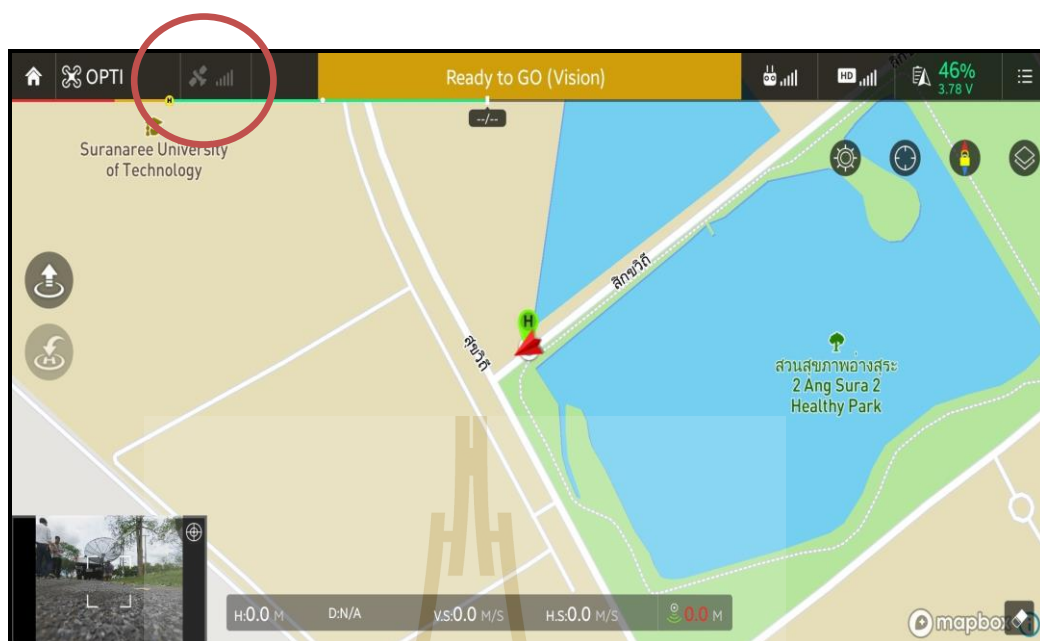
4.3 การติดตั้งและทดสอบจริง

4.3.1 การทดสอบเครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงในระบบ GPS ที่ ความถี่ 1.575 GHz

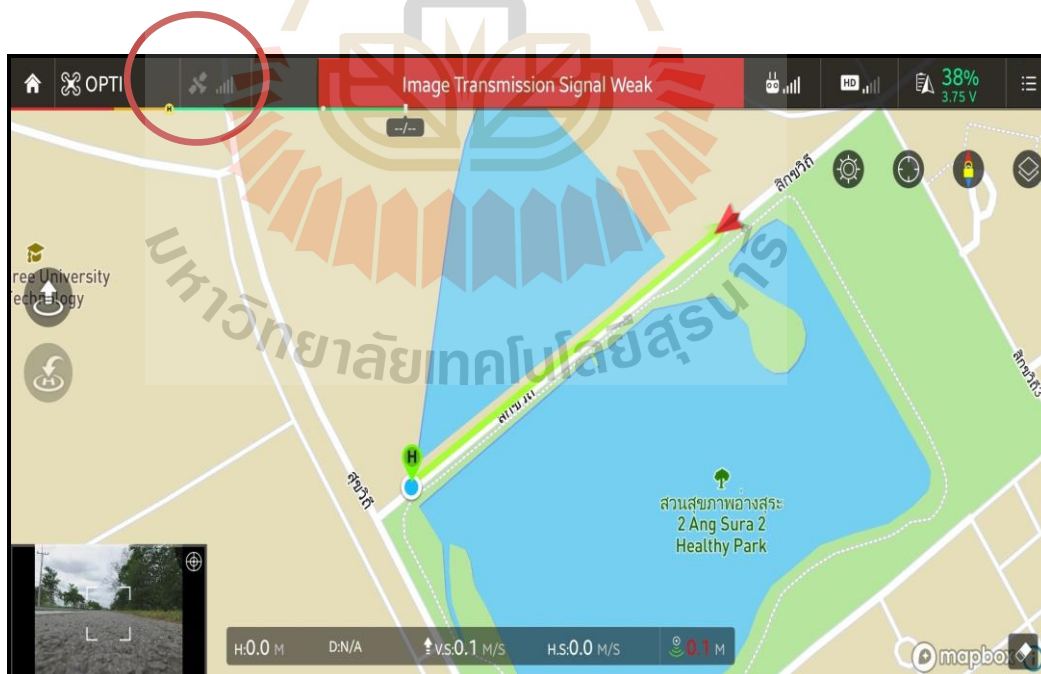
ทำการทดสอบกำลังงานที่ 105 วัตต์ โดยใช้จานพาราโบลาในการขยายสัญญาณ มีอัตราขยายเท่ากับ 35 dB และทำการกำหนดระยะทางในการทดสอบ 100 เมตร 500 เมตร 1,000 เมตร 1,500 เมตร และ 2,000 เมตร ซึ่งการเตรียมการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.22 และระหว่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.29



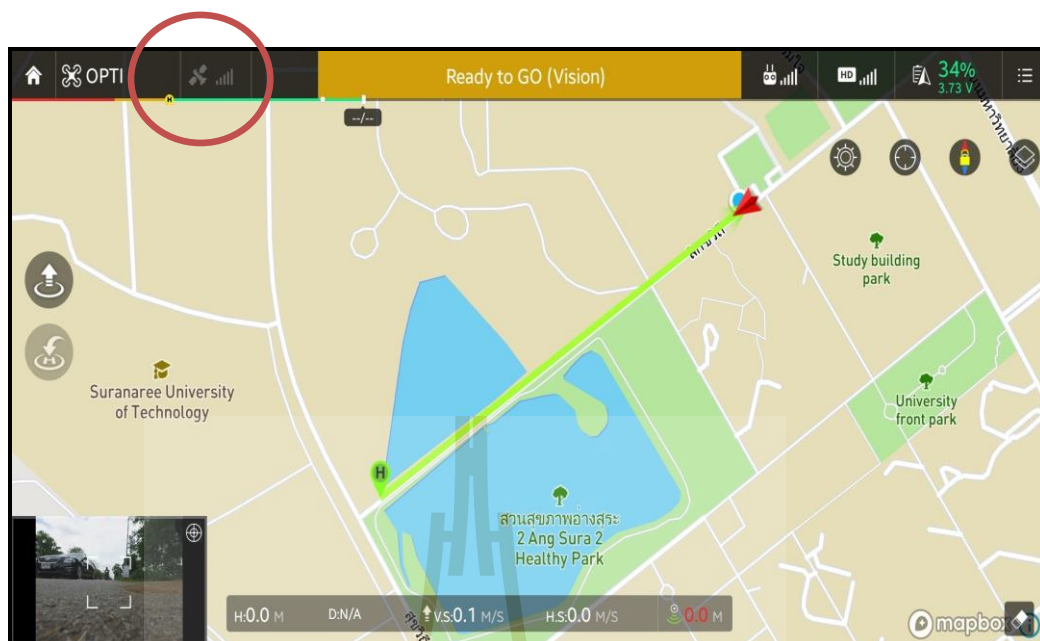
รูปที่ 4.24 การเตรียมการทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz



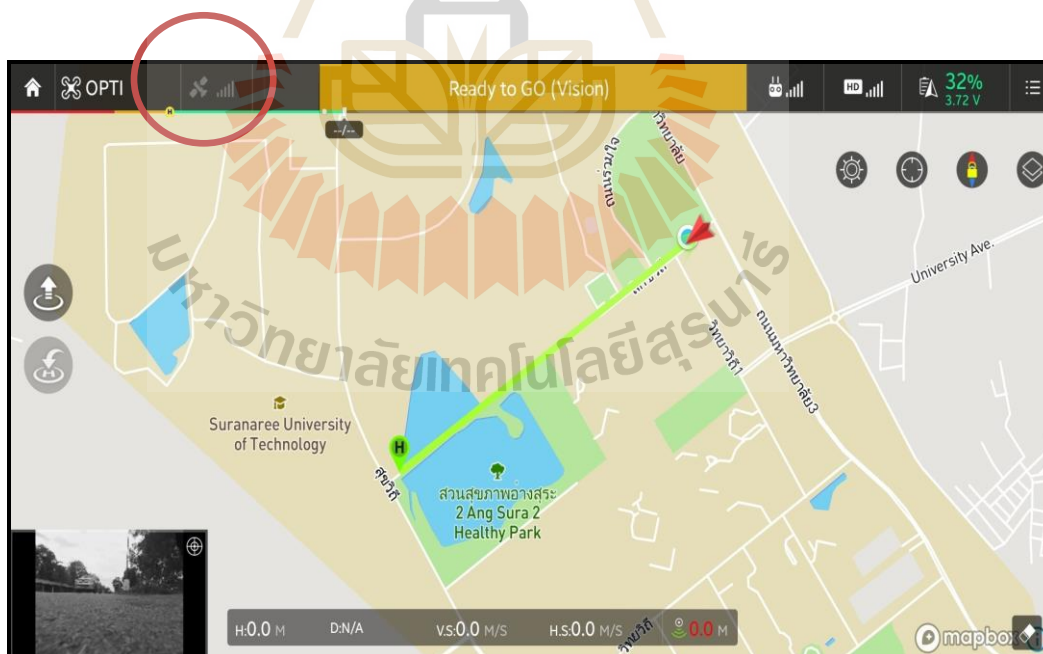
รูปที่ 4.25 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 100 เมตร



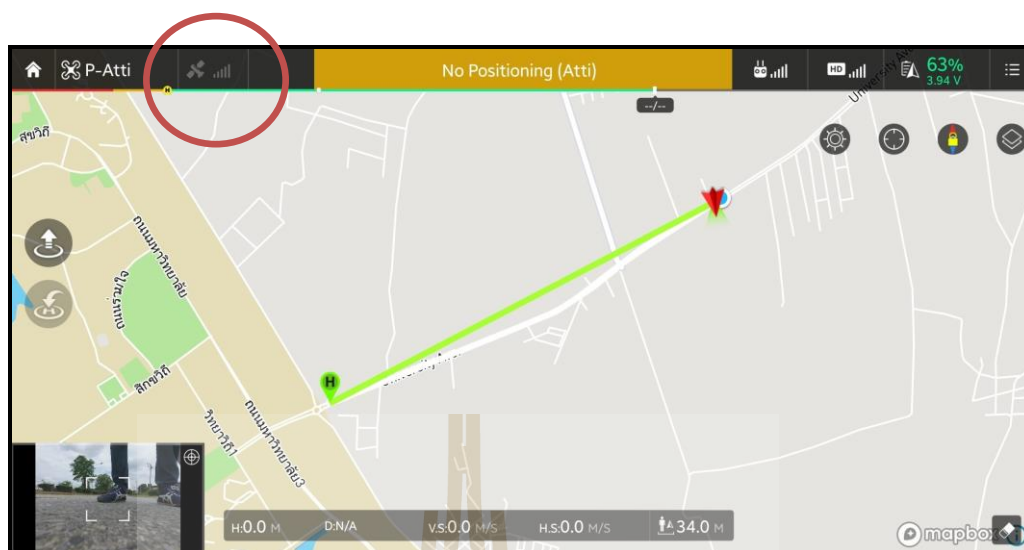
รูปที่ 4.26 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 500 เมตร



รูปที่ 4.27 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 1000 เมตร



รูปที่ 4.28 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 1,500 เมตร



รูปที่ 4.29 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 2,000 เมตร

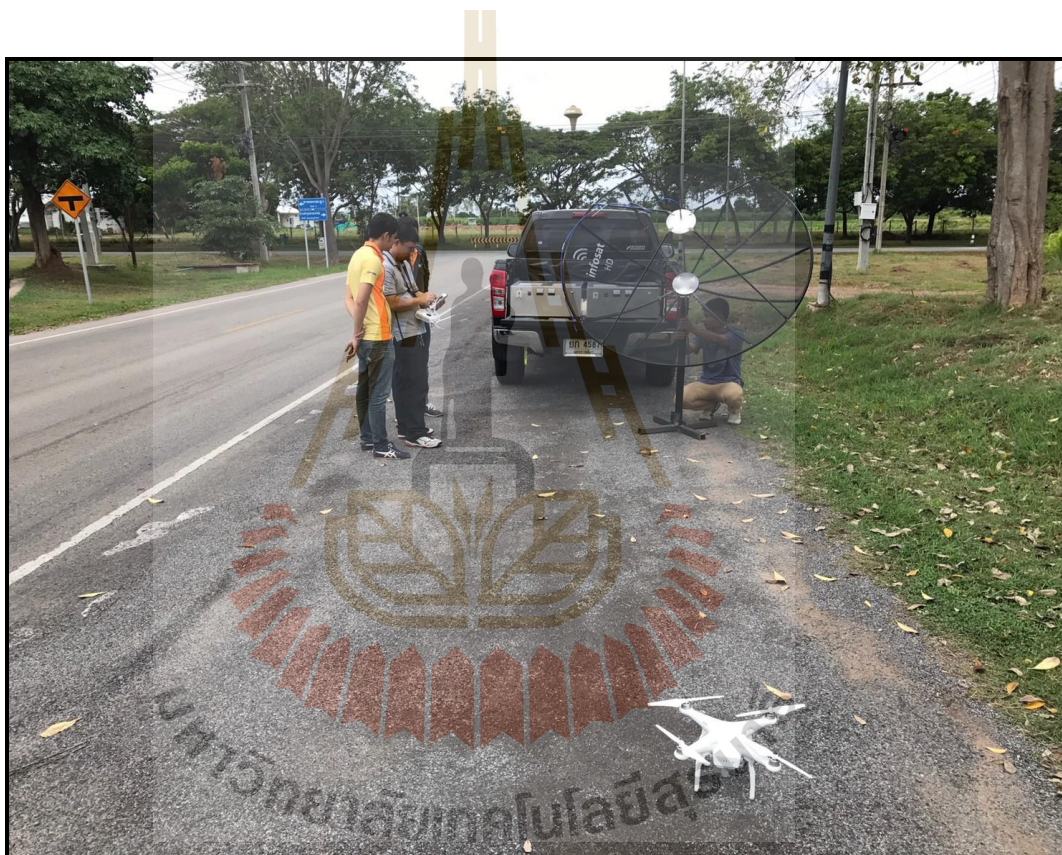
จากผลการทดสอบพบว่าระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz ที่ระยะ 100 เมตร 500 เมตร 1,00 เมตร 1,500 เมตร และ 2,000 เมตร นั้นสามารถตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่ากำลังเทียบกับระยะทาง ในระบบ GPS ที่ความถี่ 1.575 GHz

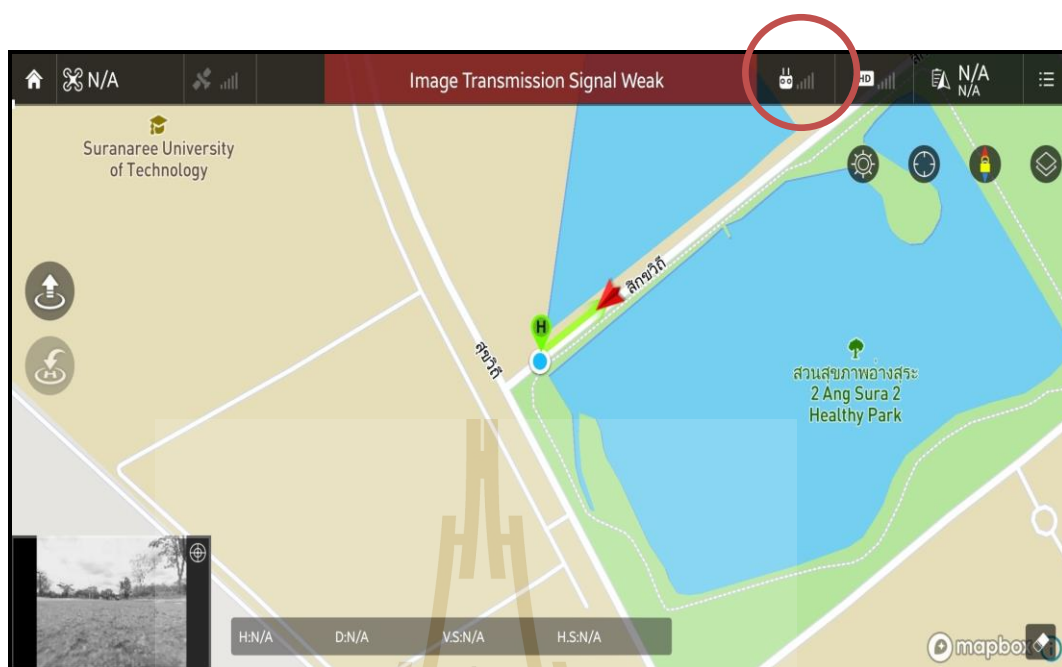
ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่วัดได้ (dBm)	ผลการทดสอบ (%)
100	2.21	100
500	-5.83	100
1,000	-11.85	100
1,500	-17.38	100
2,000	-19.49	100

4.3.2 การทดสอบเครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz

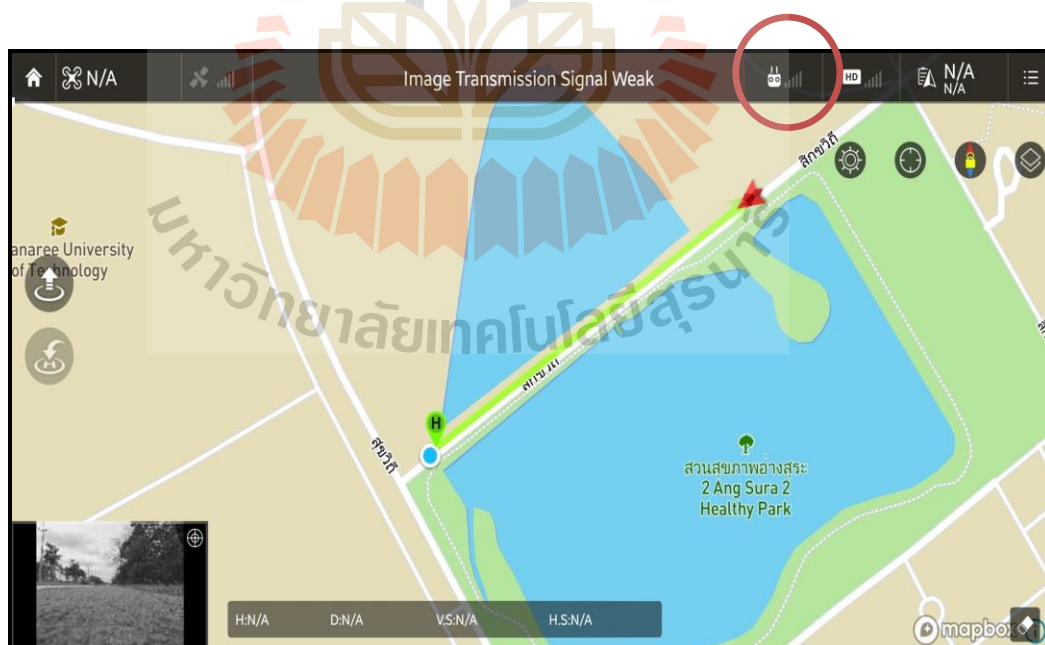
สำหรับการทดสอบเครื่องตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยทำการทดสอบกำลังงานที่ 190 วัตต์ โดยใช้จานพาราโบลาในการขยายสัญญาณมีอัตราขยายเท่ากับ 35 dB และทำการกำหนดระยะทางในการทดสอบ 100 เมตร 500 เมตร 1,000 เมตร 1,500 เมตร และ 2,000 เมตร ซึ่งการเตรียมการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.28 และระหว่างการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.33



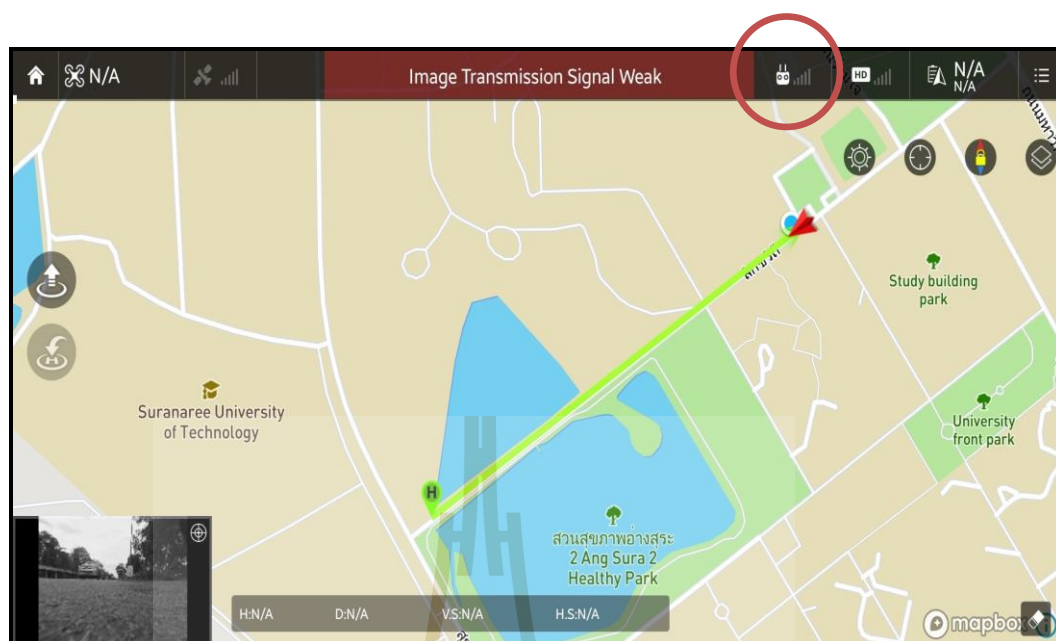
รูปที่ 4.30 การเตรียมการทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz



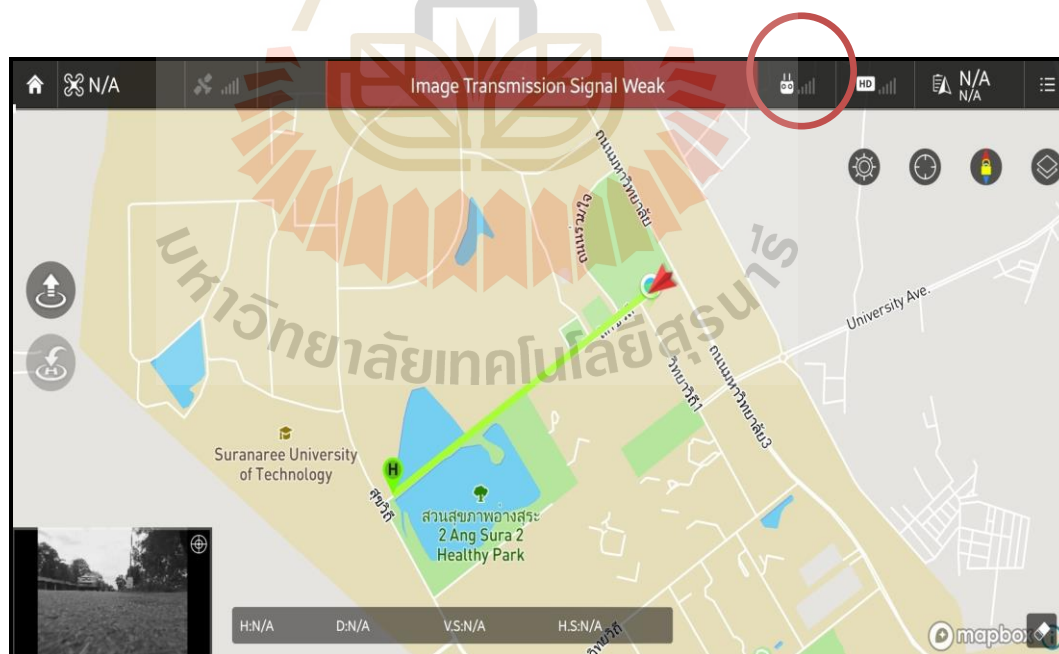
รูปที่ 4.31 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 100 เมตร



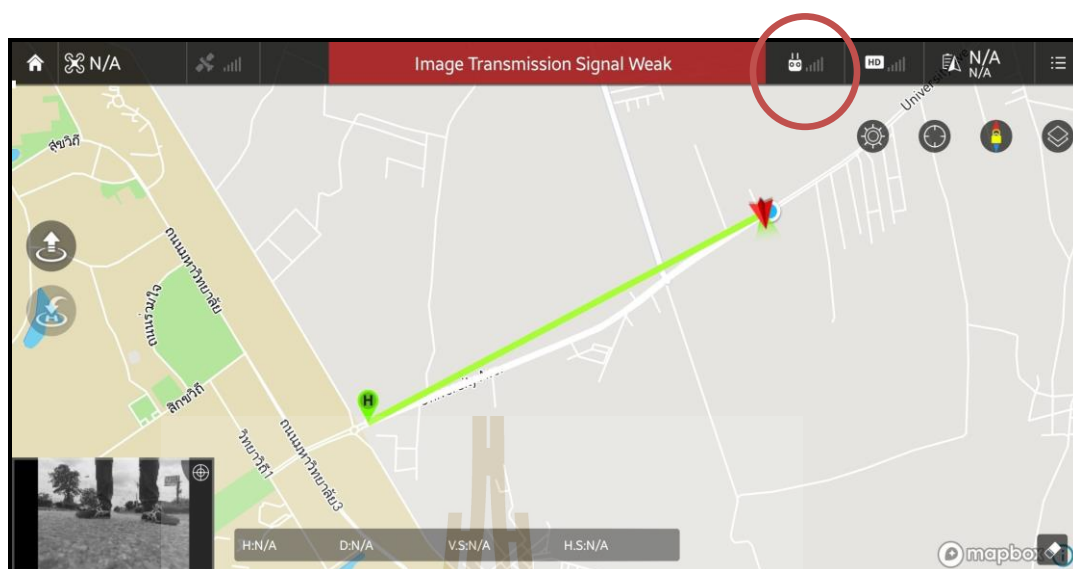
รูปที่ 4.32 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 500 เมตร



รูปที่ 4.33 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 1,000 เมตร



รูปที่ 4.34 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 1,500 เมตร



รูปที่ 4.35 การทดสอบระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 2,000 เมตร

จากผลการทดสอบพบว่าระบบตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูง
ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz ที่ระยะ 100 เมตร 500 เมตร 1,000 เมตร 1,500 เมตร และ 2,000
เมตร นั้นสามารถตัดสัญญาณควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่ากำลังเทียบกับระยะทาง ในระบบ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 GHz

ระยะทาง (เมตร)	กำลังที่วัดได้ (dBm)	ผลการทดสอบ (%)
100	4.71	100
500	-9.26	100
1,000	-15.18	100
1,500	-17.78	100
2,000	-21.14	90

4.4 สรุป

ทางผู้วิจัยได้สร้างเครื่องต้นแบบระบบตัดสัญญาณไร้คนขับกำลังสูง ที่ความถี่ 1.575 GHz ส่งกำลังงานเอาต์พุต 105 วัตต์ ที่ความถี่ 2.4 GHz ส่งกำลังงานเอาต์พุต 190 วัตต์ ทดสอบที่ระยะทาง 100 ถึง 2,000 เมตร สามารถป้องกันและตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับได้ทั้งการควบคุมด้วยตัวเองและการควบคุมแบบอัตโนมัติ ที่ระยะทาง 2 กิโลเมตร



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ และทดสอบอากาศยานไร้คนขับหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าโดรน ในปัจจุบันได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากแนวโน้มที่โดรนมีบทบาทสำหรับการใช้งานในประเทศมากขึ้นทุกวัน อาจนำไปใช้งานที่ผิดกฎหมายหรือในเขตห้ามบิน และในปัจจุบันระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับระยะไกลมีราคาแพงและค่อนข้างหาซื้อได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการได้ดำเนินการศึกษาวิจัยถึงการวิเคราะห์ระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับกำลังงานสูงที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตรที่สามารถตัดสัญญาณได้ทั้ง 2 ระบบคือ การควบคุมแบบอัตโนมัติที่ความถี่ 1.575 GHz ในย่าน GPS L1 และระบบการบินด้วยตนเองที่ความถี่ 2.4 GHz ในย่าน Wi-Fi ดังนั้นจึงได้สร้างเครื่องต้นแบบและทำการทดสอบ

ผู้วิจัยได้สร้างระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับในย่าน GPS และ Wi-Fi และได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบการทำงาน ทดสอบอัตราขยาย กำลังเอาต์พุต ผลการทดสอบพบว่า ได้กำลังงานเอาต์พุต 105 วัตต์ ที่ความถี่ 1.575 GHz และกำลังงานเอาต์พุต 190 วัตต์ ที่ความถี่ 2.4 GHz ในการทดสอบระบบตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับที่ความถี่ 1.575 GHz และ 2.4 GHz โดยใช้จานพาราโบลาที่มีขนาดรัศมี 1.8 เมตร มีอัตราการขยาย 35 dBm โดยทดสอบในแนวราบไม่มีสิ่งกีดขวาง สามารถตัดสัญญาณได้ที่ระยะทำการ 2 กิโลเมตร

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณกำลังสูงตัวด้านทานแล้วตัวเก็บประจุต้องทนกำลังสูง เพราะจะเกิดความร้อนอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ เพื่อให้วงจรทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุอุปกรณ์จะต้องทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงและตอบสนองที่ความถี่สูง เนื่องจากระบบตัดสัญญาณความถี่สูงนั้นมีกำลังสูงสามารถส่งสัญญาณเป็นระยะทางไกล อาจจะมีผลกระทบต่อการใช้งานหลายส่วนที่ใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ในการทดสอบภาคสนามนั้นต้องไม่มีผู้ใช้งานในความถี่เดียวกันอาจทำให้ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่นั้นได้ และในส่วนของตัวเครื่องตัดสัญญาณอากาศยานไร้คนขับและสายอากาศมีขายใหญ่ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

แนวทางการพัฒนาในอนาคตหากต้องการการตัดสินใจอากาศยานไร้คนขับให้ได้ไกลขึ้น สามารถเพิ่มกำลังส่งของวงจรขยายสัญญาณกำลังงานสูง เพื่อให้ได้ระยะทางที่ไกลขึ้น และทำงานร่วมกับระบบเรดาร์จะทำให้การเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นและยังสามารถประหยัดพลังงานในการตรวจจับได้



เอกสารอ้างอิง

- David Anthon, Sebastian Elbaum, Aaron Lorenz, Carrick Detweiler (2014) On crop height estimation with UAVs, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4805-4812.
- Bruno S. Faical, Gustavo Pessin, Geraldo P. R. Filho, André C. P. L. F. Carvalho, Gustavo Furquim, Jó Ueyama (2014) Fine-Tuning of UAV Control Rules for Spraying Pesticides on Crop Fields, IEEE 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, pp 527 - 533
- Bruno S. Faical, Jo Ueyama, Andre C. P. L. F. de Carvalho (2016) The Use of Autonomous UAVs to Improve Pesticide Application in Crop Fields, 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM), pp 32-33.
- Leila Hassan-Esfahani, Alfonso Torres-Rua, Andres M. Ticlavilca, Austin Jensen, Mac McKee (2014) Topsoil moisture estimation for precision agriculture using unmanned aerial vehicle multispectral imagery, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp 3263 - 3266.
- G.F.M.V. Souza, R.F. Miranda, F.S. Lobato, M.A.S. Barrozo, Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer, Applied Thermal Engineering, 2015, 38-44.
- 7-Eleven just made the first commercial delivery by drone, by Andrew Liptak@AndrewLiptak Jul 23, 2016.
- It's 2016. Where Are the Pizza Delivery Drones? by Leah Shaffer Sep 26, 2016.
- Food Delivery by Drone at Virginia Tech, By Carl Straumsheim, September 9, 2016
- Choi Myung Jin, Kim Tae Young, Lee Min Seob, Kim Min Jae "A Study on Near-real-time Geometric Correction System of Drones Image" International Conference on Information Networking (ICOIN) 2018
- Chien-Lun Lan, Gang-Len Chang "Empirical Observations and Formulations of Tri-Class Traffic Flow Properties for Design of Traffic Signals" IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 20, NO. 3, MARCH 2019

นาวาโทหญิง อารักษ์ พลเสน, บทความพิเศษ: รู้จักกับอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Sierra Pacific Innovations Corp. Anti Drone UAV Detection Defense Systems Michael Cooney. (2016, January 6). Not in my airspace: Airbus rolls out anti-drone system

Ling Fang, Xin Huai Wang, Hong Li Zhou, Ke Zhang, “Design of Portable Jammer for UAV Based on SDR” IEEE 2017

Thomas Multerer, Alexander Ganis, Ulrich Prechtel, Enric Miralles, Askold Meusling Jan Mietzner, Martin Vossiek, Mirko Loghi and Volker Ziegler “Low-cost Jamming System Against Small Drones Using a 3D MIMO Radar Based Tracking” IEEE 2017

C. Thongsopa, D. Srimoon, and P. Jarataku “A U-Shaped Cross Sectional Antenna on a U-Shaped Ground Plane with an Offset Parabolic Reflector for WLAN” IEEE 2007

Chanchai Thongsopa “Array of a U-Shaped Element on A U-Shaped Ground Plane Wideband Antenna” IEEE 2006



ภาคผนวก ก

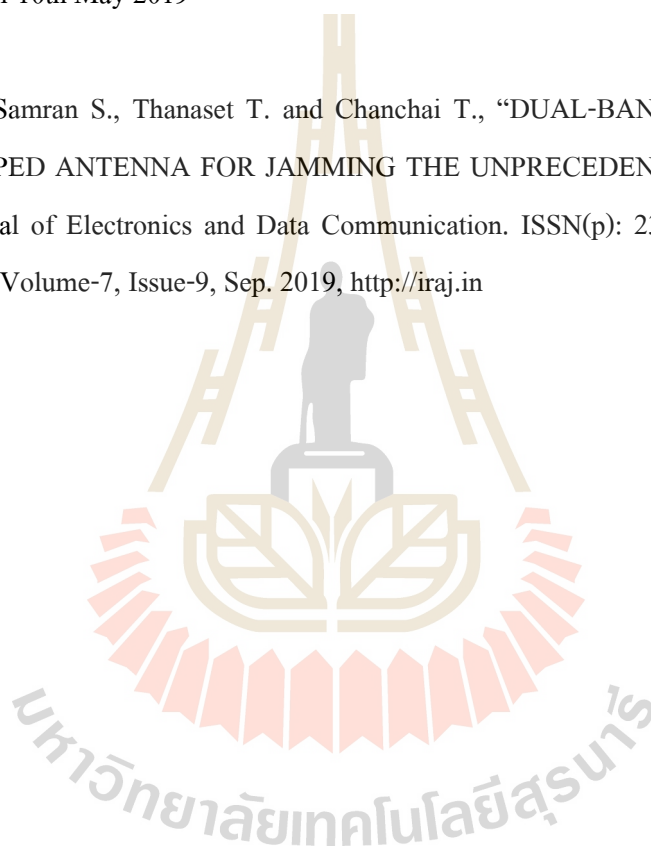
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Montree B., Samran S., Thanaset T. and Chanchai T., “Dual-Band and High gain U-Shaped Antenna for Jamming the Unprecedented UAV”, International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET) held in Amsterdam, Natherlands on 9th-10th May 2019

Montree B., Samran S., Thanaset T. and Chanchai T., “DUAL-BAND AND HIGH GAIN U-SHAPED ANTENNA FOR JAMMING THE UNPRECEDENTED UAV”, International Journal of Electronics and Data Communication. ISSN(p): 2320-2084. ISSN(p): 2321-2950 Volume-7, Issue-9, Sep. 2019, <http://iraj.in>



DUAL-BAND AND HIGH GAIN U-SHAPED ANTENNA FOR JAMMING THE UNPRECEDENTED UAV

¹MONTREEBUAPHUEAN, ²SAMRANSANTALUNAI, ³THANASETTOSDEEKORAPHAT,
⁴CHANCHAITHONGSOPA, ⁵NUCHANARTFHAHIEM

^{1,2,3,4}School of Electronic Engineering, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

⁵Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

E-mail: ¹montree.bua@gmail.com, ²samran.sa@sut.ac.th, ³nuchanart.fa@rmuti.ac.th

Abstract - This paper proposes the dual band wide beam and high gain antenna at frequencies of 1.540-1.575 GHz and 2.35-2.45 GHz for jamming the unprecedented Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The proposed antenna is composed of U-shaped antenna and U-shaped ground plane. The U-shaped is designed to increase the half power beam width and the antenna is etched to cover the bandwidth of applications. In addition, the U-shaped antenna is fed by using 50 ohms SMA connector that is fed through a hole in the ground plane.

Keywords—Dual Band, U-Shaped, UAV

I. INTRODUCTION

Nowadays, UAV or drones technology is an unnamed airborne vehicle that has enormously benefits the photo survey used in areal support information. Such information can vary from mapping management of agriculture and forestry landscape and earth surface alteration. As a result, environmental issues, impacts of natural disasters, and agricultural damage can potentially be evaluated much effectively. However, there are unprecedented users who take advantage of this technology in inappropriate fashions that include drug smuggling operation, unsolicited photography, or droning activities in violation of rule and privacy. The UAV is equipped with GPS, wireless transceivers and computational capabilities. With

increased popularity of the UAV and the continuous usage in variety of UAV applications [1-3], the unprecedented UAV also followed. Therefore, the principle of high frequency interference system can be jam to control the operation of unprecedented UAV. An antenna is considerable component that can increase the efficiency of jamming, necessitates the need to high gain, covering usage frequency and also wide beamwidth for jamming the unprecedented UAV. Nevertheless, there are presented numerous techniques particularly implementing ranges of the drone's frequencies. Researchers have offered multi-frequency dual band to control multiple communication systems using only

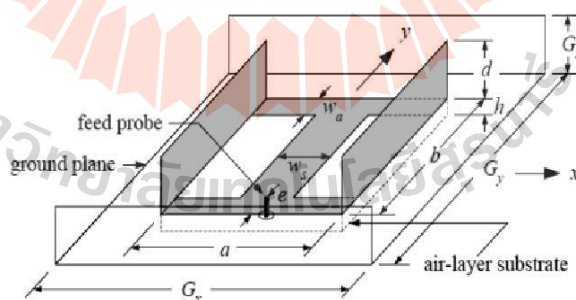


Figure 1. Geometry of the Dual-Band U-Shaped Cross Section Antenna on a U-Shaped Ground Plane

one signal [4-6]. To reduce the size of the equipment and reduce production costs, high gain and multi band [7-9], Dielectric resonator antenna [9-10], circularly polarized monopole antenna [10,14], the design of miniature circularly polarized antenna [15]. We have implemented technological use cases of the antenna

in WLAN application which enables antenna to perform interference to the 2.4 GHz frequency, the range that is normally used for an UAV controlled from the distance, and 1.5GHz frequency, the range that is normally used for navigation of automatic flight control. The U-shaped antenna discourages

uses of the drones in any unintended area or effectively within the desired radius since dual frequency operation of antenna is largely necessary in recent wireless communication system for mentioned systems like GPS and WLAN applications. Dual-Band U-Shaped Cross Section Antenna on a U-Shaped Ground Plane acts as the solution for the discussed issue.

This research develops a U-shaped antenna [15-18], with considerable and extensive efficiency that allows itself to work on dual frequencies simultaneously, for dual band antenna that can function in the frequency ranges within Wireless Local Area Network (WLAN, 2.39-2.41GHz), and Global Positioning System (GPS, 1.515-1.605GHz).

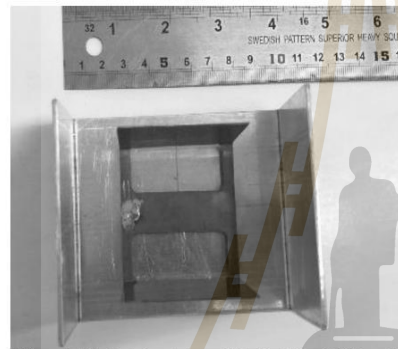


Figure 2: Fabricated prototype of the Dual-Band U-Shaped Cross Section Antenna on a U-Shaped Ground Plane

Parameter	Dimensions(mm)
a	52
b	60
d	39
G_x	90
G_y	80
G_z	45
h	3
W_a	4
W_s	14

TABLE I. TABLE TYPE STYL PARAMETERS OF THE DUAL-BAND U-SHAPED CROSS SECTION ANTENNA ON A U-SHAPED GROUND PLANE ES

The materials used to assemble can be easily found from the local market and are inexpensive. As a result, the cost of making the antenna is highly affordable. The measured bandwidth of the return loss is 100 MHz (VSWR<2:1) at 2.4 GHz between the frequency range of 2.39 - 2.41 GHz and 90 MHz (VSWR<2:1) at 1.575 GHz between the frequency range of 1.515 - 1.605 GHz.

II. DUAL-BAND ANTENNA DESCRIPTION

The depiction of proposed dual band U-shaped cross section antenna on a u-shaped ground plane is developed from the previous paper [15-18] that the geometry of the proposed antenna is shown in Figure 1. The antenna is divided into two parts. The first primary section operating as a radiator and electromagnetic wave sender has a thickness of 0.5 mm and is etched into the shape consisting of central and side strips as shown below. The central strip of the etched copper has the width of w_s and the strips on both top and bottom ends have the width of w_a . The length of this part is a , the width of b , and the height of d . The copper element also contains a hole at point e where connected with 50 SMA connector makes a way through

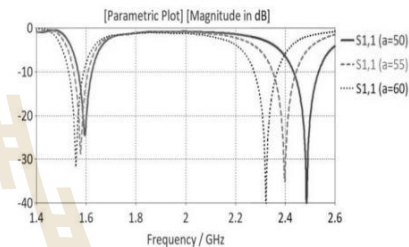


Figure 3: Simulated S11 of the U-shaped antenna with reflector plane when length (a) of U-shaped antenna is varied.

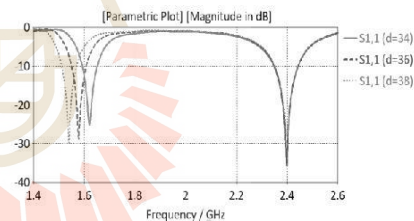


Figure 4: Simulated S11 of the U-shaped antenna with reflector plane when length (d) of U-shaped antenna is varied.

the ground plane and to the ground. The secondary section is consisted of U-shape folded reflector ground plane which is made from aluminum and it has the length of G_x , width of G_y , and height of G_z . The ground plane section has the thickness of 2 mm. Consideration to Figure 2, the fabricated prototype of the Dual-Band U-Shaped Cross Section Antenna on a U-Shaped Ground Plane is shown. The total size of the dual band antenna is $90 \times 80 \text{ mm}^2$.

III. SIMULATED AND MEASURED RESULTS

The analysis is carried out by utilizing Finite-Difference Time-Domain methodology (FDTD). Given the fact that dimension of sizes and shapes of the antenna affect different frequency outcomes considerably, the antenna designs have

been tested and simulated numerous times in order to achieve the most desirable shape. By varying parameters as needed in CST Studio Suite software, the result shows favorable size of the antenna that yield operational 1.575 GHz and 2.4 GHz frequency ranges as illustrated in Table 1.

To illustrate physical alteration in accordance to the S11 value parameters of the antenna, we have displayed the change in size of some parameters that reflects the change in S11 value. From figures 3 to figure 5, the S11 value is adjusted to resonance frequency at 1.575 GHz and 2.4 GHz. When changing parameters of a, d, G_y , other parameter value remains the same as shown on Table 1.

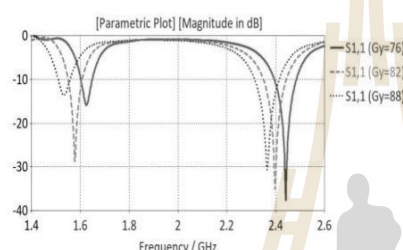


Figure 5: Simulated S11 of the proposed antenna when height (G_y) of reflector ground plane is varied.

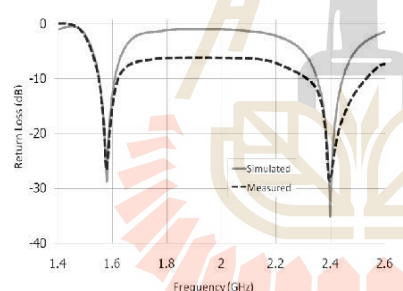


Figure 6: Simulated and measured results of S11

Figure 3 is shown the modified parameters when varied the parameter a, the frequency bands move to the left at the frequency 1.575GHz and the S11 value is gradually increased. Considering to S11 at 2.4 GHz, the frequency band move to the left saw until getting the appropriate value when a is 55 mm, it get the most suitable frequency at the resonant frequency at 1.575 GHz and 2.4 GHz. The S11 of both frequencies is higher than -25 dB.

In addition, figure 4 is plotted to modify the length of the U shaped antenna which is parameter d. When the parameter d is 34 mm, the frequency band at 1.575 GHz moves to the left and the S11 value is increased, while the 2.4 GHz frequency is fixed. Moreover, the appropriate parameters of two frequencies are d is 36 mm and the S11 of both frequencies is higher than -25 dB. The change in the U-shaped ground plane

affects the resonance of the two frequencies at 1.575 GHz and 2.4 GHz is illustrated in figure 5. The parameters G_y is the length of the U-shaped ground plane, it is adjusted from 76 mm to 88 mm. From the results found that when adjusting parameters G_y increases the 2.4 GHz frequency band moves to the left. And the S11 value will decrease continuously. Considering the frequency of 1.575 GHz, the band will move to the left but the S11 values fluctuate from the parameter adjustment. The most suitable G_y is 82 mm at the both resonant frequency.

From figure 6, the simulated and measured S11 of the proposed antenna are done using an HP 87220 Network

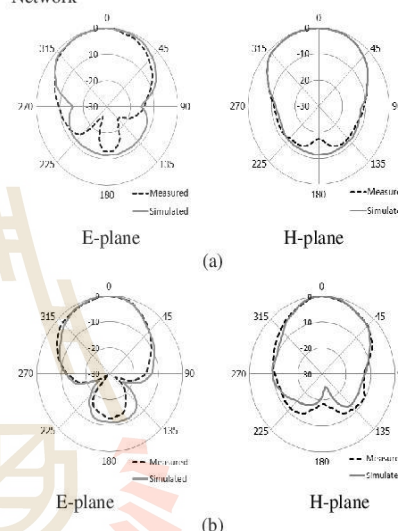


Figure 7: Simulated and measured results of radiation pattern when (a) 1.575 GHz and (b) 2.4 GHz.

Analyzer (50 MHz - 40 GHz). For the dual-band U-shaped cross section antenna on a U-Shaped Ground Plane for jamming the unprecedented UAV applications, the measured bandwidth of the return loss is 100 MHz (VSWR<2:1) at 2.4 GHz between the frequency range of 2.39 - 2.41 GHz and 90 MHz (VSWR<2:1) at 1.575 GHz between the frequency range of 1.515 - 1.605 GHz. The substantial explanation of different results from the simulated and measured tests can be further clarified by using 50 ohms SMA connector whereas the program typically tests with much greater precision and accuracy. The far-field radiation patterns are simulated and measured for the Dual-band antennas at 1.575 GHz and 2.4GHz, plotted in Figure 7. The simulated E-plane (xz-plane) and H-plane (yz-plane) patterns of Dual-band U-shaped cross section antenna on a U-shaped ground plane are measured using HP 8722D Network Analyzer. It is found that the front-to-back ratios are greater than 15 dB for all

considered frequencies. The half power beamwidth in the E plane are 70° and 90° the H plane at frequencies of 1.575 and 2.4GHz the E plane are 50° and 72° the H with directional radiation patterns. The antenna gain 7.5 dBi at 1.575 GHz and 9 dBi at 2.4 GHz.

IV. CONCLUSION

The objectives of this paper are designed and fabricated the Dual-band U-shaped cross section antenna on a U-shaped ground plane for jamming the unprecedented UAV applications. From the results, we found that the antenna has the measured bandwidth of 90, 100 MHz frequency at 1.575 and 2.4 GHz ($VSWR < 2:1$). The HPBW are 70° for E plane and 90° for H plane at the frequencies of 1.575 and 2.4GHz the E plane are 50° and 72° the H with directional radiation patterns, respectively, while antenna gains are 7.5 dBi at 1.575 GHz and 9 dBi at 2.4 GHz.

Front-to-back ratios are greater than 15 dB across the band with the U-shaped cross-sectional ground plane of 90 mm × 80 mm. and thickness is 45 mm. The advantages of this antenna are dual-band, wide beamwidth, high gain, easily to fabricate, and low-cost. The antenna is suitable for using as a jamming system to jamming the unprecedented UAV.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Research Department Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] H. Sedjelmaci, S. M. Senouci, and N. Ansari, "Intrusion Detection and Ejection Framework against Lethal Attacks in UAV-Aided Networks: A Bayesian Game-Theoretic Methodology," *IEEE Trans. Intell. Transport. Sys.*, vol. 18, no. 5, May 2017, pp. 1143–53.
- [2] H. Sedjelmaci, S. M. Senouci, and N. Ansari, "Intrusion Detection and Ejection Framework against Lethal Attacks in UAV-Aided Networks: A Bayesian Game-Theoretic Methodology," *IEEE Trans. Intell. Transport. Sys.*, vol. 18, no. 5, May 2017, pp. 1143–53.
- [3] J. Su et al. "A Stealthy GPS Spoofing Strategy for Manipulating the Trajectory of an Unmanned Aerial Vehicle." *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 22, 2016, pp. 291–96
- [4] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Wearable dual-band composite right/left-handed waveguide textile antenna for WLAN applications," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 6, pp. 424–426, Mar. 2014
- [5] S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Compact all-textile dual-band antenna loaded with metamaterial inspired structure," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 1486–1489, 2015.
- [6] Wang, S. Fang, S. Fu, and S. Lü, "Dual-band probe-fed stacked patch antenna for GNSS applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 100–103, 2009.
- [7] S.-Y. Suh et al., "A novel low-profile, dual-polarization, multi-band base-station antenna element - the fourpoint antenna," in *Proc. IEEE 60th Veh. Technol. Conf.*, 2004, pp. 225–229.
- [8] H. Jin, K. S. Chin, W. Che, C. C. Chang, H. J. Li, and Q. Xue, "Differential-fed patch antenna arrays with low cross polarization and wide bandwidth," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 1069–1072, Jun. 2014.
- [9] Fujimoto, T.; Yoshitake, Y. Stacked microstrip antenna fed by an L-probe for quadruple band operation. *IET Microw. Antennas Propag.* 2014, 9, 360–368.
- [10] M. Abedian, S.K.A. Rahim, Sh. Danesh, S. Hakimi, L.Y. Cheong, and M. H. Jamshuddin "Novel Design of Compact UWBD ielectric Resonator Antenna With Dual-Band-Rejection Characteristics for WiMAX/WLAN Bands" *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL.14, 2015, pp. 45-248
- [11] Liu, Y.; Hao, Y.; Wang, H.; Li, K.; Gong, S. Low RCS Microstrip Patch Antenna Using Frequency Selective Surface and Microstrip Resonator. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 14, 1290–1293
- [12] P. Beigi J. Nourinia .B. Mohammadi and A. Valizade, "Bandwidth Enhancement of Small Square Monopole Antenna with Dual Band Notch Characteristics Using U-Shaped Slot and Butterfly Shape Parasitic Element on Backplane for UWB Applications," *ACES JOURNAL*, Vol. 30, No. 1, JANUARY 2015, pp. 78–84
- [13] K. Seol, J. Jung, and J. Choi, "Multi-band monopole antenna with inverted U-shaped parasitic plane," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 15, p. 844, 2006.
- [14] M. Mehranpour, H. Boudaghi, M. Ghiamy, and J. Nourinia, "A very compact monopole antenna with variable frequency band notch for ultra-wideband applications," In *6th International Symposium on Telecommunications (IST'2012)*, pp. 7–10, 2012
- [15] Shi, J.; Wu, X.; Chen Z. N.; Qing, X.; Lin, L.; Chen, J.; Bao, Z.H. A Compact Differential Filtering Quasi-Yagi Antenna with High Frequency Selectivity and Low Cross Polarization Levels. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 14, 1573–1576.
- [16] T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa, P. Jaratoku and S. Santalumai "The Optimization of U-shaped Cross Section Antenna with a Strip on a U-shaped Ground Plane for WLAN Application" *IJIE* Vol. 3, Dec 2013, PP. 113-121
- [17] C. Thongsopa, D. Srimoon, and P. Jaratoku "A U-Shaped Cross Sectional Antenna on a U-Shaped Ground Plane with an Offset Parabolic Reflector for WLAN" *IEEE* 2007
- [18] Srimoon "Broadband Dipole on a U-Shaped Cross-Sectional Ground Plane Antenna" *IEEE* 2008

ประวัติผู้วิจัย

นายมนตรี บัวเดือน เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 ที่ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 194 หมู่ 3 ตำบลไกรกลาง อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุโขทัย 64170 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนกมลไกรลาศวิทยา จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพสาขาอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาโทรคมนาคม จากวิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าร่วมทำงานกับบริษัท ริโก้ประเทศไทย จำกัด เป็นเวลา 7 ปี และเมื่อปี พ.ศ. 2560 ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ 1 ฉบับงานชื่อ International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET) held in Amsterdam, Natherlands on 9th-10th May 2019 ในหัวข้อ “Dual-Band and High gain U-Shaped Antenna for Jamming the Unprecedented UAV” งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุน OROG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี