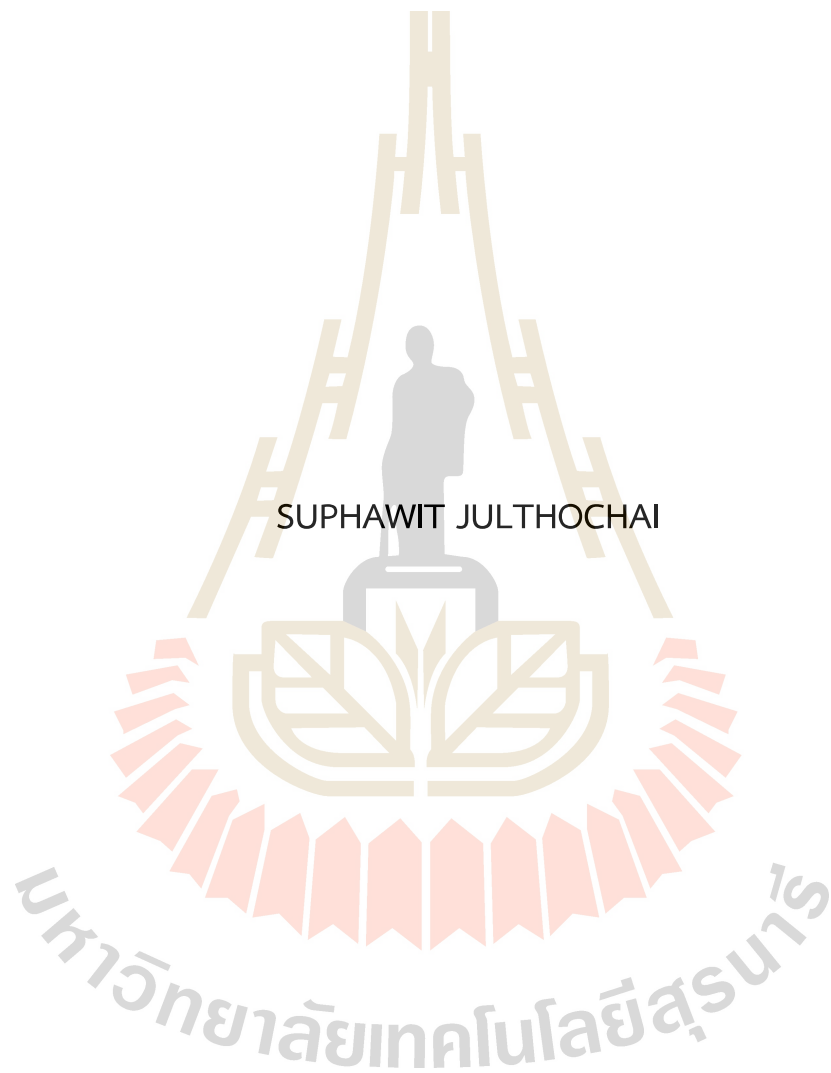


การศึกษาและออกแบบแถวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก  
สำหรับย่านความถี่กลาง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2566

STUDY AND DESIGN OF A SMALL LOOP ANTENNA ARRAY  
FOR MEDIUM FREQUENCY



SUPHAWIT JULTHOCHAI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Telecommunication and Computer Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2023

การศึกษาและออกแบบแถวลำดับสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก

สำหรับย่านความถี่กลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ.ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

ประธานกรรมการ



(รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ.ดร.อภิญญา ดีคำคำ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภวิชญ์ จุลโทชัย : การศึกษาและออกแบบแถวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับ  
ย่านความถี่กลาง (STUDY AND DESIGN OF A SMALL LOOP ANTENNA ARRAY FOR  
MEDIUM FREQUENCY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรคร์, 72 หน้า.

คำสำคัญ : สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก, จัดแถวลำดับ, ย่านความถี่กลาง

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และมีการนำมาใช้งานกันวงกว้าง ซึ่งที่ผ่านมาการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็วด้วยรูปแบบการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญช่วยอำนวยความสะดวกการสื่อสารได้อย่างมาก รวมไปถึงการนำระบบสื่อสารแบบไร้สายไปใช้งานภายในถ้ำนั้นก็เป็นสิ่งสำคัญต่อการปฏิบัติงานเช่นเดียวกัน เช่น การค้นหา การกู้ภัย หรือการช่วยเหลือผู้ประสบภัย ซึ่งปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องมือสื่อสารที่จะนำไปใช้งานภายในถ้ำจะใช้ที่ย่านความถี่สูง เมื่อนำไปใช้งานภายในถ้ำจะส่งผลให้สื่อสารได้ในระยะทางที่สั้นเนื่องจากเกิดคลื่นสะท้อน แต่ในช่วงย่านความถี่ต่ำเมื่อคลื่นเดินทางเข้าไปในถ้ำแล้วเจอผนังถ้ำ คลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) ไปตามผนังต่อได้และที่สำคัญที่สุดก็คือมีค่าความลึกผิว (Skin depth) ที่สูงกว่า คลื่นสามารถเดินทางแทรกเข้าไปในพื้นที่ผนังได้มากเมื่อผนังถ้ำมีความนำสูง อย่างไรก็ตาม การออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่มีความถี่ต่ำนั้นทำให้สายอากาศแบบบ่วงมีขนาดใหญ่มาก จึงทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานภายในถ้ำได้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับใช้งานที่ย่านความถี่กลางที่ความถี่ 350 kHz สำหรับนำไปใช้งานรับคลื่นจากพื้นดิน โดยนำมาจัดแถวลำดับ (Array) และเพิ่มจำนวนสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ 2 อีลิเมนต์และ 4 อีลิเมนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก และหาลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสม ใช้เครื่องกำเนิดต่อเข้ากับสายอากาศดินเป็นภาคส่งอยู่บนถ้ำและสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเป็นภาครับ มีระยะห่างภาคส่งและภาครับเท่ากับ 12.5 เมตร ที่มีกำลังส่งเท่ากับ 38.31 dBm พบว่าจัดรูปการวางแนวตั้งจะทำให้ค่ากำลังของสัญญาณสูงขึ้น การจัดวางที่เหมาะสมคือ สายอากาศแบบบ่วงจัดแถวลำดับแบบ 4x1 มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -33.1 dB ซึ่งเปรียบเทียบกับจัดรูปการวางแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -52.9 dB มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับเพิ่มขึ้น 19.8 dB

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



SUPHAWIT JULTHOCHAI : STUDY AND DESIGN OF A SMALL LOOP ANTENNA  
ARRAY FOR MEDIUM FREQUENCY.

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. RANGSAN WONGSAN, D.Eng., 72 PP.

Keyword : Small loop antenna, Array, Medium frequency band

Currently, wireless communication systems play a crucial role in human life and are widely used, with rapid development and expansion in the past. The wireless communication technology has evolved quickly, adopting different usage patterns and capabilities. Therefore, wireless communication is seen as a significant factor that greatly facilitates communication, including its applications within caves, such as search and rescue operations and assistance to disaster victims. In cave environments, communication devices often operate in high-frequency ranges, resulting in shorter communication distances due to wave reflection. However, in the low-frequency range, when waves encounter cave walls, diffraction occurs, allowing them to propagate along the walls. The most crucial aspect is the skin depth of low-frequency waves, which enables them to penetrate the cave wall if it has high conductivity.

Hence, this thesis investigates the enhancement of the efficiency of small loop antennas for mid-frequency range operations, specifically at the operational frequency of 350 kHz for ground wave reception within caves. The study involves arranging the antennas in an array and increasing the number of small loop antennas, such as 1 element, 2 elements, and 4 elements, to improve the performance. The research identifies the suitable placement and configuration of these antennas and determines that a vertically arranged array of 4 elements, Type E, yields a signal power reception of -33.1 dB. This is compared to a vertically arranged 1-element configuration, which has a signal power reception of -52.9 dB, indicating an approximate increase in signal power reception by 19.8 dB.

School of Telecommunication Engineering  
Academic Year 2023

Student's Signature .....  
Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาต่างๆ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิญา ตีคำยคำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้คำชี้แนะและคำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในด้านต่างๆ ด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณคำแนะนำและกำลังใจที่ดีจาก อ.ดร.พีรสิทธิ์ คำสาลี คุณอรรรถวิห จันทอุปสี และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในต่างๆ ของการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมาตลอด

คุณบรรพต จุลโทชัย คุณบุญมี จุลโทชัย คุณวัชรภรณ์ พร้อมภรรยา ดร.ศุภกานต์ จุลโทชัย ดร.พรปวีณ์ จุลโทชัย ซึ่งเป็นบิดา มารดา ภรรยา และบุตรสาว ของผู้วิจัยและเป็นกำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งญาติพี่น้องเพื่อนสนิทมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์โดยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดา ภรรยา บุตรสาว และญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์สำเร็จการณศึกษาไปได้ด้วยดี

ศุภวิชญ์ จุลโทชัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ

## บทที่

<b>1</b> บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	2
1.6.2 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.6.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2</b> ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 การแพร่กระจายของคลื่นดิน (Ground wave propagation).....	4
2.2.2 การสื่อสารผ่านพื้นดิน (Through-the-Earth หรือ TTE).....	6
2.2.3 สายอากาศแบบบ่วง (Loop antenna).....	8
2.2.4 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna array).....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna array).....	14
2.2.5 การศึกษาการแพร่คลื่นในถ้ำหลวงเชียงดาวและถ้ำปาฎิหาริย์.....	15
2.3 สรุป .....	17
<b>3 การออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก .....</b>	<b>18</b>
3.1 บทนำ .....	18
3.2 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก.....	18
3.3 การจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019.....	19
3.4 การจำลองสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ .....	21
3.4.1 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวงแหวนอ่อน .....	21
3.4.2 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวงแหวนแข็ง .....	22
3.5 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ .....	23
3.5.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ .....	23
3.6 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ .....	24
3.6.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ .....	24
3.7 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ .....	25
3.7.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ .....	25
3.8 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ .....	26
3.8.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ .....	26
3.9 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์.....	27
3.9.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ .....	27
3.10 ผลการทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก.....	29
3.11 สรุป .....	30
<b>4 การสร้างและวัดทดสอบ .....</b>	<b>32</b>
4.1 บทนำ .....	32

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การสร้างสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็ก.....	33
4.3	การทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวนอน.....	33
4.3.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	33
4.4	การทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวตั้ง .....	34
4.4.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	34
4.5	การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์.....	35
4.5.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	35
4.6	การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์.....	36
4.6.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	36
4.7	การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์.....	37
4.7.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	37
4.8	การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์.....	38
4.8.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	38
4.9	การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์.....	39
4.9.1	ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) .....	39
4.10	การทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กในถ้ำ .....	40
4.10.1	การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นความถี่คลื่นดินภายในถ้ำ.....	40
4.10.2	การเปรียบเทียบผลการวัดกำลังของสัญญาณที่ได้รับ .....	45
4.11	การทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศเมื่อวางอยู่บนพื้นดิน .....	46
4.11.1	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์.....	46
4.11.2	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์.....	48
4.11.3	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์.....	50
4.11.4	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์.....	52

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.11.5 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแฉลัดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ .....	54
4.11.6 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแฉลัดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ .....	56
4.12 สรุป .....	58
<b>5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>59</b>
5.1 สรุป.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	61
เอกสารอ้างอิง .....	62
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	64
รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	65
ประวัติผู้เขียน.....	72



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก ..... 29
4.1	ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์..... 42
4.2	ผลการทดสอบการจัดแวลลำดับ 2 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก ..... 43
4.3	ผลการทดสอบการจัดแวลลำดับ 4 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก ..... 44
4.4	การเปรียบเทียบผลการวัดกำลังของสัญญาณที่ได้รับ ..... 45
4.5	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์..... 47
4.6	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแวลลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์.. 49
4.7	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแวลลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์.. 51
4.8	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแวลลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์.. 53
4.9	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแวลลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์.. 55
4.10	ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแวลลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์.. 57



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การแพร่กระจายของคลื่นดิน .....	5
2.2	การแสดงผลของระบบสื่อสารผ่านพื้นดิน Through-the-Earth.....	7
2.3	การทดสอบใช้งานระบบวิทยุสื่อสาร Heyphone ใช้งานในถ้ำ .....	8
2.4	สายอากาศแบบบ่วง .....	9
2.5	การแจกแจงของกระแสตลอดความยาวเพิ่มความยาวคลื่น .....	9
2.6	กระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงวงกลม .....	10
2.7	สายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยม .....	10
2.8 (ก)	แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงเต็มคลื่น .....	11
2.8 (ข)	การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามไฟฟ้า .....	11
2.9 (ก)	แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงเต็มคลื่น .....	11
2.9 (ข)	การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบแม่เหล็ก .....	11
2.10 (ก)	แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบบ่วงของสายอากาศแบบบ่วงเต็มคลื่น .....	12
2.10 (ข)	การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบบ่วง .....	12
2.11	ขั้วคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้าในทิศทางของแกน X.....	12
2.12	กระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก .....	13
2.13	สายอากาศแบบบ่วงหลายรอบ .....	14
2.14	การจัดแถวลำดับเชิงเส้นและการพล็อตรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบบ่วงวงกลม .....	15
2.15	การจัดแถวลำดับแบบวงกลมและการพล็อตรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบบ่วงวงกลม .....	15
3.1	โครงสร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก .....	19
3.2	สายอากาศต้นแบบแบบบ่วง .....	20
3.3	ผลการจำลองสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวนอน 1 อีลิเมนต์ .....	21
3.4	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวนอน 1 อีลิเมนต์ ...	22
3.5	ผลการจำลองสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ .....	22
3.6	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ .....	23

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวง 1x2 อีลิเมนต์..... 23
3.8	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวง 1x2 อีลิเมนต์ ..... 24
3.9	ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์..... 24
3.10	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ... 25
3.11	ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์..... 25
3.12	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ ... 26
3.13	ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์..... 26
3.14	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ... 27
3.15	ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบแบบปวงจำนวน 4 อีลิเมนต์..... 27
3.16	แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ... 28
4.1	สายอากาศต้นแบบแบบปวงขนาดเล็ก..... 32
4.2	สายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแหวน ..... 33
4.3	เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A..... 33
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 34
4.5	สายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแหวนตั้ง..... 34
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 35
4.7	สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ ..... 35
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 36
4.9	สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ..... 37
4.10	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 37
4.11	สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ ..... 37
4.12	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 38
4.13	สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ..... 39
4.14	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 39
4.15	สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ..... 39
4.16	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ..... 40

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	การวัดทดสอบการแพร่คลื่นความถี่ 350 kHz ผ่านพื้นโลก (TTE) ที่ถ้าพระโพธิสัตว์ สระบุรี..... 40
4.18	แสดงเส้นทางและตำแหน่งพิกัดของโพรงถ้าพระโพธิสัตว์จากมุมมองด้านบนภูเขา..... 40
4.19	การจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วง 1 อีลิเมนต์ ..... 41
4.20	การจัดแถวลำดับ 2 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก ..... 42
4.21	การจัดแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก ..... 43
4.22	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ ..... 46
4.23	แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ ..... 46
4.24	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์..... 48
4.25	แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์..... 49
4.26	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ..... 50
4.27	แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ..... 50
4.28	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ ..... 52
4.29	แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ ..... 52
4.30	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ..... 54
4.31	แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ..... 54
4.32	แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ..... 56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และมีการนำมาใช้งานกันในวงกว้าง ซึ่งที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยรูปแบบการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญช่วยอำนวยความสะดวกการสื่อสารได้อย่างมาก รวมถึงถึงการนำระบบสื่อสารแบบไร้สายไปใช้งานภายในถ้ำนั้นก็เป็นสิ่งสำคัญต่อการปฏิบัติงานเช่นเดียวกัน เช่น การค้นหา การกู้ภัย หรือการช่วยเหลือผู้ประสบภัย

อุปกรณ์เครื่องมือสื่อสารที่ใช้งานย่านความถี่สูง เมื่อนำไปใช้งานภายในถ้ำจะส่งผลให้สื่อสารได้ในระยะทางที่สั้นเนื่องจากคลื่นเกิดการสะท้อน แต่ในช่วงย่านความถี่ต่ำเมื่อคลื่นที่เดินทางเข้าไปในถ้ำแล้วเจอผนังถ้ำ คลื่นจะเกิดการเลี้ยวเบนไปตามผนังต่อได้ ที่สำคัญที่สุดก็คือมีค่าความลึกผิวของคลื่นย่านความถี่ต่ำ คลื่นสามารถเดินทางแทรกเข้าไปในพื้นที่ผิวผนังได้มากถ้าผนังถ้ำมีค่าความนำสูง สายอากาศแบบบ่วงเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่เหมาะในช่วงความถี่ต่ำ แต่ปัญหาในการออกแบบก็คือขนาดของสายอากาศแบบบ่วงนั้นจะต้องออกแบบโดยใช้หนึ่งความยาวคลื่นของความถี่ที่จะนำไปใช้งาน เมื่อนำสายอากาศแบบบ่วงมาใช้ภายในถ้ำความถี่ต่ำสายอากาศแบบบ่วงจะมีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่ยาวมากจึงทำให้ยากต่อการนำเข้าไปใช้งานภายในถ้ำได้ จึงนิยมออกแบบสายอากาศแบบบ่วงให้เป็นสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเพื่อลดขนาดของสายอากาศ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งการจัดแถวลำดับของสายอากาศก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ไม่ซับซ้อนและนิยมนำมาเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศได้ โดยใช้สายอากาศที่เหมือนกันมาจัดแถวลำดับในรูปแบบและมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์ที่เหมาะสม

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับใช้งานที่ย่านความถี่ปฏิบัติการ 350 kHz สำหรับนำไปใช้งานรับคลื่นจากพื้นถ้ำ โดยนำมาจัดแถวลำดับจำนวน 4 อีลิเมนต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก และหาลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้รับและส่งสัญญาณภายในถ้ำได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับย่านความถี่กลาง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการจัดรูปแบบของสายอากาศแบบบ่วงย่านความถี่กลาง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก
- 1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio 2019
- 1.2.5 เพื่อนำผลการจัดวางเรียงแถวลำดับประยุกต์ใช้งานภายในถ้ำ

## 1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น

- 1.3.1 การวัดแถวลำดับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณได้
- 1.3.2 สามารถใช้สายอากาศแบบบ่วงเป็นสายอากาศภาครับได้

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ใช้สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาจัดแถวลำดับของสายอากาศ 2 อีลิเมนต์ และ 4 อีลิเมนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศและเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศแบบบ่วง
- 1.4.2 ออกแบบและทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก และศึกษารูปแบบการวางตัวของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปทดสอบในถ้ำ เพื่อนำไปใช้งานในถ้ำ

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับย่านความถี่กลาง
- 1.5.2 ศึกษาารูปแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่เหมาะสมและตรงกับความต้องการด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2019
- 1.5.3 ศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก
- 1.5.4 สร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กแบบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดและการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2019

## 1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. สำรวจบริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับย่านความถี่กลาง



3. ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมและทำการดูพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
4. ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของสายอากาศ
5. สร้างสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็กแบบเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดและการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2019

#### 1.6.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยวิศวกรรมโทรคมนาคม อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 11 (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### 1.6.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. โปรแกรม CST Microwave Studio 2019
3. เครื่อง Signal Generator
4. เครื่อง Vector Network Analyzer
5. เครื่องวัด LCR ยี่ห้อ B&K Precision 894

#### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 มีสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก
- 1.7.2 มีความรู้การใช้งานโปรแกรม CST Microwave Studio 2019
- 1.7.3 สามารถติดตั้งสายอากาศได้ในพื้นที่จำกัดขนาดเล็ก

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

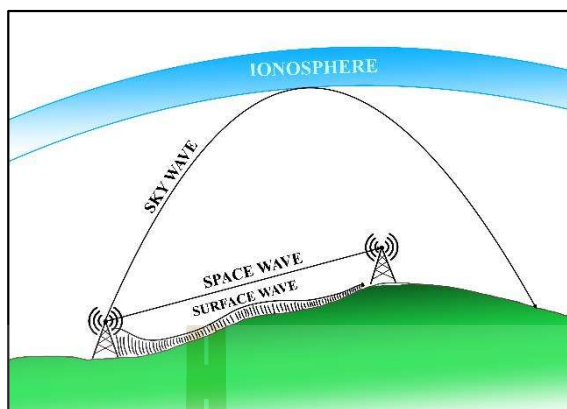
#### 2.1 บทนำ

สายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบบ่วงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้สูงขึ้น ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและการประยุกต์ใช้งาน ด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือการสร้างสายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบบ่วงสำหรับความถี่ 350 kHz และด้วยสมมุติฐานของงานวิจัย ดังนั้นทางผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบบ่วงความถี่ 350 kHz ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่นๆ ทั้งในและต่างประเทศเพื่อนำผลการสืบค้นที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

#### 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.2.1 การแพร่กระจายของคลื่นดิน (Ground wave propagation)

การแพร่กระจายของคลื่นดิน เป็นการศึกษาปรากฏการณ์ของคลื่นที่แพร่กระจายไปรอบๆ บนพื้นผิวของโลกที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะแบบตัวกลางเดียว (Homogenous media) และคลื่นส่วนหนึ่งสามารถแพร่กระจายไปในชั้นบรรยากาศและเกิดผลกระทบในระบบการสื่อสารต่างๆ มากมาย แสดงดังรูปที่ 2.1 ส่วนใหญ่ความถี่ที่ใช้งานที่มีการแพร่กระจายของคลื่นดินอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3kHz ถึง 30MHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ต่ำมาก (Very low frequency) ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency) และย่านความถี่ปานกลาง (Medium frequency) โดยทั่วไปถูกนำไปใช้งานสำหรับการกระจายเสียงคลื่นวิทยุและการสื่อสารในการนำร่องการเดินทางที่มีกำลังส่งสูงๆ เนื่องจากคลื่นในย่านความถี่ดังกล่าวมีผลกระทบต่อพื้นดินที่ทำให้เกิดการสูญเสียนั่นเอง



รูปที่ 2.1 การแพร่กระจายของคลื่นดิน [2]

### 2.2.1.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคลื่น

การแพร่กระจายของคลื่นดินเป็นการแพร่กระจายไปตามพื้นผิวโลก ซึ่งส่วนใหญ่เครื่องส่งจะใช้สายอากาศแนวตั้งแบบโมนโพล (Vertical monopole antenna) เนื่องจากจะอาศัยผิวโลกเป็นตัวกลางในการสื่อสาร ดังนั้นขั้วคลื่นของสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับพื้นผิวโลกและแผ่กระจายไปตามส่วนโค้งของโลกได้ในระยะทางไกลๆ แต่เนื่องจากผิวโลกมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยพื้นดิน ต้นไม้ หิน แม่น้ำ เป็นต้น ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์ที่ต่างกันส่งผลให้การแพร่กระจายบนตัวกลางต่างๆ เหล่านี้มีการลดทอนที่ต่างกันด้วย ฉะนั้นการศึกษาปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นดิน มีดังนี้

ก) การดูดกลืนของพื้นดิน (Ground absorption) เป็นผลจากการที่พื้นดินมีความสัมพันธ์ที่มีสภาพเป็นตัวต้านทานหรือมีค่าความนำเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้คลื่นส่วนหนึ่งเกิดการสูญเสียและดูดกลืนไปในพื้นดิน

ข) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เป็นรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีความสัมพันธ์ที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ได้แก่ (1) การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นโดยจะเห็นว่าคลื่นที่ตกกระทบกับรอยต่อจะเกิดการสะท้อนกลับที่มีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเสมอ (2) การหักเห (Refraction) ของคลื่น เป็นการแพร่กระจายของคลื่นที่รอยต่อของตัวกลางที่ต่างกัน จะทำให้คลื่นสามารถเดินทางผ่านไปในตัวกลางที่สองได้แต่จะพบว่าคลื่นจะมีมุมการหักเหออกจากแนวระนาบปกติ ซึ่งจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการหักเหที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่สัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของตัวกลางทั้งสอง และ (3) การเบี่ยงเบน (Diffraction) ของคลื่นเป็นการแพร่กระจายของคลื่นที่ผ่านตัวกลางหลายชนิดที่มีความสัมพันธ์ที่ต่างกันก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นไปในทิศทางต่างๆ

ค) คุณสมบัติของตัวกลาง (Medium property) ได้แก่ ค่าความซาวซึมได้ (Permeability) และสภาพยอม (Permittivity) ที่ระบุถึงสภาพของการเป็นตัวเหนี่ยวนำและ

ตัวเก็บประจุของตัวกลางในทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าคลื่นสามารถเดินทางได้เร็วที่สุดในตัวกลางที่เป็นอากาศว่าง (Free space) มีอัตราความเร็ว (Velocity) เท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s และในตัวกลางอื่นๆ พบว่าค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสูงมากขึ้น ดังนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเดินทางได้ช้าลง นอกจากนี้แล้วยังมีคุณสมบัติของคลื่นอื่นๆ เช่น อิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave impedance) สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (Propagation coefficient) ค่าคงที่ของการลดทอน (Attenuation constant) และค่าคงที่ของเฟส (Phase constant) ที่มีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นดินทั้งสิ้น

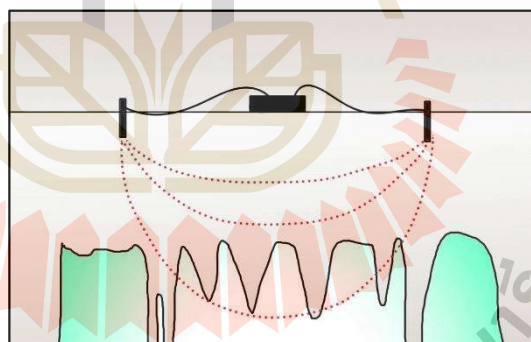
### 2.2.1.2 การแพร่กระจายของคลื่นย่านความถี่ต่ำมาก (VLF Propagation)

การแพร่กระจายของคลื่นย่านความถี่ต่ำมาก (Very low frequency) และย่านความถี่ต่ำมาก (Extremely low frequency) จะมีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นดิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ มากมาย เช่น การแพร่กระจายในโหมดของท่อนำคลื่น (Waveguide propagation) การลดทอน เป็นต้น ดังนั้นสมการความเข้มของสนามไฟฟ้าสำหรับคลื่นในย่านความถี่ต่ำมาก (Very low frequency) จะมีความแตกต่างจากสมการของคลื่นในย่านความถี่ต่ำและปานกลางอยู่เล็กน้อย

### 2.2.2 การสื่อสารผ่านพื้นดิน (Through-the-Earth หรือ TTE)

สำหรับการสื่อสารในเหมืองใต้ดินแบบดั้งเดิม ซึ่งประกอบด้วยสายไฟเบอร์ออฟติกและเครื่องทวนสัญญาณไร้สาย สิ่งเหล่านี้มีข้อเสียเล็กน้อย คือต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมาก ระยะเวลาติดตั้งนาน ใช้จำนวนคนเยอะและหากคำนึงถึงสภาพแวดล้อมการติดตั้งอาจจะทำให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงและเสียหายจากเดิมได้ เนื่องจากการขุด เจาะ เป็นต้น ในระบบสื่อสารไร้สายจะใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) และมีอีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้เทคนิคการส่งสัญญาณที่แพร่คลื่นผ่านดินและชั้นหิน ซึ่งช่วยลดข้อเสียของการติดตั้งแต่สายไฟเบอร์ออฟติกและเครื่องทวนสัญญาณไร้สาย ระบบดังกล่าวซึ่งใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่ำส่งคลื่นลงผ่านไปยังบนพื้นผิวดินและใต้ดิน เรียกว่าระบบสื่อสารผ่านพื้นดิน (Through-the-Earth) ดังภาพที่ 2.2 จากข้อเท็จจริงเชิงปรากฏการณ์ของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับหินหรือดินโดยที่กำลังของคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไป ในทันทีทันใดที่พื้นผิว แต่จะซึมซับลงไปด้วยรวดเร็วโดยการผ่านทะลุ (Penetration) ลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้ความยาวคลื่นของความถี่สูงผ่านทะลุเข้าไป ดังนั้นหากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอ ก็จะเกิดระยะทางของการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น จากหลักการส่งคลื่นดินผ่านพื้นโลกโดยใช้วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชั้นหินจึงมีความจำเป็นต้องใช้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก (Grounded-Earth antenna) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบบ่วง (Loop-

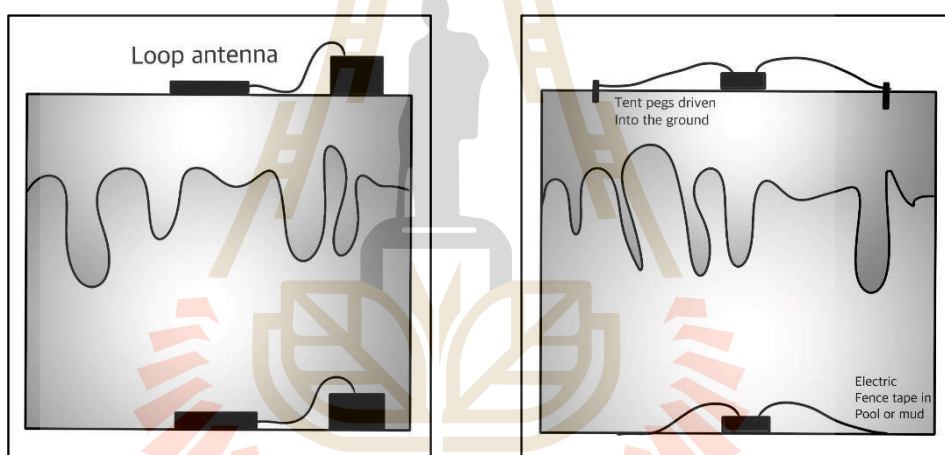
antenna) ก็สามารถใช้ทดแทนได้ ในกรณีที่โพรงถ้ำมีความหนาของชั้นหินที่ไม่หนามากหรือเป็นโพรงถ้ำที่มีความลึกไม่มากนัก ข้อดีคือ มีความสะดวกในการทำงานและติดตั้งได้รวดเร็ว แต่ข้อเสียคือมีค่าอัตราขยายที่ต่ำมาก เนื่องจากต้องสร้างขึ้นในรูปแบบของสายอากาศขนาดเล็ก (Small antenna) สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกมีข้อดี คือ โครงสร้างไม่ซับซ้อนใช้เพียงแค่อำนาจนำเพียงสอง เส้นที่มีความยาวแต่ละเส้นไม่ต่ำกว่า  $1/100$  เท่าของความยาวคลื่น จึงจัดได้ว่าอยู่ในประเภทของสายอากาศขนาดเล็กที่มีอัตราขยายต่ำเช่นเดียวกับสายอากาศแบบบ่วง อย่างไรก็ตามเทคนิคในการแพร่คลื่นผ่านพื้นโลกนั้นแตกต่างจากการแพร่คลื่นในอากาศว่างปกติแต่จะใช้วิธี เหนี่ยวนำประจุที่เกิดการสะสมที่ปลายของเส้นลวดตัวนำปล่อยลงสู่พื้นโลกในรูปของสนามไฟฟ้าขณะที่มีการ เปลี่ยนแปลงเฟสของกระแสลับ สนามไฟฟ้าดังกล่าวเมื่อถูกปล่อยจากปลายเส้นลวดตัวนำ หนึ่งลงสู่พื้นโลกจะเกิดการเหนี่ยวนำในชั้นดินหรือหินไปสู่ปลายสายทองแดงอีกด้านหนึ่งกลับไปสู่เครื่องส่งวิทยุ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในพื้นโลกจะใช้เส้นทางแรกที่สั้นที่สุดระหว่างจุดที่เชื่อมต่อพื้นโลกทั้งสองจุด และมีอีก ส่วนหนึ่งที่เกิดการเหนี่ยวนำแผ่ออกไปในส่วนที่ลึกลงไปในพื้นที่โลก โดยมีเวกเตอร์ของเส้นแรงไฟฟ้าแผ่ออกไป เป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกับสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้ในการแผ่คลื่นผ่นอากาศว่าง ดังนั้นเพื่อให้การเหนี่ยวนำ ของกระแสไฟฟ้าระหว่างปลายของเส้นลวดทั้งสองด้านเกิดขึ้นในพื้นโลกได้สะดวกขึ้น จึงใช้แท่งโลหะทำหน้าที่ เป็นแท่งอิเล็กโทรดต่อที่ปลายทั้งสองของเส้นลวดและฝังลงพื้นดิน ในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสายอากาศ



รูปที่ 2.2 การแสดงแผนผังของระบบสื่อสารผ่านพื้นดิน Through-the-Earth

จากบทความของ Mike Bedford ที่ได้ตีพิมพ์ในวารสาร Cave Radio ในปี ค.ศ.2000 [3]ได้กล่าวไว้ว่าระบบวิทยุสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำได้เริ่มใช้งานมาก่อนหน้านั้น 15 ปีแล้ว ในชื่อของ Molefone ซึ่งใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารจากในถ้ำออกมาถึงพื้นผิวโลกที่อยู่ด้านบนถ้ำ (Cave-to-surface communication) ด้วยความถี่ 87 KHz โดยใช้วิธีผสมสัญญาณแบบแถบความถี่ด้านข้างที่อยู่บนเพียงแถบเดียว (Upper single side band:USB) จากนั้น British cave rescue council (BCRC) จึงได้เริ่มหาวิธีการพัฒนาและออกแบบระบบสื่อสารสำหรับใช้งานในถ้ำชุดใหม่ขึ้นมาแทน ในปี ค.ศ.1999 ได้พัฒนาจนชื่อว่า Heyphone ในปี ค.ศ.2001[7]. Molefone จะใช้สายอากาศแบบ

บ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 1 เมตร ซึ่งสามารถติดตั้งใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) แต่จะถูกจำกัดด้วยระยะทางที่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลนัก ส่วนระบบสายอากาศของ Heyphone จะใช้ที่แตกต่างออกไปที่เรียกว่า สายอากาศดิน (Earth antenna) โดยใช้ลวดสองเส้นตามความยาวของลวด ต่อเข้ากับเครื่องวิทยุ ส่วนในกรณีของสถานีที่อยู่บนพื้นผิวโลกจะใช้หมุดสำหรับกางเต็นท์ปักลงในดินแล้วเชื่อมต่อกับปลายสายลวดทองแดงใช้คลิปปากจระเข้หนีบยึดไว้ ส่วนกรณีที่ใช้งานในถ้ำใต้ดินจะใช้แถบตัวนำสำหรับทำแนวรั้วไฟฟ้าถ่วงน้ำหนักด้วยหินมาแทนหมุดเต็นท์แล้วนำไปแช่หรือฝังไว้ในน้ำหรือโคลนที่อยู่ภายในถ้ำ แม้ว่าจะติดตั้งใช้งานได้ยากกว่าสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยมของ Molefone แต่จะให้ระดับของสัญญาณแรงกว่ามากจึงสามารถติดต่อสื่อสารได้ลึกกว่าและระยะไกลกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ระบบสื่อสารทั้งสองรุ่นนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับนักกู้ภัย (Cave rescue) เฉพาะกลุ่มเท่านั้นไม่ใช่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จึงทำให้ไม่เกิดความแพร่หลายและไม่ปรากฏในฐานข้อมูลงานวิจัยสากลที่มีอยู่ในปัจจุบัน



(ก) Loop antenna สำหรับ Molefone [3] (ข) Earth antenna สำหรับ Heyphone [7]

รูปที่ 2.3 การทดสอบใช้งานระบบวิทยุสื่อสาร Heyphone ใช้งานในถ้ำ

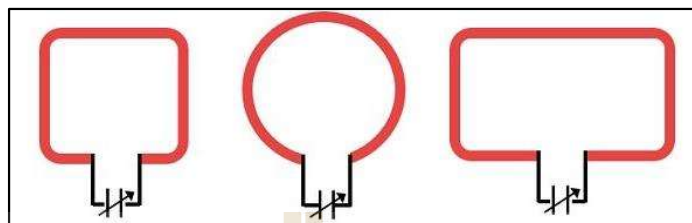
## 2.2.3 สายอากาศแบบบ่วง (Loop antenna)

### 2.2.3.1 สายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น (Full-wave antennas)

สายอากาศแบบบ่วงที่มีความยาวของบ่วงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น  $\lambda$  (แลมบ์ดา) จะถูกเรียกว่าสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น เป็นสายอากาศที่นำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีค่าอัตราขยายและอินพุตอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสามารถแปลงกลับให้ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ 50 โอห์ม หรือ 70 โอห์มได้โดยง่าย สายอากาศแบบบ่วงที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีรูปร่างหลายรูปแบบ เช่น แบบวงกลม แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส



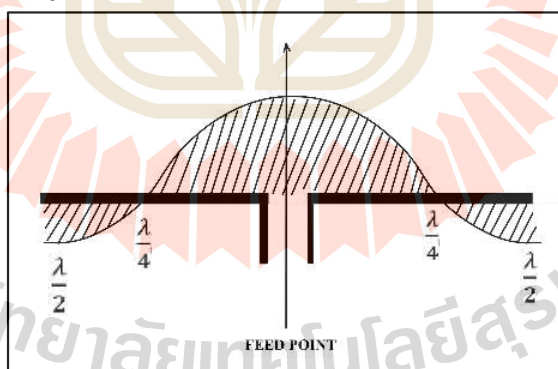
แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแต่ละรูปแบบจะให้อัตราขยายและแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานมาน้อยแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบปวง [1]

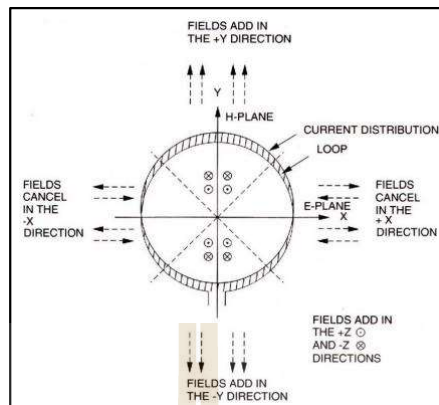
### 2.2.3.2 การแจกแจงรูปของกระแสตลอดความยาวของสายอากาศที่มีความยาวเต็มความยาวคลื่น

กุญแจสำคัญที่จะทำให้เข้าใจเรื่องของการแจกแจงกำลังของสายอากาศนั้นก็คือการเข้าใจในเรื่องที่กระจายตามความยาวของกระแสตลอดความยาวของปวงว่าจะให้ผลลัพธ์รวมของสนามไฟฟ้าเสริม หรือหักล้างกันในทิศทางใดบ้างถ้าจะพิจารณาของสายอากาศแบบปวงที่มีขนาดของปวงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นในระนาบของ X-Y จุดป้อนสัญญาณนั้นจะเป็นจุดใดจุดหนึ่งของวงกลมของปวง โดยที่จุดป้อนสัญญาณนั้นจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลัง สมมุติว่าจุดที่ป้อนสัญญาณนั้นเป็นด้านล่างตามแนวแกน Y และถ้าตัดสายอากาศแบ่งครึ่งแล้วเคลื่อนออกในแนวแกน X ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งรูปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตามความยาวของกระแสซึ่งดูคล้ายคลื่นแบบโคซายน์ที่มีจุดป้อนสัญญาณอยู่กึ่งกลาง



รูปที่ 2.5 การแจกแจงรูปของกระแสตลอดความยาวเต็มความยาวคลื่น [1]

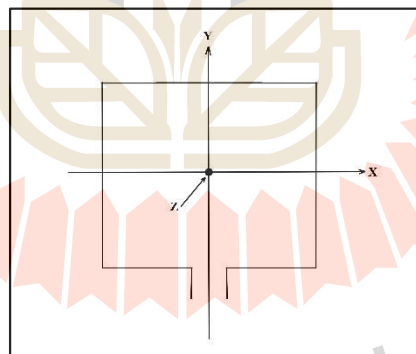
รูปที่ 2.6 แสดงการแจกแจงรูปของกระแสในสายอากาศแบบปวงวงกลม และแสดงการเสริมกันและหักล้างกันของสนามบนตัวของปวง ในกรณีนี้สามารถจะเสริมกันในทิศทาง +Y, -Y และ +Z, -Z แต่จะหักล้างกันในทิศทางของ +X, -X



รูปที่ 2.6 กระแสที่ไหลในสายอากาศแบบวงกลม [1]

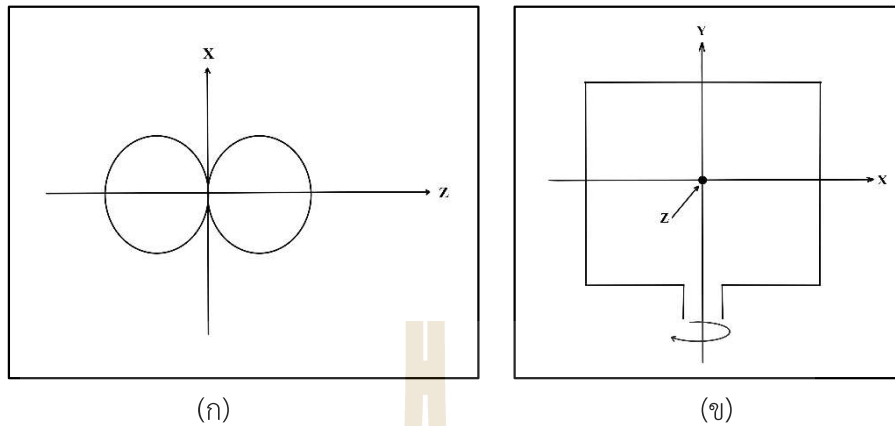
แบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบวงแบบหนึ่งความยาวคลื่น สายอากาศแบบวง จะมีแนวระนาบที่น่าสนใจอยู่สามระนาบคือ ระนาบของสนามไฟฟ้า ระนาบของสนามแม่เหล็ก และระนาบของปวงเอง ว่าระนาบใดเป็นระนาบที่จำกัดของสายอากาศ ดังจะแสดงระนาบนี้โดยใช้การพิจารณาสายอากาศแบบวงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

สมมุติว่าสายอากาศนี้วางอยู่ในแนวตั้งและด้านหน้านั้นเป็นระนาบ X-Y และแนวแกน Z จะเป็นจุดที่พุ่งตรงออกไปจากตัวของสายอากาศ ดังรูปที่ 2.7 ถ้าเราเปรียบเทียบระนาบโดยยึดจุดป้อนสัญญาณเป็นหลักเราจะเห็นระนาบ X-Z เป็นระนาบของสนามไฟฟ้า ส่วนระนาบ Y-Z เป็นระนาบของสนามแม่เหล็ก และสายอากาศจะวางตัวอยู่ในระนาบ X-Y



รูปที่ 2.7 สายอากาศปวงแบบสี่เหลี่ยม [1]

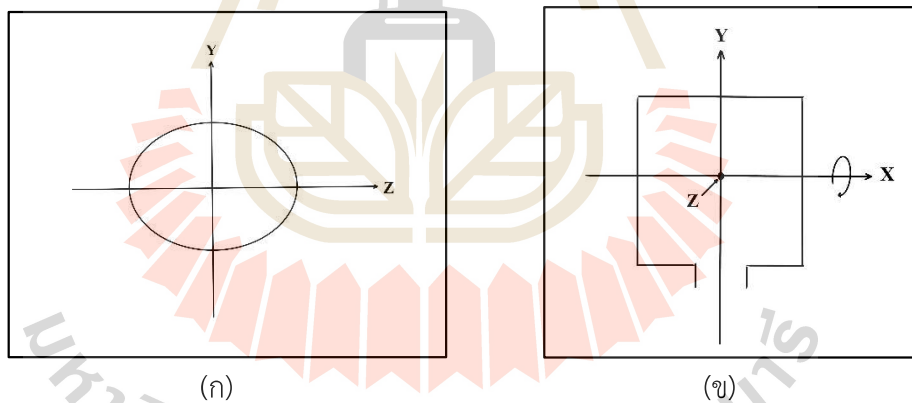
ซึ่งตามทฤษฎีแล้วแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบของสนามไฟฟ้า X- Z จะเป็นดังรูปที่ 2.8 (ก) ในการวัดหาค่านี้จะต้องหมุนสายอากาศไปรอบๆ โดยยึดแกนเป็นแนวแกน Y ดังรูปที่ 2.8 (ข)



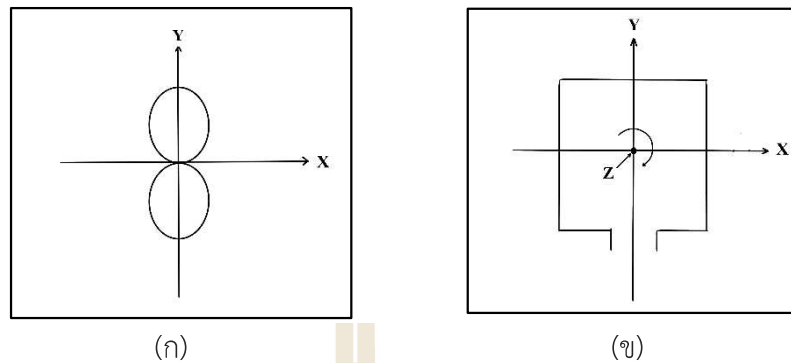
รูปที่ 2.8 (ก) แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วง  
(ข) การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามไฟฟ้า [1]

ระนาบสนามแม่เหล็ก Y-Z จะมีแบบรูปการแผ่กำลังที่วัดได้เป็นดังรูป 2.9 (ก) โดยในการวัดนั้นจะยึดแกน X เป็นแนวแกนในการหมุนไปรอบๆ ดังรูป 2.9 (ข)

ในการวัดหาแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบของสายอากาศนั้น X-Y แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) จะต้องหมุนสายอากาศไปรอบๆ โดยยึดแกน Z เป็นจุดหมุน แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.9 (ก) แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วง  
(ข) การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบสนามแม่เหล็ก [1]

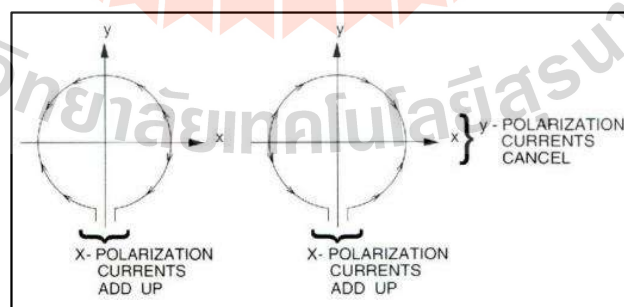


รูปที่ 2.10 (ก) แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบของสายอากาศแบบวงเต็มคลื่น  
(ข) การหมุนที่จะให้ได้แบบรูปการแผ่กำลังของระนาบวง [1]

จะพิจารณาอย่างละเอียดมากขึ้นในบททฤษฎีเกี่ยวกับเรื่องของระนาบสนามไฟฟ้า ระนาบสนามแม่เหล็ก และระนาบของบ่วง ดังรูปที่ 2.9 (ก), 2.10 (ก) และ 2.11 (ก) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม แบบรูปการแผ่กำลังของสนามไฟฟ้า และบ่วงจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกันแต่จะมีแอมพลิจูดที่ต่างกัน ดังรูปที่ 2.6 ผลลัพธ์ที่คิดจากจุดกึ่งกลางของบ่วงออกมาจะเป็นผลบวกของสนามที่เกิดจากกระแสที่มีเฟสตรงกัน บนแกน Y ภายนอกบ่วงนั้นจะเป็นผลรวมของสนามเช่นเดียวกันแต่จะมีความต่างเฟสกันเล็กน้อย ด้วยเหตุนี้ระนาบของบ่วงจะมีค่าต่ำกว่าระนาบของสนามไฟฟ้า อยู่ที่  $-3$  dB

### 2.2.3.3 การโพลาไรซ์ (Polarization)

รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นทิศทางของกระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงซึ่งมีความแตกต่างกันในช่วงขณะ จากรูปแสดงให้เห็นว่า ในทิศทางของ X นั้นกระแสจะเสริมกันทั้งในครึ่งบนและครึ่งล่างของบ่วง ขณะที่ในทิศทางของ Y นั้นกระแสจะหักล้างกันหมด จากเหตุผลนี้ทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นในระนาบสนามไฟฟ้าจึงมีการโพลาไรซ์ในทิศทาง X



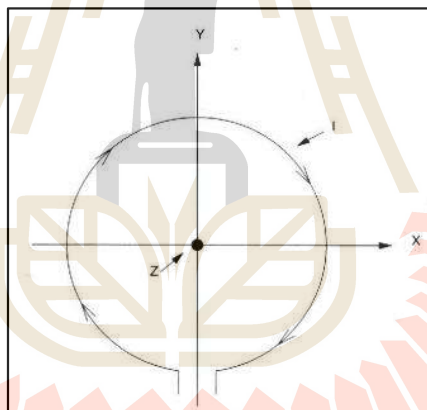
รูปที่ 2.11 ขั้วคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้าในทิศทางของแกน X [1]

ในทางปฏิบัติก็คือสายอากาศแบบบ่วงที่วางแนวตั้งจะบ่อนสัญญาณเข้าจากทางด้านล่างหรือทางด้านบน คลื่นสนามไฟฟ้าจะมีข้ออยู่ในแนวนอน และถ้าสายอากาศบ่วงนี้มีการบ่อนสัญญาณจากทางด้านซ้ายหรือขวา คลื่นสนามไฟฟ้าจะมีข้อในแนวตั้ง

#### 2.2.3.4 สายอากาศแบบบ่วงเล็ก (Small loop antenna)

สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเป็นสายอากาศที่มีความยาวเส้นรอบวงของบ่วงประมาณ  $\lambda/8$  หรือน้อยกว่า สายอากาศแบบนี้จะมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังที่แตกต่างจากของสายอากาศแบบบ่วงหนึ่งความยาวคลื่นอย่างมาก และจะนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างจากปกติ เช่น สายอากาศสำหรับใช้ในการหาทิศทาง

เนื่องจากความยาวของบ่วงมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก กระแสที่เกิดขึ้นในทุกส่วนของตัวบ่วงสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นเฟสเดียวกันได้ ดังรูปที่ 2.12 ด้วยเหตุนี้ สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z จึงมีค่าเป็นศูนย์ สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กจึงแตกต่างจากสายอากาศแบบบ่วงเต็มความยาวคลื่น ซึ่งมีสนามไฟฟ้าในแนวแกน Z สูงที่สุด



รูปที่ 2.12 กระแสที่ไหลในสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ส่วนในทิศทางอื่นๆ ที่ไม่ใช่แนวแกน Z แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลขนาดสั้น (Short Dipole) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กจะเป็นสายอากาศที่เป็นทวิภาค (Dual) กันกับสายอากาศไดโพลขนาดสั้น (มีคุณลักษณะของแบบของรูปการแผ่กระจายกำลังงานเหมือนกัน) ดังนั้นหากเราเปลี่ยนจากสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาเป็นสายอากาศไดโพลสั้น โดยวางตัวไดโพลไว้ที่จุดกำหนด (Origin) และวางตัวของไดโพลขนาดสั้นไปตามแนวแกน Z แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้จะไม่แตกต่างกันเลย สำหรับค่าความต้านทานอินพุตของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กนี้จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีค่าเป็นเศษส่วนของโอห์ม

### 2.2.3.5 สายอากาศแบบบ่วงหลายรอบ (Multiturn loop antenna)

สายอากาศแบบบ่วงหลายรอบจะมีรูปแบบทรงเหมือนกับสายอากาศแบบบ่วงทั่วไป เช่น แบบวงกลม แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น สายอากาศแบบบ่วงหลายรอบจะนำเส้นลวดพันเป็นเกลียว ครอบคลุมยาวคลื่นที่เราต้องการใช้ความถี่นั้นๆ ดังรูปที่ 2.13 ([https://hmong.in.th/wiki/Loop\\_antenna#google\\_vignette](https://hmong.in.th/wiki/Loop_antenna#google_vignette))



รูปที่ 2.13 สายอากาศแบบบ่วงหลายรอบ [1]

### 2.2.4 สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna)

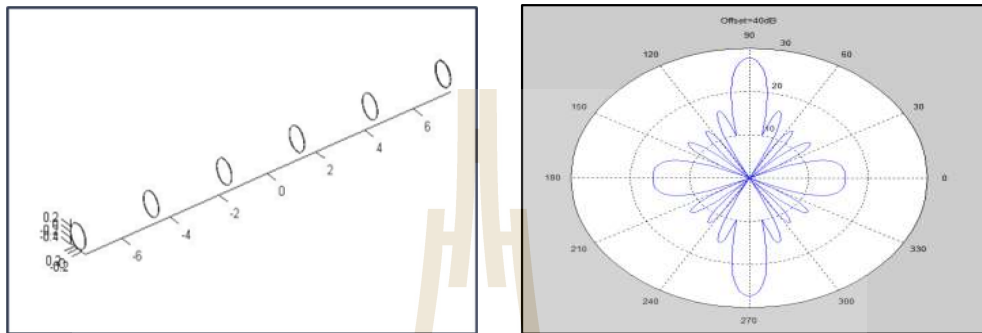
สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) หมายถึง เป็นการนำสายอากาศหลายๆ อีลิเมนต์มาจัดวางเรียงกัน มักจะใช้สายอากาศชนิดเดียวกันเสมอ เนื่องจากการออกแบบและสร้างมีความง่ายและสะดวกกว่าและสามารถเลือกใช้ได้อย่างหลากหลาย โดยสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์ที่นำมาเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น การจัดแถวลำดับสามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้เพิ่มขึ้น สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) ของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละอีลิเมนต์ได้ด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการได้

สนามรวมที่เกิดจากแถวลำดับของสายอากาศจะเกิดจากการทับซ้อนเชิงเวกเตอร์กันของสนามที่แผ่ออกมาจากอีลิเมนต์แต่ละตัว การที่จะได้แบบรูปการแผ่คลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ มีค่าสูงกว่าในทิศทางอื่นนั้น สิ่งที่ต้องทำคือ ต้องทำให้สนามที่เกิดจากแต่ละอีลิเมนต์มีเฟสที่เสริมกันในทิศทางที่ต้องการและในขณะเดียวกันสนามที่เกิดขึ้นจากแต่ละอีลิเมนต์ต้องหักล้างกันในทิศทางที่ไม่พึงประสงค์ด้วย

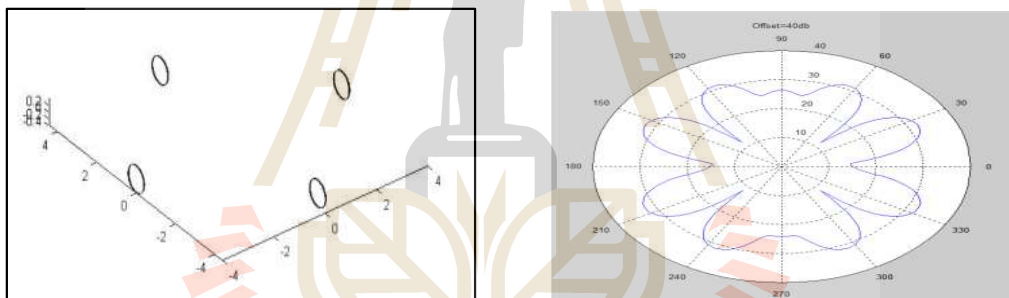
สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (Liner array antenna) เป็นพื้นฐานของการจัดแถวลำดับ ที่ประกอบด้วยสายอากาศชนิดเดียวกันนำมาวางเรียงกันให้เป็นเส้นตรงและคานึงถึงระยะห่าง (d) ของแต่ละอีลิเมนต์ จะมีผลต่อการแผ่คลื่นของสายอากาศ สายอากาศมักจะวางตัวห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งคำนวณระยะห่าง ( $d = \lambda / 2$ )



มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Akshay Joshi และ S.K.Behera ในปี ค.ศ.2016 [10] ในฐานข้อมูล IEEE ที่วิเคราะห์สายอากาศบ่วงวงกลมนำมาจัดแถวลำดับแบบเชิงเส้นและจัดแถวลำดับแบบวงกลมที่ย่านความถี่VHF พบว่าสายอากาศบ่วงวงกลมที่จัดแถวลำดับแบบเชิงเส้นมีทิศทางการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศบ่วงวงกลมที่จัดแถวลำดับแบบวงกลม



รูปที่ 2.14 การจัดแถวลำดับเชิงเส้นและการพล็อตรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบ่วงวงกลม [10]



รูปที่ 2.15 การจัดแถวลำดับแบบวงกลมและการพล็อตรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบ่วงวงกลม [10]

### 2.2.5 ศึกษาการแพร่คลื่นในถ้ำหลวงเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ [11]

1. ความถี่ย่าน LF (Low frequency) ปลายแถบ (300 kHz) และย่าน MF (Medium frequency) ต้นแถบ (350 kHz และ 1000 kHz) เกิดค่าการสูญเสียการส่งผ่านต่อหนึ่งเมตรและค่าการลดทอนตลอดระยะทาง 20 เมตรค่อนข้างสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติการแพร่เป็นแบบคลื่นดินหรือคลื่นผิว (ความถี่ต่ำกว่า 2000 kHz) หากส่งผ่านตัวกลางที่เป็นดินหรือหินที่มีค่าความนำไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กสอดคล้องกับความถี่และความยาวคลื่น จะเกิดการเหนี่ยวนำหรือซึมซาบเข้าไปในเนื้อตัวกลางนั้นมากกว่าที่จะแพร่คลื่นออกไปในแนวระดับสายตา ทำให้เกิดการสูญเสียและลดทอนสูงในกรณีของการวัดทดสอบแบบระดับสายตา (LOS: Line-of-Sight)

2. ย่านความถี่ MF (Medium frequency) (1650 kHz, 2325 kHz และ 3000 kHz) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นดินหรือคลื่นผิว แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่า 1000 kHz จะแสดงคุณสมบัติการแพร่คลื่นบนพื้นผิวของผนังและพื้นถ้ำมากกว่าที่จะเหนี่ยวนำลงในตัวกลางที่เป็นหินปูนหรือหินทราย ทำให้สามารถวัดค่ากำลังของคลื่นได้ ขณะที่สายอากาศภาครับอยู่ใกล้กับผนังและพื้นถ้ำได้ดี แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นไปถึง 3000 kHz ซึ่งจะอยู่ย่านความถี่ MF (Medium frequency) ปลายแถบและ HF (High frequency) ต้นแถบ ซึ่งมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นเป็นแบบคลื่นฟ้ามากกว่าที่จะแพร่ไปตามพื้นผิวทำให้มีค่าการสูญเสียและการลดทอนมากกว่าอีกสองความถี่ทั้งในถ้ำหินปูนและถ้ำหินทราย

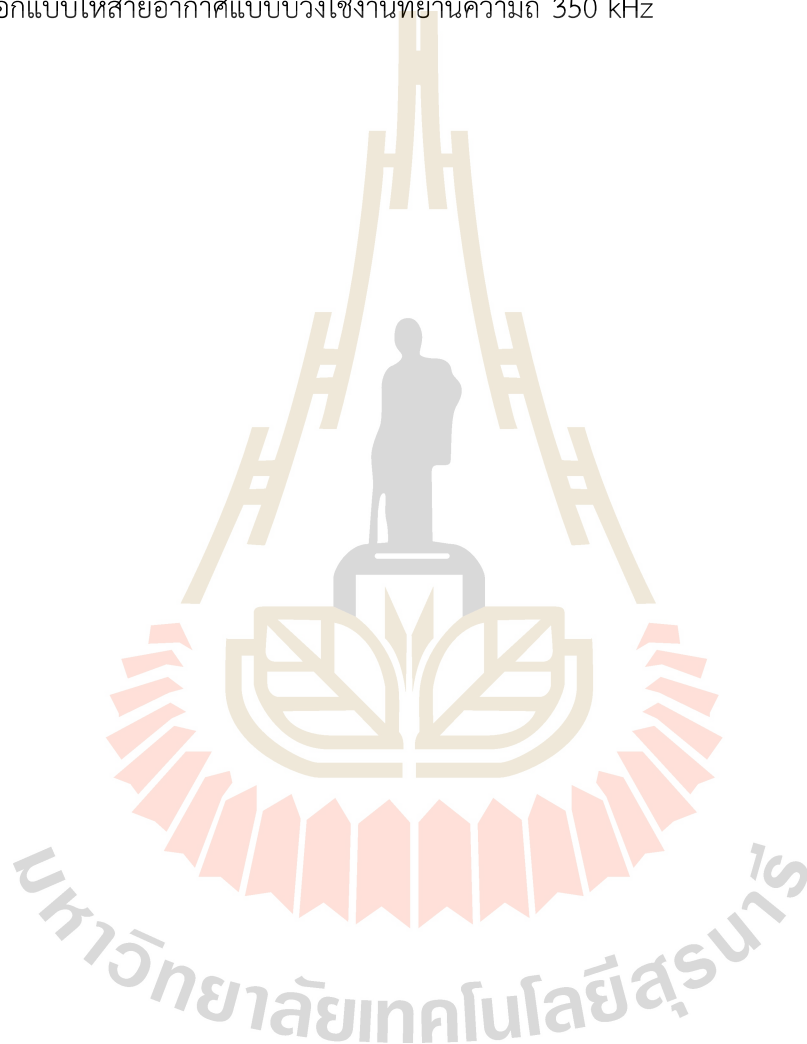
3. ย่านความถี่ HF (High frequency) มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นฟ้าที่สามารถสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในชั้นบรรยากาศได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างจากธรรมชาติที่ควรเป็นของคลื่นความถี่นี้ เนื่องจากมีการสะท้อนและเลี้ยวเบนบนผนังถ้ำที่มีพื้นไม่สม่ำเสมอไม่ตีเท่าใดนัก แม้ว่าเกิดการสูญเสียและการลดทอนระยะ 20 เมตร ไม่สูงเท่าไรกับย่านความถี่ LF (Low frequency) แถบปลาย หรือ MF (Medium frequency) ต้นแถบก็ตาม แต่ก็ยากที่ห้วงผลส่งรับคลื่นในระยะไกลภายในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทได้

4. ย่านความถี่ VHF (Very high frequency) มีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงหรือคลื่นในอากาศว่าง ซึ่งสามารถแพร่คลื่นได้ดีในภูมิภาคที่โล่งโดยคลื่นต้องอยู่ในแนวระดับสายตาและมีการสูญเสียในอากาศว่างเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่เมื่อนำมาวัดทดสอบในโพรงถ้ำพบว่าเกือบทุกความถี่ในย่าน VHF (Very high frequency) ที่มีค่าสูงขึ้นกลับมีค่าการสูญเสียและการลดทอนที่ระยะทางเท่ากันลดลง ซึ่งสมมติฐานว่าเมื่อความยาวของคลื่นมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถผ่านโพรงถ้ำที่มีขนาดกว้างได้ดี

5. ย่านความถี่ UHF (Ultra high frequency) ยังคงมีคุณสมบัติการแพร่คลื่นแบบคลื่นตรงเช่นเดียวกับย่านความถี่ VHF (Very high frequency) สำหรับความถี่ย่าน UHF (Ultra high frequency) นี้เมื่อทำการทดสอบในโพรงถ้ำทั้งสองประเภทพบว่ามีการสูญเสียและการลดทอนในระยะทาง 20 เมตร ค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการวัดทดสอบในถ้ำหินปูนและหินทราย โดยให้สาเหตุมาจากสมมุติฐานขนาดของโพรงถ้ำที่สามารถรองรับความยาวคลื่นของความถี่ในย่าน UHF (Ultra high frequency) นี้ได้ อย่างไรก็ตามการลดทอนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงอยู่มาก หากต้องการส่งรับคลื่นในถ้ำระยะไกลก็จะพบกับอุปสรรคจากความแคบและหินที่เป็นสิ่งกีดขวางการแพร่คลื่นแบบ ระดับสายตา (LOS: Line-of-Sight) ซึ่งความถี่ย่าน UHF (Ultra high frequency) ไม่สามารถแพร่ผ่านไป

### 2.3 สรุป

ในบทนี้เป็นการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กขนาดเล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก หา ลักษณะการวางตัวสายอากาศ สำหรับนำไปใช้รับสัญญาณภายในถ้ำได้ สำหรับถ้ำที่มีเพดานไม่สูง และการสร้างสายอากาศแบบบ่วงที่มีน้ำหนักเบา พกพาสะดวก เหมาะสำหรับนำไปใช้ติดต่อสื่อสารภายใน ถ้ำโดยออกแบบให้สายอากาศแบบบ่วงใช้งานที่ย่านความถี่ 350 kHz



## บทที่ 3

### การออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

#### 3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบแฉวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการสร้างชิ้นงานจริง โดยเริ่มจากการออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับความถี่ที่ 350 kHz สำหรับในการออกแบบจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 เพื่อศึกษาความเป็นไปของสายอากาศแบบบ่วงซึ่งให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้แบบรูปการแผ่กำลังเป็นไปในลักษณะแบบรอบทิศทาง ในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบและจำลองผลของสายอากาศแบบบ่วง เพื่อให้สายอากาศทำงานในความถี่ที่ต้องการโดยการออกแบบให้มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ได้อธิบายในบทนี้

#### 3.2 สายอากาศสำหรับระบบสื่อสารแบบผ่านพื้นโลก

จากข้อเท็จจริงเชิงปรากฏการณ์ของคลื่นความถี่วิทยุที่ตกกระทบกับหินหรือดินโดยที่กำลังของคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้หยุดหรือหมดหายไปทันทีที่พื้นผิว แต่จะซึมซาบลงไปอย่างรวดเร็วโดยการผ่านทะลุ (Penetration) ลงไปในเนื้อหินหรือเนื้อดินโดยใช้ความยาวคลื่นของความถี่วิทยุส่งผ่านทะลุเข้าไป ดังนั้น หากมีการใช้ความยาวคลื่นที่ยาวพอ ก็จะเกิดระยะทางของการผ่านทะลุที่ไกลขึ้น เช่น กรณีของระบบวิทยุสื่อสาร HeyPhone ได้ใช้ความถี่ 87 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศประมาณ 3.5 กิโลเมตร (คำนวณจากความเร็วแสงในอากาศเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที) แต่เนื่องจากความเร็วจะลดลงขณะที่ เดินทางในหิน ทำให้ความยาวคลื่นเดียวกันนี้มีความยาวคลื่นใต้ดินเหลือเพียงหลักร้อยเมตร ซึ่งหากความยาวคลื่นใต้ดินนี้มีขนาดมากกว่านี้ก็จะทำให้สามารถเกิดการเหนี่ยวนำผ่านทะลุได้ไกลมากขึ้นหลายร้อยเมตรด้วย หลักการดังกล่าวเมื่อนำมาใช้กับคลื่นความถี่ 350 kHz ก็สามารถใช้งานได้ด้วยเช่นเดียวกันแม้ว่าความถี่จะสูงกว่า 87 kHz ของวิทยุสื่อสาร HeyPhone ก็ตาม แต่จากผลการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า คลื่นความถี่ 350 kHz นี้เมื่อนำมาใช้กับถ้ำหินปูนในประเทศไทยจะมีค่าการลดทอนในชั้นหินปูนต่ำกว่าความถี่ 87 kHz ในขณะที่นำมาใช้กับถ้ำหินทรายจะมีค่าการลดทอนสูงกว่าความถี่ 87 kHz เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ้ำทั้งสองประเภทซึ่งมีข้อมูลระบุว่า มีจำนวนถ้ำหินปูนเป็นส่วนใหญ่ (มากกว่า 2,000 ถ้ำจากทั้งหมด 3,030 ถ้ำ) ดังนั้นการเลือกใช้ความถี่ 350 kHz มาออกแบบระบบวิทยุสื่อสารแบบผ่าน

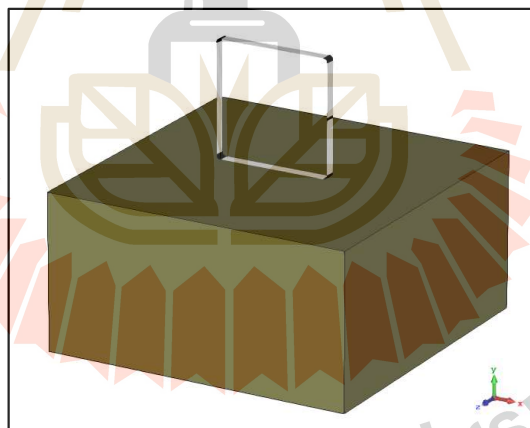
พื้นโลก (Through-the-Earth) และสายอากาศสำหรับใช้งาน และหลีกเลี่ยงการรบกวนต่อวิถีชีวิตของ ค้างคาวที่อาศัยในถ้ำ จึงถือว่าการพิจารณาที่รอบคอบและครบถ้วนแล้ว

จากหลักการส่งคลื่นดินผ่านพื้นโลกโดยใช้วิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชั้นหินโดยใช้ ความถี่ 350 kHz จึงมีความจำเป็นต้องใช้สายอากาศแบบฝังลงพื้นโลก (Grounded-Earth antenna) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบบ่วง ก็สามารถใช้ทดแทนได้ ในกรณีที่มีโพรงถ้ำ มีความหนาของชั้นหินที่ไม่หนามากหรือเป็นโพรงถ้ำที่มีความลึกไม่มากนัก

ดังนั้นเราจึงนำสายอากาศแบบบ่วงของระบบสื่อสารภายในถ้ำของ HeyPhone ที่สร้างขึ้นมาจากสายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 เส้น ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มาเป็น ต้นแบบในงานวิทยานิพนธ์นี้ที่ย่านความถี่ 350 kHz

### 3.3 การจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019

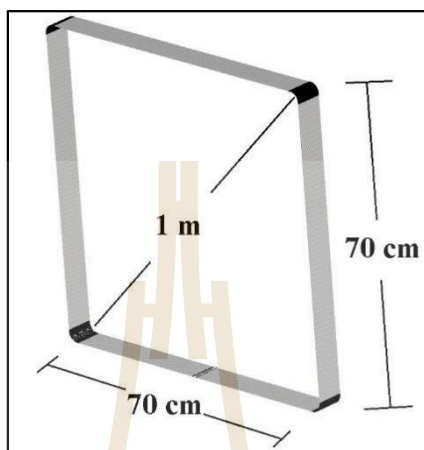
การจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 เพื่อให้สายอากาศแบบ บ่วงสามารถทำงานที่ความถี่ 350 kHz โดยต้องการให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำและใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม มากที่สุด โดยรูปที่ 3.1 เป็นรูปโครงสร้างสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศในบทนี้ นำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กของ ระบบสื่อสารภายในถ้ำของ HeyPhone ของ John Hey [6] มาเป็นต้นแบบในงานวิจัยนี้ที่ย่านความถี่ 350 kHz ที่ออกแบบไว้โดยสร้างขึ้นมาจากสายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 เส้น มีความ ยาว 2.8 เมตร ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความยาวด้านละ 70 เซนติเมตร เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1 เมตร ดังรูปที่ 3.2 และการออกแบบจำลองการจัดแถวลำดับของสายอากาศแบบบ่วง ขนาดเล็กที่มี 2 อีลิเมนต์ และ 4 อีลิเมนต์ มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุด บ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2 ที่เลือกระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ

70 เซนติเมตร ได้ทำการออกแบบจำลองระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ที่ละ 10 เซนติเมตร ตั้งแต่ 10 เซนติเมตร ถึง 100 เซนติเมตร พบว่าระยะห่าง 70 เซนติเมตร มีค่าพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ที่ดี



สุดท้ายจึงเลือกใช้ระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร

รูปที่ 3.2 สายอากาศต้นแบบแบบบ่วง

คำนวณหา  $\lambda$  ที่ ความถี่ 350 kHz ดังสมการ ที่ 3.1

$$\text{จากสูตร} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{จะได้} &= \frac{3 \times 10^8}{350 \times 10^3} \\ &= 856.549 \text{ m.} \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณหาสูตร สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก ดังสมการที่ 3.2

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{\lambda}{50} &= \frac{856.549}{50} \\ \text{จะได้} &= 17.13 \text{ m.} \end{aligned} \quad (3.2)$$

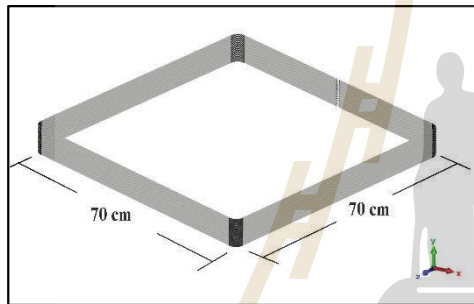
จากการออกแบบจะกำหนด Diameter loop = 1 m.



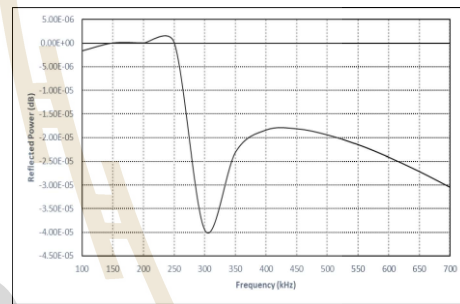
### 3.4 การจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์

#### 3.4.1 สายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวนอน

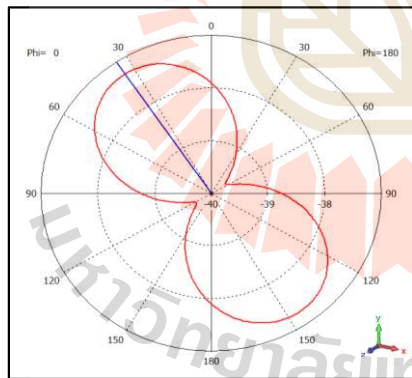
ขั้นตอนแรกใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศแนวนอนบนพื้นดิน มีขนาดความยาวด้านละ 70 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางยาว 1 เมตร โดยใช้สายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 เส้น เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส นำเป็นสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.000035$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.3 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.3 (ค) และ (ง) มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ  $-35.34$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.4



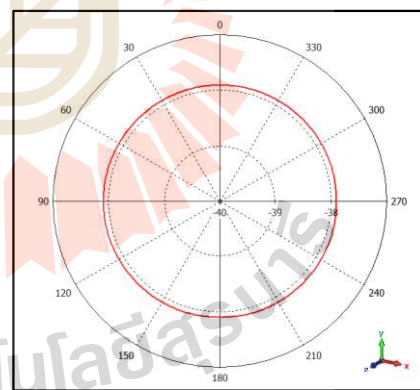
(ก) แบบจำลองสายอากาศ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ )

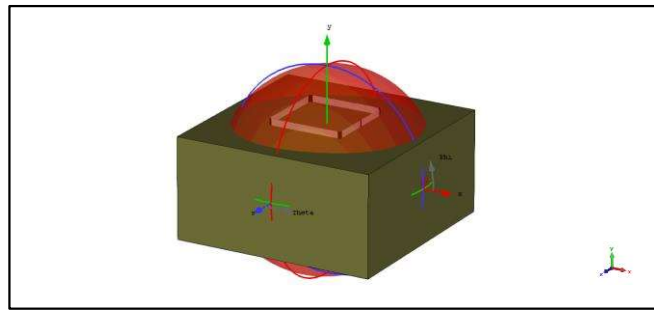


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

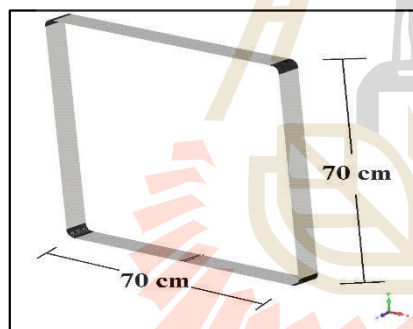
รูปที่ 3.3 ผลการจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวนอน 1 อีลิเมนต์



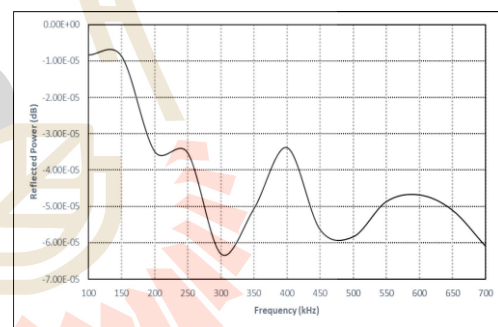
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวอน 1 อีลิเมนต์

### 3.4.2 สายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวตั้ง

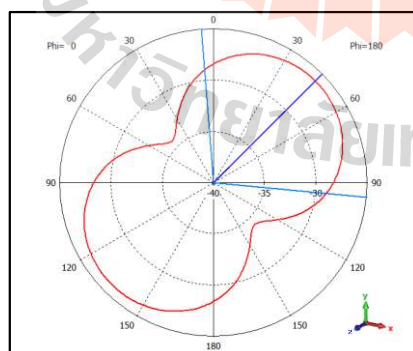
ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศแนวตั้งบนพื้นดิน ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.00006$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.5 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.5 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เท่ากับ  $-25.35$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.6



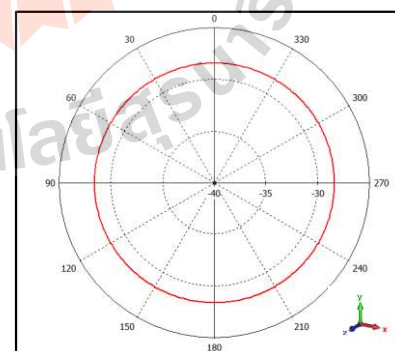
(ก) แบบจำลองสายอากาศ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศ ( $S_{11}$ )

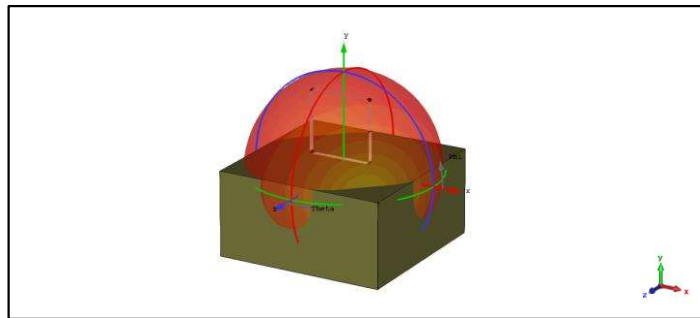


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.5 ผลการจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์

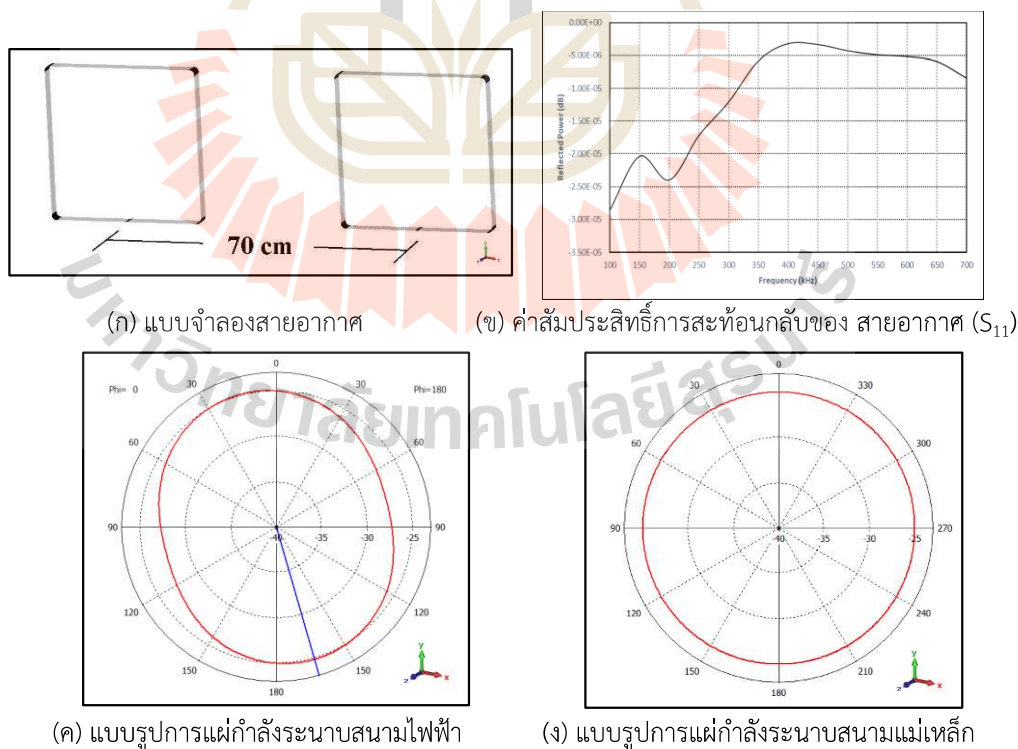


รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กวงแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์

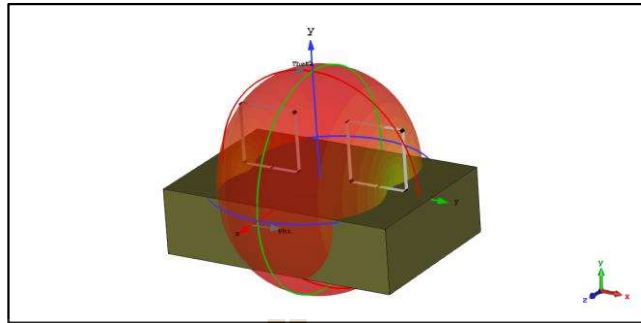
### 3.5 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

#### 3.5.1 สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศ 1x2 อีลิเมนต์ แนวตั้งบนพื้นดิน มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2 ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.7 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.000005$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.7 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.7 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เท่ากับ  $-23.29$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวง 1x2 อีลิเมนต์

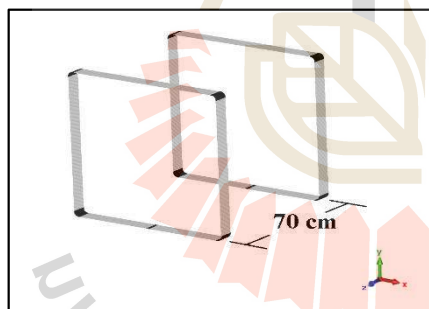


รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบปวง 1x2 อีลิเมนต์

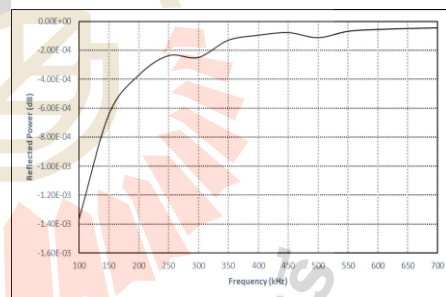
### 3.6 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

#### 3.6.1 สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

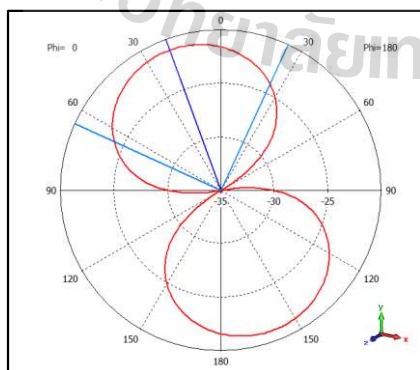
ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบปวง 2 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศ 2x1 อีลิเมนต์ แนวตั้งบนพื้นดิน มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2 ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.9 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.0002$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.9 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.9 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ  $-21.03$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.10



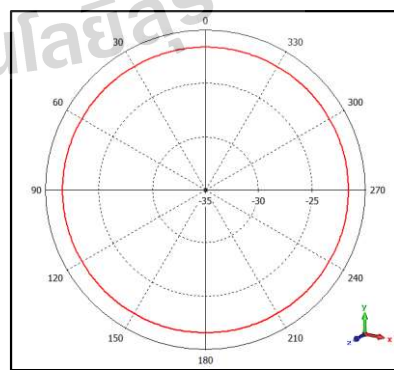
(ก) แบบจำลองสายอากาศ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศ ( $S_{11}$ )

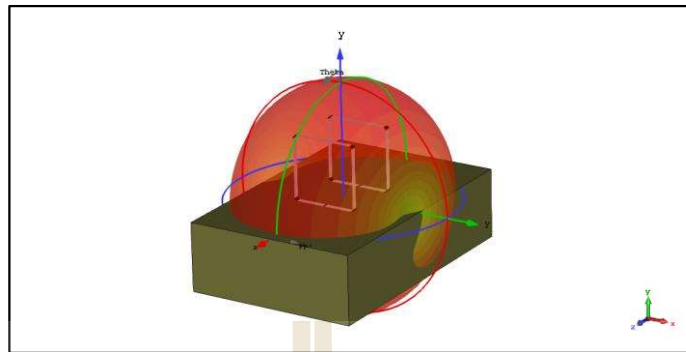


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.9 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

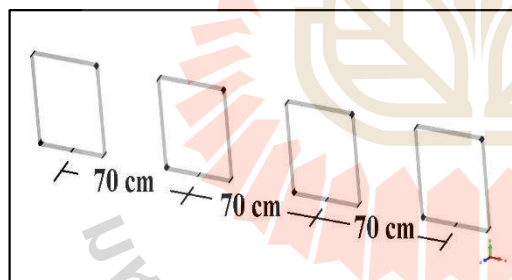


รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

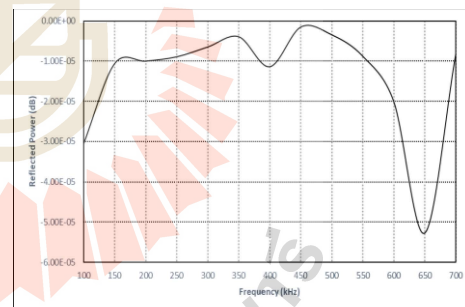
### 3.7 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

#### 3.7.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

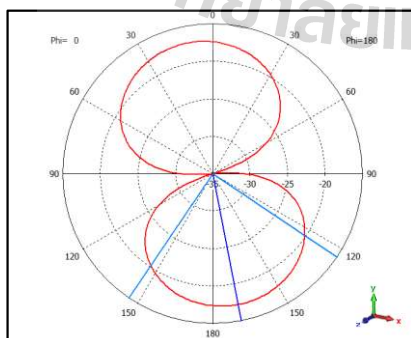
ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบบ่วง 4 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศ 1x4 อีลิเมนต์ แนวตั้งบนพื้นดิน มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.11 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.00001\text{dB}$  ดังแสดงรูปที่ 3.11 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.11 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ  $-17.23\text{ dBi}$  ดังแสดงรูปที่ 3.12



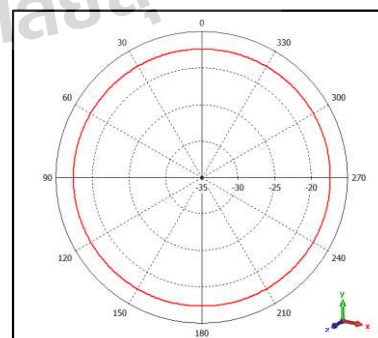
(ก) แบบจำลองสายอากาศ (Type D)



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศ ( $S_{11}$ )



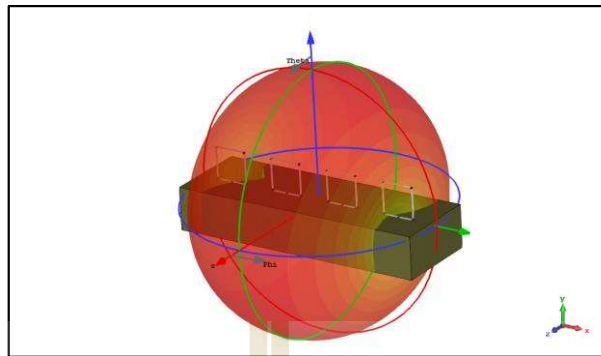
(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.11 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์



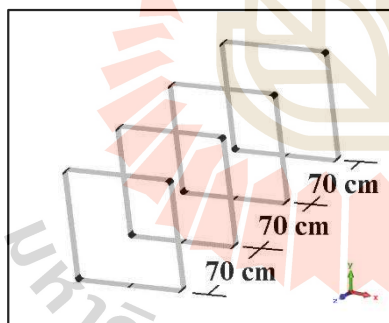


รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

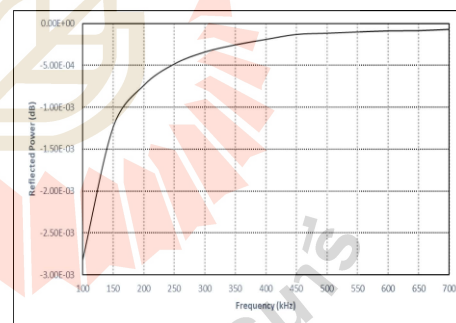
### 3.8 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

#### 3.8.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

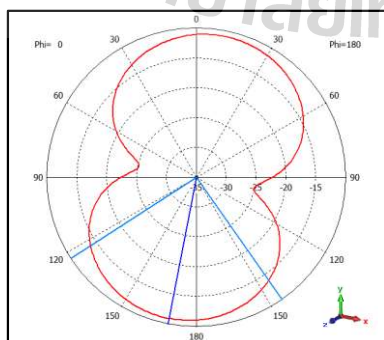
ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบบ่วง 4 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศ 4x1 อีลิเมนต์ แนวตั้งบนพื้นดิน มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.13 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.0005$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.13 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.13 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ  $-10.83$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.14



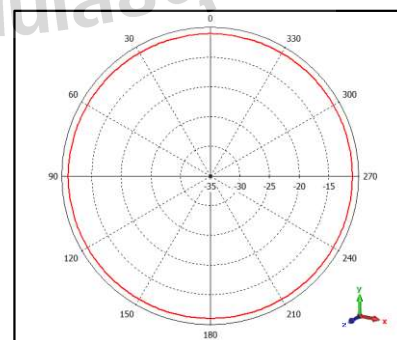
(ก) แบบจำลองสายอากาศ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศ ( $S_{11}$ )



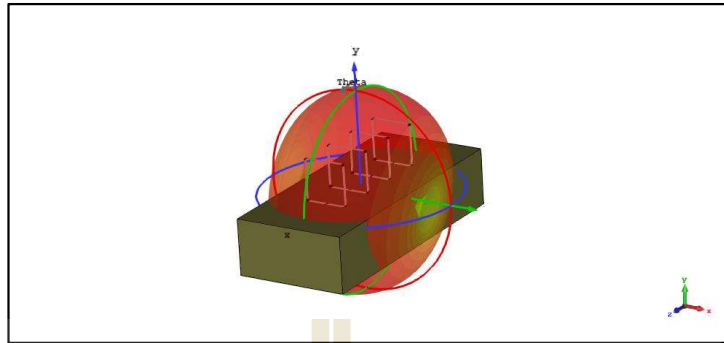
(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.13 ผลการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์



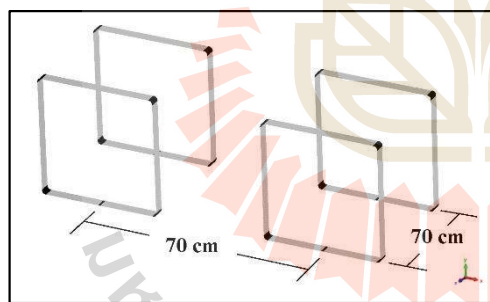


รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

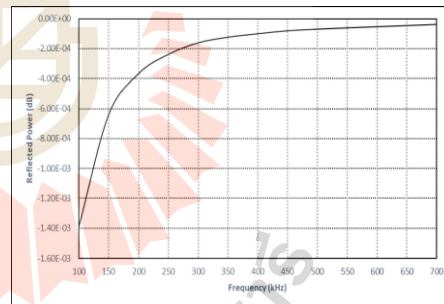
### 3.9 การจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

#### 3.9.1 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

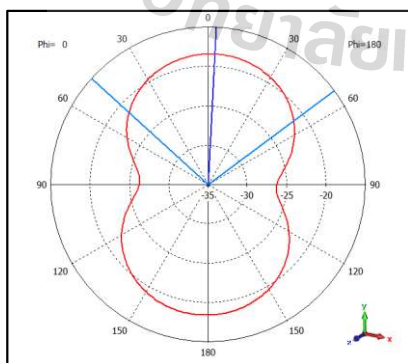
ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 ออกแบบและจำลองสายอากาศแบบบ่วง 4 อีลิเมนต์ ที่จัดวางสายอากาศ 2x2 อีลิเมนต์ แนวตั้งบนพื้นดิน มีระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์เท่ากับ 70 เซนติเมตร จากจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 1 ไปยังจุดบ่อนสัญญาณต้นที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งแสดงโครงสร้างของสายอากาศดังรูปที่ 3.15 (ก) ซึ่งผลการจำลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) เท่ากับ  $-0.0002$  dB ดังแสดงรูปที่ 3.15 (ข) และแบบรูปการแผ่กำลังในสนามไฟฟ้า (E-plan) และสนามแม่เหล็ก (H-plan) ดังแสดงรูปที่ 3.15 (ค) และ (ง) และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ  $-17.78$  dBi ดังแสดงรูปที่ 3.16



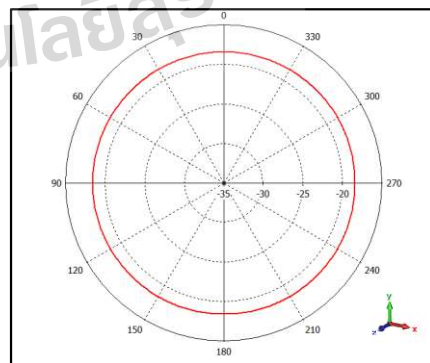
(ก) แบบจำลองสายอากาศ



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ สายอากาศ ( $S_{11}$ )

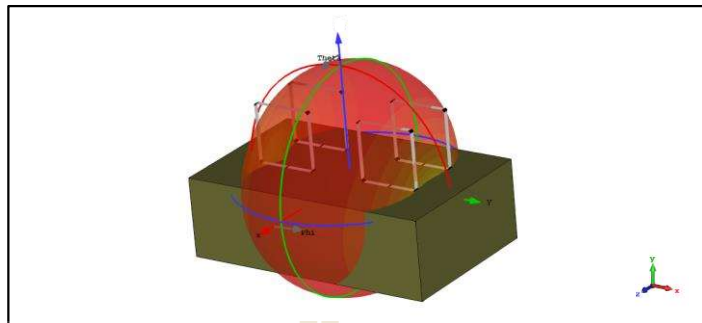


(ค) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามไฟฟ้า



(ง) แบบรูปการแผ่กำลังระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.15 ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงจำนวน 4 อีลิเมนต์



รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่กำลัง 3 มิติของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

ออกแบบสายอากาศขนาดเล็กและจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 พบว่าระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์วางแนวนอน มี Half-power beamwidth เท่ากับ  $-37.3$  dbi และทิศทาง Main lobe พุ่งออกมุม 34 องศา และระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์วางแนวตั้งมี Half-power beamwidth เท่ากับ  $-26$  dbi และทิศทาง Main lobe พุ่งออกมุม 45 องศา

ระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ มี Half power beamwidth เท่ากับ  $-24.9$  dbi และมีทิศทาง Main lobe พุ่งออกที่มุม 164 องศา และสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ มี Half power beamwidth เท่ากับ  $-21.1$  dbi และทิศทาง Main lobe พุ่งออกที่มุม 20 องศา

ระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ มี Half power beamwidth เท่ากับ  $-17.2$  dbi และมีทิศทาง Main lobe พุ่งออกที่มุม 169 องศา สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ มี Half power beamwidth เท่ากับ  $-11$  dbi และมีทิศทาง Main lobe พุ่งออกที่มุม 169 องศา และสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ มี Half power beamwidth เท่ากับ  $-18.4$  dbi และมีทิศทาง Main lobe พุ่งออกที่มุม 3 องศา

### 3.10 ผลการทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

พารามิเตอร์	สายอากาศ แบบบ่วง 1 อีลิเมนต์ วาง แนวอน	สายอากาศ แบบบ่วง 1 อีลิเมนต์ วางแนวตั้ง	สายอากาศ แถวลำดับ แบบบ่วง 1x2 อีลิเมนต์	สายอากาศ แถวลำดับ แบบบ่วง 2x1 อีลิเมนต์	สายอากาศ แถวลำดับ แบบบ่วง 1x4 อีลิเมนต์	สายอากาศ แถวลำดับ แบบบ่วง 4x1 อีลิเมนต์	สายอากาศ แถวลำดับ แบบบ่วง 2x2 อีลิเมนต์
ค่าประสิทธิภาพ การแผ่กำลัง (Radiation efficiency)	14.57 dB	-4.20 dB	-0.30 dB	6.97 dB	-0.16 dB	1.21 dB	7.80 dB
สภาพเจาะจง ทิศทาง (Directivity)	-35.34 dBi	-25.35 dBi	-23.29 dBi	-21.03 dBi	-17.23 dBi	-10.83 dBi	-17.78 dBi
อัตราขยาย (Gain)	-20.77 dBi	-29.55 dBi	-23.60 dBi	-14.06 dBi	-17.39 dBi	-9.62 dBi	-9.98 dBi
กระแสพื้นผิว (Surface current)	74.47 A/m	76.58 A/m	83.01 A/m	95.59 A/m	103.91 A/m	115.12 A/m	105.67 A/m

จากตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก ผลการจำลองค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก มีค่าเท่ากับ 14.57 dB, -4.20 dB, -0.30 dB, 6.97 dB, -0.16 dB, 1.21 dB และ 7.80 dB ตามลำดับ ผลการจำลองค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก มีค่าเท่ากับ -35.34 dBi, -25.35 dBi, -23.29 dBi, -21.03 dBi, -17.23 dBi, -10.83 dBi, และ -17.78 dBi ตามลำดับ ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก มีค่าเท่ากับ -20.77 dBi, -29.55 dBi, -23.60 dBi, -14.06 dBi, -17.39 dBi, -9.62 dBi และ -9.98 dBi ตามลำดับ ผลการจำลองค่ากระแสพื้นผิวของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก มีค่าเท่ากับ 74.47 A/m, 76.58 A/m, 83.01 A/m, 95.59 A/m, 103.91 A/m, 115.12 A/m และ 105.67 A/m ตามลำดับ

### 3.11 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์สายอากาศแบบบ่วงที่มีการใช้งานในย่านความถี่ 350 kHz โดยการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio Suite 2019 การออกแบบและจำลองสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก พร้อมจัดวางสายอากาศบนพื้นดิน สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมีความยาวด้านละ 70 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางยาว 1 เมตร โดยใช้สายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 แบบ รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส นำมาเป็นสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลัง สภาพเจาะจงทิศทาง อัตราขยาย และกระแสพื้นผิว โดยการออกแบบจำลองสายอากาศและทำการวัดค่าและบันทึกค่าผลได้ดังตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าในตารางที่ 3.1 มีการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ 1 อีลิเมนต์ 2 อีลิเมนต์ และ 4 อีลิเมนต์ ขั้นตอนแรกเปรียบเทียบการจัดวางของสายอากาศ 1 อีลิเมนต์แบบแนวนอนและแนวตั้ง จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลัง การวางแนวนอนจะมีค่าสูงกว่าวางในแนวตั้ง มีค่าเท่ากับ 10.37 db ต่อมาเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การวางแนวตั้งจะมีค่าสูงกว่าวางในแนวนอน มีค่าเท่ากับ 9.99 dbi ต่อมาเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย การวางแนวนอนจะมีค่าสูงกว่าวางแนวตั้ง มีค่าเท่ากับ 8.78 dbi และการเปรียบเทียบค่ากระแสพื้นผิว การวางแนวตั้งจะมีค่าสูงกว่าวางในแนวนอน มีค่าเท่ากับ 2.11 A/m เมื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ จะพบว่าการจัดวางแนวนอนมีค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลังและค่าอัตราขยาย มีค่าสูงกว่าจัดวางแนวตั้งก็จริง แต่ที่เลือกในการจัดวางสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กแนวตั้งเพราะว่า โพลาริซัชันและรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กตรงกับสายอากาศแบบฝังลงพื้นโลกที่เป็นภาคส่งเมื่อนำไปใช้งานในถ้ำ ดังนั้นการจัดวางแนวตั้งจึงนำมาเลือกใช้ในการจัดแถวลำดับของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ และ 4 อีลิเมนต์

ต่อมาเป็นการจัดแถวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ แบบ 1x2 อีลิเมนต์ และ 2x1 อีลิเมนต์ จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลัง การจัดแถวลำดับแบบ 2x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x2 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 7.27 db ต่อมาเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การจัดแถวลำดับแบบ 2x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x2 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 2.26 dbi ต่อมาเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย การจัดแถวลำดับแบบ 2x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x2 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 9.54 dbi และการเปรียบเทียบค่ากระแสพื้นผิวการจัดแถวลำดับแบบ 2x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x2 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 12.58 A/m เมื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ จะพบว่าการจัดแถวลำดับแบบ 2x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x2 อีลิเมนต์ ทุกพารามิเตอร์

ต่อมาเป็นการจัดแถวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ แบบ 1x4 อีลิเมนต์ 4x1 อีลิเมนต์ และ 2x2 อีลิเมนต์ จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลัง การจัดแถวลำดับแบบ 2x2 อีลิ

เมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x4 อีลิเมนต์ และการจัดแถวลำดับแบบ 4x1 อีลิเมนต์ มีค่าเท่ากับ 7.96 db และ 6.59 db ต่อมาเปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางการจัดแถวลำดับแบบ 4x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x4 อีลิเมนต์ และการจัดแถวลำดับแบบ 2x2 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 6.4 dbi และ 6.95 dbi ต่อมาเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย การจัดแถวลำดับแบบ 4x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x4 อีลิเมนต์ และการจัดแถวลำดับแบบ 2x2 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 8.31 dbi และ 0.36 dbi และการเปรียบเทียบค่ากระแสพื้นผิวการจัดแถวลำดับแบบ 4x1 อีลิเมนต์ มีค่าสูงกว่าการจัดแถวลำดับแบบ 1x4 อีลิเมนต์ และการจัดแถวลำดับแบบ 2x2 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 11.21 A/m และ 9.45 A/m

เมื่อนำมาวิเคราะห์ทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า การจัดแถวลำดับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ จัดวางแบบ 4x1 อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ วางแนวตั้ง มีค่าประสิทธิภาพการแผ่กำลังสูงกว่า 5.41 db ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงกว่า 14.52 dbi ค่าอัตราขยายสูงกว่า 19.93 dbi และค่ากระแสพื้นผิวสูงกว่า 38.54 A/m จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด ทำให้เห็นว่าถ้านำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาจัดแถวลำดับแบบ 4x1 อีลิเมนต์ ไปวัดทดสอบจะสามารถเหนี่ยวนำกระแสจากพื้นโลกได้มากขึ้นและส่งผลให้รับสัญญาณได้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน จากนั้นนำไปสร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กขึ้นมาและทำการทดสอบการจัดรูปแบบการวางและระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ ที่เหมาะสมที่สุด





## บทที่ 4

### การสร้างและวัดทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

จากทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการนำแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio Suite 2019 ที่ได้จากบทที่ 3 มาทำการสร้างขึ้นให้เป็นสายอากาศต้นแบบและจะทำการวัดเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้จะเป็นสายอากาศแบบบ่วง โดยจะนำเส้นลวดที่มีขนาด 1 มิลลิเมตรต่อเส้นจำนวน 60 เส้น มาทำการขดให้เป็นบ่วงที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีการใช้งานย่านความถี่ 350 kHz โดยให้สายอากาศทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ 350 kHz ซึ่งขนาดที่ได้สร้างสายอากาศมีขนาดความยาวคลื่นเพื่อที่จะทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่จนเกินไป

#### 4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็ก

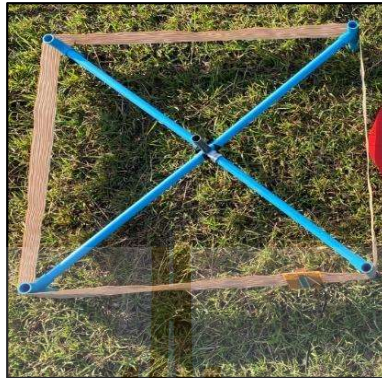
เมื่อได้ผลการจำลองของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio Suite 2019 จึงทำการสร้างสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็กในย่านความถี่ 350 kHz สายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็กถูกออกแบบโดยใช้สายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 เส้น มีความยาว 2.8 เมตร นำมาทำให้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความยาวด้านข้างด้านละ 70 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็ก

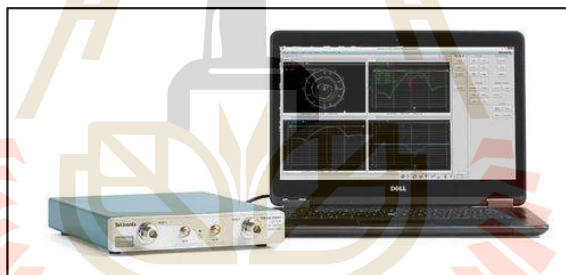


### 4.3 การทดสอบสายอากาศแบบป่วงขนาดเล็กวงแนวนอน



รูปที่ 4.2 สายอากาศแบบป่วงขนาดเล็กวงแนวนอน

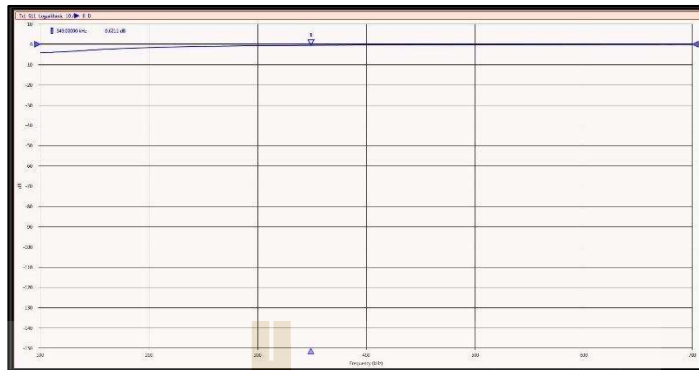
ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแบบป่วงขนาดเล็กวงแนวนอน ดังรูปที่ 4.2 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC ดังรูปที่ 4.3 เพื่อดูผล (<https://imex.co.uk/TEK-TTR503A-USB-Vector-Network-Analyzer-100-KHz-to-3-GHz>)



รูปที่ 4.3 เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A

#### 4.3.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศแบบป่วงขนาดเล็กที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$  ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$  ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-0.621 \text{ dB}$  ดังรูปที่ 4.4 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $204.222 + j560.806 \ \Omega$



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.4 การทดสอบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวงแนวตั้ง



รูปที่ 4.5 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวงแนวตั้ง

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงวงแนวตั้ง ดังรูปที่ 4.5 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อดูผล

##### 4.4.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$  ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-0.502$  dB ดังรูปที่ 4.6 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $357.507+j703.531 \Omega$



รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.5 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

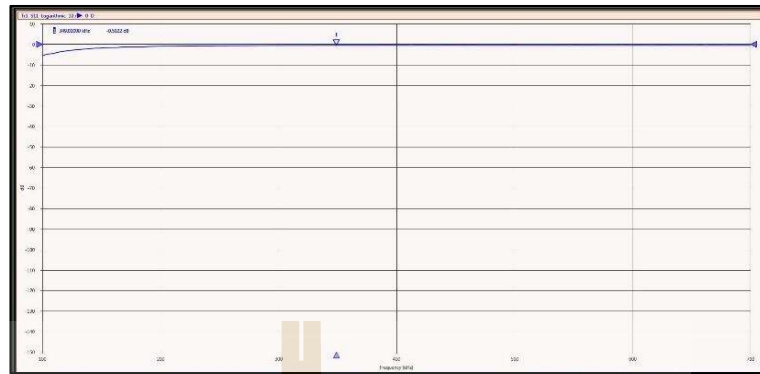


รูปที่ 4.7 สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.7 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อดูผล

##### 4.5.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-0.592$  dB ดังรูปที่ 4.8 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $334.896 + j619.883 \Omega$



รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.6 การทดสอบสายอากาศแฉวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์



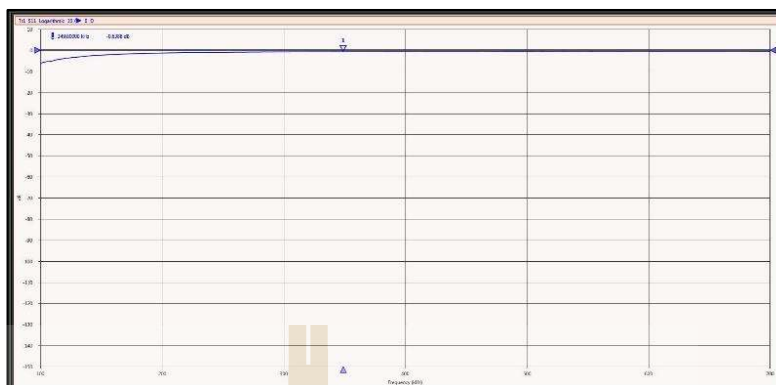
รูปที่ 4.8 สายอากาศแฉวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแฉวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.9 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อดูผล

##### 4.6.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศแบบปวงขนาดเล็กที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-0.638$  dB ดังรูปที่ 4.10 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $302.260 + j576.879 \Omega$





รูปที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.7 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

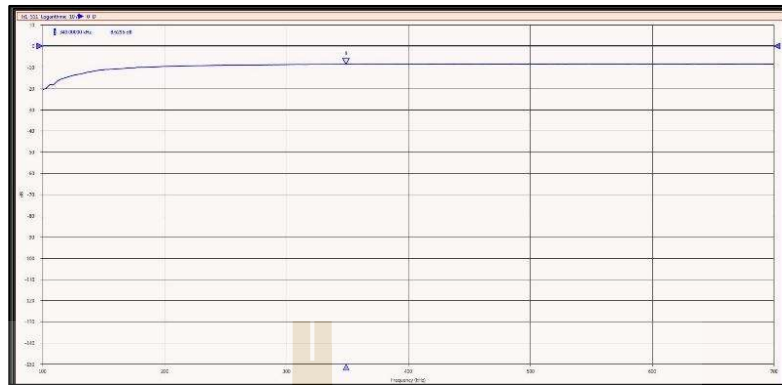


รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.11 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อดูผล

##### 4.7.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-8.6296$  dB ดังรูปที่ 4.12 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $108.002+j7.130 \Omega$



รูปที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.8 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.13 สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.12 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อแสดงผล

##### 4.8.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศต้นแบบแบบปวงที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ -8.868 dB ดังรูปที่ 4.14 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $106.591+j3.214 \Omega$





รูปที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

#### 4.9 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

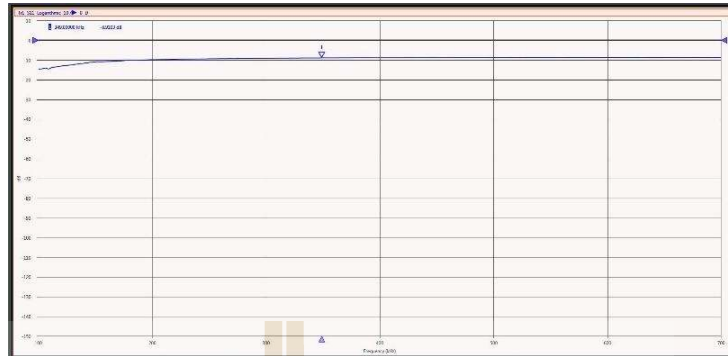


รูปที่ 4.15 สายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบปวงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 4.15 นำมาทดสอบที่สนามหญ้าโล่งเพื่อมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และวัดค่าอิมพีแดนซ์ ใช้เครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A โดยใช้โปรแกรม Vector VU-PC เพื่อดูผล

##### 4.9.1 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ )

ในการวัดสายอากาศต้นแบบแบบปวงที่ทำขึ้นมานั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ได้จากเครื่องมือวัดสายอากาศของเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ TTR506A แล้วต่อเข้ากับโปรแกรม Vector VU-PC ในคอมพิวเตอร์กำหนดช่วงความถี่ระหว่าง 100-700 kHz โดยจะกำหนดความถี่ที่ใช้งานคือ 350 kHz เชื่อมสายนำสัญญาณจาก Port1 ที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไปยังสายอากาศ เลือกโหมด Format แล้วเลือก log Mag เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ความถี่ 350 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-8.910$  dB ดังรูปที่ 4.16 และวัดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $105.818 + j1.828 \Omega$

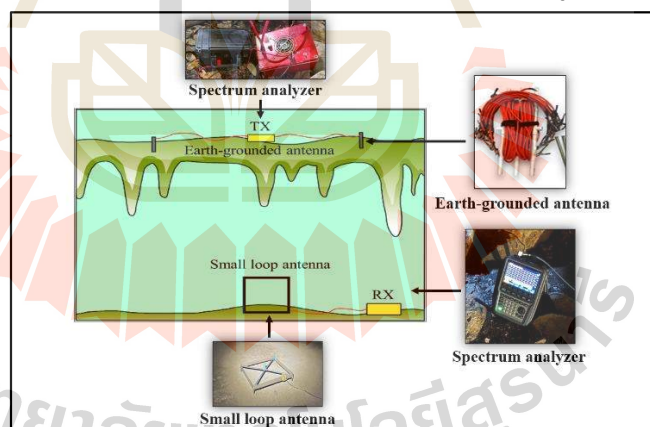


รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ  $S_{11}$

## 4.10 การทดสอบสายอากาศต้นแบบแบบปวงในถ้ำ

### 4.10.1 การวัดทดสอบการแพร่แบบคลื่นความถี่คลื่นดินภายในถ้ำ

ทำการวัดทดสอบโดยใช้หลักการสื่อสารแบบ TTE (Trough-The-Earth Communications) ซึ่งในครั้งนี้ได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm หรือ 5.37 วัตต์ และเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัมต่อเข้ากับสายอากาศแบบปวงขนาดเล็ก นำมาเป็นภาครับ โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 350 kHz และจัดเตรียมแท่งอิเล็คโทรดและลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีความยาวเท่ากับที่ระบบของ HeyPhone โดยใช้สายอากาศ Earth-grounded antenna เป็นสายอากาศภาคส่ง นำมาใช้งานทดสอบดังรูปที่ 4.17

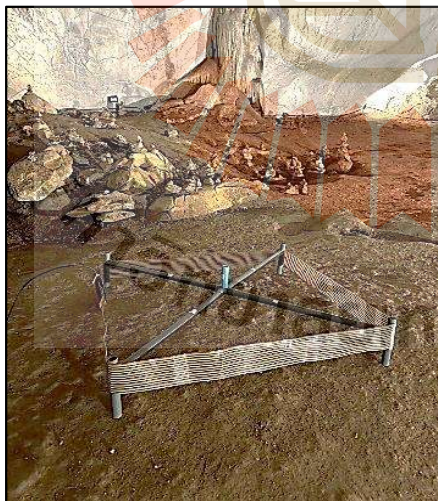


รูปที่ 4.17 การวัดทดสอบการแพร่คลื่นความถี่ 350 kHz ผ่านพื้นโลก (TTE) ที่ถ้ำพระโพธิสัตว์สระบุรี



รูปที่ 4.18 แสดงเส้นทางและตำแหน่งพิกัดของโพรงถ้ำพระโพธิสัตว์จากมุมมองด้านบนภูเขา จากรูปที่ 4.18 เป็นภาพถ่ายดาวเทียม จุดที่ 1 ถึงจุดที่ 4 เป็นเส้นทางเดินขึ้นภูเขา ต่อมาจุดที่ 5 เป็นจุดวางสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กภายในถ้ำ เพื่อทดสอบระบบภาครับสัญญาณจากบนภูเขา ซึ่งจุด A เป็นจุดตั้งระบบภาคส่งสัญญาณบนภูเขาลงมายังภาครับสัญญาณโดยใช้สายอากาศ Earth-grounded antenna ซึ่งมีแท่งโลหะอยู่ที่ปลายแต่ละด้านของเส้นลวดที่ปักอยู่ในดิน ซึ่งจุด A และจุดที่ 5 มีระยะห่าง 12.5 เมตร และความหนาของเพดานถ้ำอยู่ที่ประมาณ 3 เมตร

ขั้นตอนแรก เราจะกำหนดการจัดวางแนวสายอากาศในรูปแบบทั้งแนวนอนและแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.19



(ก) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวนอน



(ข) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวตั้ง

รูปที่ 4.19 การจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วง 1 อีลิเมนต์

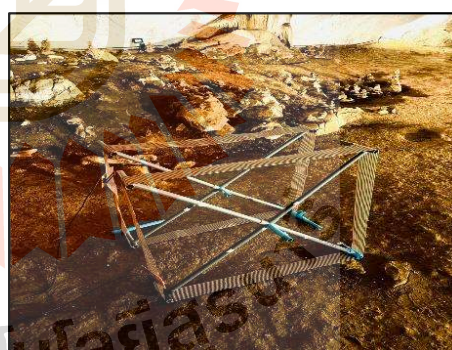


ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์

สายอากาศแบบบ่วง 350 kHz วางแนวนอน	สายอากาศแบบบ่วง 350 kHz วางแนวตั้ง
กำลังของสัญญาณ (dBm)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
-57.1	-52.9

จากตารางที่ 4.1 ผลการวัดที่ระยะ 12.5 เมตร กำลังสัญญาณที่ได้รับจากสเปกตรัมในรูปแบบแนวนอนได้ที่ -57.1 dBm ในขณะที่สายอากาศที่จัดวางในรูปแบบแนวตั้งมีค่ากำลังของสัญญาณที่ได้รับได้เท่ากับ -52.9 dBm ที่ความถี่ 350 kHz ด้วยเหตุนี้ การวางในรูปแบบแนวตั้งของสายอากาศต้นแบบแบบบ่วง จึงได้รับการยอมรับว่าเป็นการกำหนดค่าที่เลือกไว้สำหรับการวัดการจัดแวลำดับครั้งต่อไป

การทดสอบต่อมา นำสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงที่จัดรูปแบบการวางในแนวตั้ง นำมาจัดแวลำดับจำนวน 2 อีลิเมนต์ ในแบบเชิงเส้น โดยมีระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง 12.5 เมตร หลังจากนั้นหาระยะห่างระหว่างของแต่ละอีลิเมนต์ (d) ที่เหมาะสมและดีที่สุดโดยการพิจารณากำลังของสัญญาณที่ได้รับได้ ระยะห่างตั้ง 10 เซนติเมตรถึง 100 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.20



(ก) การจัดวางสายอากาศแวลำดับ 1x2

(ข) การจัดวางสายอากาศแวลำดับ 2x1

รูปที่ 4.20 การจัดแวลำดับ 2 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการจัดแถวลำดับ 2 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ระยะห่าง(d) (cm)	กำลังของสัญญาณ (dBm)	
	จัดแถวลำดับ 1x2 อีลิเมนต์	จัดแถวลำดับ 2x1 อีลิเมนต์
10	-56.4	-44.5
20	-55.6	-51.4
30	-55.5	-44.5
40	-55.6	-44.4
50	-55.5	-44.5
60	-55.3	-44.4
70	-55.2	-44.3
80	-55.6	-44.4
90	-55.4	-44.5
100	-56.2	-44.6

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร ส่งผลให้ได้ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -44.3 dBm และ -55.2 dBm ตามลำดับ สำหรับการจัดเรียงในรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศจัดแถวลำดับ 2 อีลิเมนต์ และการจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ค่ากำลังของสัญญาณที่สูงกว่า การจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้ง 2 อีลิเมนต์ เพิ่มขึ้นประมาณ 8.6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ การทดสอบต่อมานำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่จัดรูปแบบการวางในแนวตั้ง นำมาจัดแถวลำดับจำนวน 4 อีลิเมนต์ แบ่งการทดสอบการจัดแถวลำดับที่แตกต่างกันออกไปเป็น 3 แบบการทดสอบ โดยมีระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง 12.5 เมตร หลังจากนั้นหาระยะห่างระหว่างของแต่ละอีลิเมนต์ (d) ที่เหมาะสมและดีที่สุดโดยการพิจารณากำลังของสัญญาณที่รับได้ ระยะห่างตั้ง 10 เซนติเมตรถึง 100 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.21



(ก) การจัดวางสายอากาศแถวลำดับ 1x4



(ข) การจัดวางสายอากาศแถวลำดับ 4x1



(ค) การจัดวางสายอากาศแถวลำดับ 2x2

รูปที่ 4.21 การจัดแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการจัดแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก

ระยะห่าง(d) (cm)	กำลังของสัญญาณ (dBm)		
	จัดแถวลำดับ	จัดแถวลำดับ	จัดแถวลำดับ
	1x4 อีลิเมนต์	4x1 อีลิเมนต์	2x2 อีลิเมนต์
10	-43.6	-33.6	-43.8
20	-44.4	-33.4	-43.7
30	-43.4	-37.5	-43.8
40	-43.6	-33.6	-44.6
50	-45.4	-33.5	-43.9
60	-43.4	-33.4	-43.7
70	-43.2	-33.1	-43.6
80	-45.5	-33.8	-43.8
90	-44.4	-33.7	-44.9
100	-45.2	-33.6	-44.7



จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร ส่งผลให้ได้ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -43.2 dB, -33.1 dB และ -43.6 dB ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กวางแนวตั้งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยอยู่ที่ 9.7dB, 19.8 dB และ 9.3 dB ตามลำดับ

#### 4.10.2 การเปรียบเทียบผลการวัดกำลังของสัญญาณที่ได้รับ

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดกำลังของสัญญาณที่รับได้ การจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์, การจัดแถวลำดับ 2 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กได้แก่ การจัดวางสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ และการจัดวางสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์, การจัดแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ของสายอากาศแบบบ่วง ได้แก่ การจัดวางสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ การจัดวางสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ และ การจัดวางสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ที่ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการวัดกำลังของสัญญาณที่ได้รับ

รูปแบบการจัดวางสายอากาศแบบบ่วง 350 kHz	กำลังของสัญญาณ (dBm)
แนวตั้ง 1 อีลิเมนต์	-52.9
จัดแถวลำดับ 1x2 อีลิเมนต์	-55.2
จัดแถวลำดับ 2x1 อีลิเมนต์	-44.3
จัดแถวลำดับ 1x4 อีลิเมนต์	-43.2
จัดแถวลำดับ 4x1 อีลิเมนต์	-33.1
จัดแถวลำดับ 2x2 อีลิเมนต์	-43.6

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการวัดทดสอบดังตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศแบบ บ่วงขนาดเล็กมาเพิ่มเป็น 2 อีลิเมนต์และ 4 อีลิเมนต์ มาจัดแถวลำดับกัน ทำให้พบว่าการกำลังของ สัญญาณที่รับได้สูงขึ้น โดยเฉพาะสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ของการจัดเรียงรูปแบบ แนวตั้งในรูปแบบจัดแถวลำดับ 4x1 อีลิเมนต์ ซึ่งมีระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วงแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ มี ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับสูงกว่า 19.8 dB

#### 4.11 การทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศเมื่อวางอยู่พื้นดิน

##### 4.11.1 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.22 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบในรูปแบบการวางแนวนอน (Horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็น สายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นตามตารางที่ 4.5

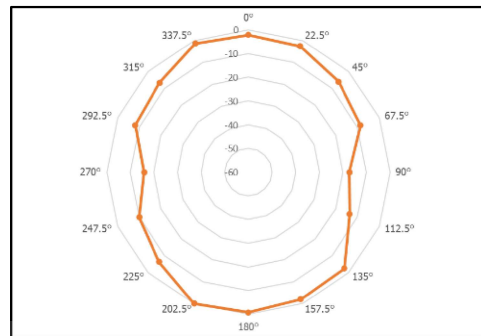
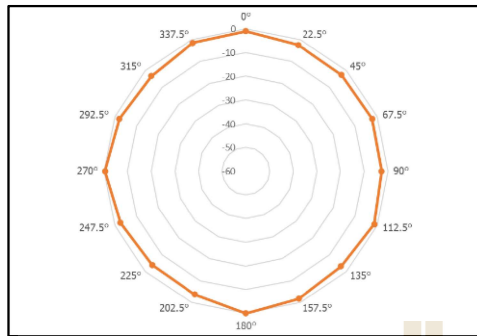


(ก) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวนอน



(ข) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวตั้ง

รูปที่ 4.22 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์



(ก) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวนอน

(ข) สายอากาศแบบบ่วงวางแนวตั้ง

รูปที่ 4.23 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 1 อีลิเมนต์

ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)	
	สายอากาศแบบบ่วงวางแนวนอน	สายอากาศแบบบ่วงวางแนวตั้ง
0°	-48	-45
22.5°	-49.5	-45.5
45°	-49.8	-49
67.5°	-49.3	-51.5
90°	-49.7	-60
112.5°	-48.3	-56.4
135°	-50.2	-45.4
157.5°	-48.7	-44.9
180°	-47	-43.7
202.5°	-50.7	-42.9
225°	-51	-49.4
247.5°	-49.7	-52.9
270°	-47.5	-58.7
292.5°	-49.1	-51
315°	-50.4	-49.7
337.5°	-48.5	-44.2

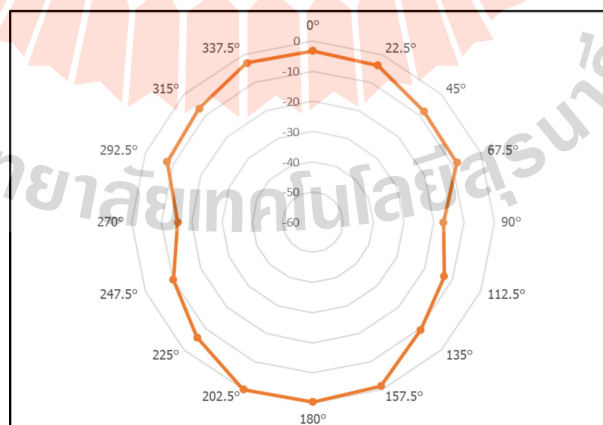
#### 4.11.2 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก

##### 1x2 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.24 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็นสายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นตามตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.24 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.25 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์

ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
	จัดแถวลำดับ 1x2 อีลิเมนต์
0°	-43
22.5°	-43.5
45°	-47.8
67.5°	-48.1
90°	-56.5
112.5°	-52.7
135°	-49.3
157.5°	-40.9
180°	-40.1
202.5°	-39.7
225°	-45.6
247.5°	-49.8
270°	-55
292.5°	-47.6
315°	-46.5
337.5°	-42.6



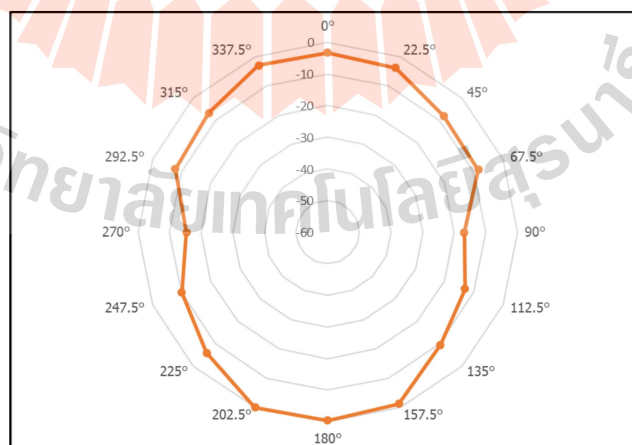
#### 4.11.3 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก

##### 2x1 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.26 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็นสายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นไปตามตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.26 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.27 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์



ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์

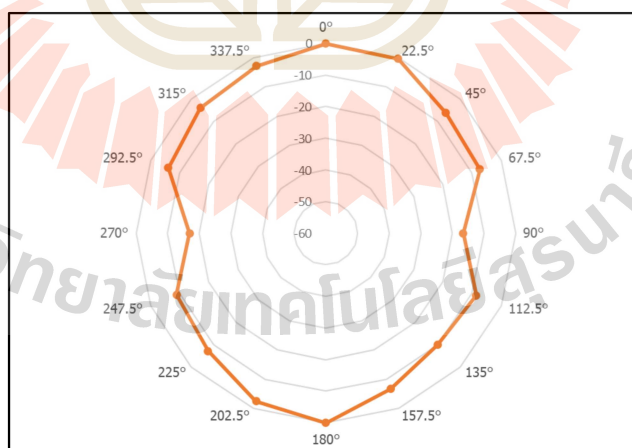
ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
	จัดแถวลำดับ 2x1 อีลิเมนต์
0°	-38.2
22.5°	-40.6
45°	-45.4
67.5°	-45.4
90°	-54.6
112.5°	-49.6
135°	-49.3
157.5°	-42.9
180°	-38.7
202.5°	-38.7
225°	-45.6
247.5°	-46.9
270°	-55.7
292.5°	-45.5
315°	-42.7
337.5°	-40.6

#### 4.11.4 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.28 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็นสายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นตามตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.28 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์

ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
	จัดแถวลำดับ 1x4 อีลิเมนต์
0°	-36.4
22.5°	-36.6
45°	-42.6
67.5°	-43.6
90°	-52.9
112.5°	-44.8
135°	-46.3
157.5°	-42.9
180°	-36.3
202.5°	-38.7
225°	-43.6
247.5°	-45.3
270°	-53.3
292.5°	-42.4
315°	-40.3
337.5°	-39.1

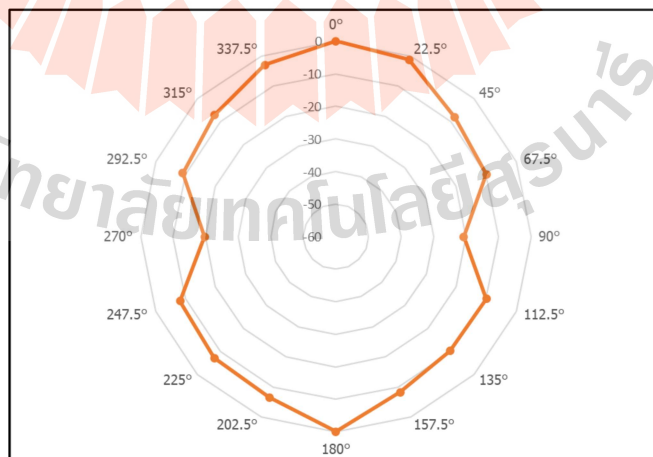
#### 4.11.5 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก

##### 4x1 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.30 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็นสายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นตามตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.30 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.31 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์

ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
	จัดแถวลำดับ 4x1 อีลิเมนต์
0°	-32.2
22.5°	-33.4
45°	-40.5
67.5°	-42.1
90°	-52.9
112.5°	-42.1
135°	-42.6
157.5°	-40.4
180°	-32.3
202.5°	-38.7
225°	-39.4
247.5°	-40.4
270°	-51.9
292.5°	-41.3
315°	-39.4
337.5°	-35.2



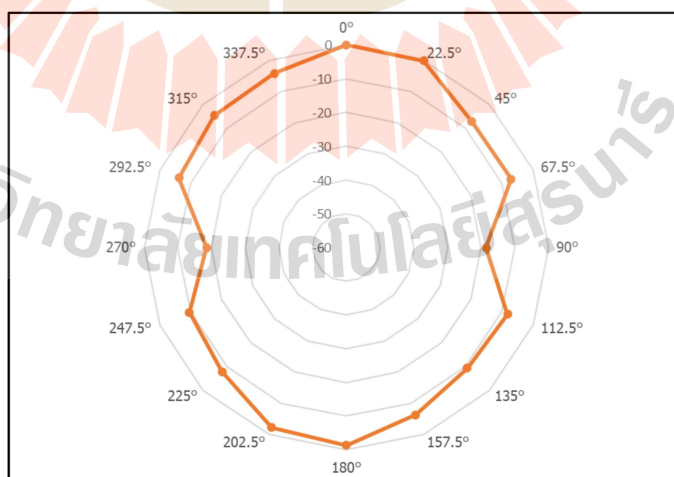
#### 4.11.6 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก

##### 2x2 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 4.32 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ โดยการทดสอบจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง (ออกแบบและสร้างขึ้นมาเอง) มีกำลังส่ง 38.31 dBm (5.37 วัตต์) ต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงเป็นภาคส่งและนำ Antenna Module มาเป็นสายอากาศภาครับและทำการหาค่าตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา โดยวัดทีละ 22.5 องศา ทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ซึ่งผลของการทดสอบสายอากาศที่ได้จะเป็นตามตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.32 แสดงวิธีการวัดทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์



รูปที่ 4.33 แสดงตำแหน่งของการวัดการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์

ทิศทาง(องศา)	กำลังของสัญญาณ (dBm)
	จัดแถวลำดับ 2x2 อีลิเมนต์
0°	-35.3
22.5°	-35.4
45°	-42.6
67.5°	-42.4
90°	-53.8
112.5°	-43.5
135°	-44.6
157.5°	-41.6
180°	-36.7
202.5°	-37.5
225°	-43.2
247.5°	-44.9
270°	-53.8
292.5°	-41.5
315°	-39.9
337.5°	-39.5

#### 4.12 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบแบบบ่วงขนาดเล็ก ที่นำสายอากาศของ HeyPhone ที่สร้างขึ้นมาจากสายนำสัญญาณแบบหลายแถบจำนวน 60 เส้น ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มาเป็นต้นแบบในงานวิจัยนี้ที่ย่านความถี่ 350 kHz ซึ่งออกแบบสายอากาศให้มีความยาวเท่ากับ  $1/50$  ของความยาวคลื่นสำหรับความถี่การทำงานที่ 350 kHz การศึกษาและทดสอบเรื่องการจัดวางสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับการสื่อสารผ่านพื้นดิน ถ้าพระโพธิสัตว์ จ.สระบุรี โดยการวัดสัญญาณที่ส่งลงมาจากบนถ้ำ การวิเคราะห์ข้อมูลผลการวัด แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาเพิ่มเป็น 2 อีลิเมนต์และ 4 อีลิเมนต์ มาจัดแถวลำดับกัน ทำให้พบว่กำลังของสัญญาณที่รับได้สูงขึ้น โดยเฉพาะสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ของการจัดเรียงรูปแบบแนวตั้งในรูปแบบจัดแถวลำดับ  $4 \times 1$  อีลิเมนต์ ซึ่งมีระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วงแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้สูงกว่า 19.8 dB



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ด้วยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก สำหรับย่านความถี่กลาง เพื่อนำมาทำเป็นระบบสื่อสารแบบไร้สายไปใช้งานภายในถ้ำ ซึ่งปัจจุบัน อุปกรณ์เครื่องมือสื่อสารที่จะนำไปใช้งานภายในถ้ำนั้นจะใช้ความถี่สูง เมื่อนำไปใช้งานภายในถ้ำนั้นจะส่งผลให้สื่อสารได้ในระยะทางที่สั้นเนื่องจากคลื่นเกิดการเลี้ยวเบน ไปตามผนังต่อได้และที่สำคัญที่สุดคือมีค่าความลึกผิว ของคลื่นยาวความถี่ต่ำสามารถเดินทางแทรกเข้าไปในพื้นที่ผิวผนังได้มาก เมื่อผนังถ้ำมีความนำสูง ดังนั้นจึงทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศแบบบ่วงที่มีความถี่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบสายอากาศที่มีความถี่ต่ำจะส่งผลทำให้สายอากาศแบบบ่วงมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่ยาวมากจึงทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานภายในถ้ำได้

หลังจากนั้นจึงได้ศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับระบบสื่อสารภายในถ้ำ ได้พบว่า มีระบบสื่อสารที่ใช้งานภายในถ้ำ ระบบสื่อสารเรียกว่า การสื่อสารผ่านพื้นดิน ซึ่งระบบสื่อสารใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ต่ำส่งคลื่นลงผ่านไปยังพื้นผิวดินและใต้ดิน ระบบวิทยุสื่อสารสำหรับใช้ในถ้ำนี้มีชื่อว่า HeyPhone ซึ่งใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารจากในถ้ำออกมาภายนอกถ้ำ ใช้ความถี่ 87 kHz ระบบสื่อสาร HeyPhone นี้จะใช้สายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 1 เมตร ซึ่งสามารถติดตั้งสื่อใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว แต่จะถูกจำกัดด้วยระยะทางที่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลมากนัก

หลังจากนั้นได้ศึกษาและพบว่าค่างค้าวหลายพันธุ์จะใช้สัญญาณคลื่นความถี่อัลตราโซนิกในการสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าเพื่อวัดระยะทาง ที่ความถี่ 20 kHz – 200 kHz จึงหลีกเลี่ยงในการใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า 300 kHz

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำสายอากาศแบบบ่วงของ HeyPhone นำมาเป็นต้นแบบ จากนั้นจึงทำการจำลองโครงสร้างเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผล เพื่อหาการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสายอากาศแบบบ่วงสำหรับใช้งานที่ย่านความถี่ 350 kHz โดยหาการลักษณะการจัดวางของสายอากาศที่เหมาะสม เมื่อได้ลักษณะการจัดวางของสายอากาศแล้ว จึงนำสายอากาศมาจัดแถวลำดับ 2 อีลิเมนต์ 4 อีลิเมนต์ และหาระยะห่างที่เหมาะสม จะพบว่า การนำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาจัดแถวลำดับนั้น มีค่าอัตราขยายที่สูงขึ้น เมื่อนำสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วง 4x1 อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับสายอากาศแบบบ่วง 1 อีลิเมนต์ ที่การจัดวางแบบแนวนอนและการจัดวางแบบแนวตั้ง เท่ากับ

11.15 dBi และ 10.17 dBi ตามลำดับ และจะสังเกตได้ว่าค่ากระแสพื้นผิวสูงขึ้น เมื่อนำสายอากาศ แถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ เปรียบเทียบกับสายอากาศแบบบ่วง 1 อีลิเมนต์ เท่ากับ 40.65 A/m และ 38.54 A/m จึงคิดว่าถ้านำไปวัดสอบจะสามารถเห็นย่นำกระแสจากพื้นโลกได้มากขึ้นด้วยและส่งผลให้รับสัญญาณได้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน จากนั้นนำไปสร้างโครงสร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กขึ้นมาและทำการทดสอบการจัดรูปแบบการวางและระยะห่างแต่ละอีลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด

จากนั้นสร้างสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กที่ความถี่ 350 kHz นำมาศึกษาและทดสอบเรื่องการจัดวางสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กสำหรับการสื่อสารผ่านพื้นดิน ถ้าพระโพธิสัตว์ จ.สระบุรี ในสภาพแวดล้อมของถ้ำการวัดของเราเกี่ยวข้องกับกรวัดสัญญาณที่ส่งจากบนถ้ำ ลงมายังชั้นใต้พื้นผิวดิน ที่ตั้งระยะ 12.5 เมตร ภายในที่ทดสอบถ้ำ ซึ่งในครั้งนี้ได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นภาคส่ง มีกำลังส่ง 38.31 dBm หรือเท่ากับ 5.37 วัตต์และเครื่องวิเคราะห์แถบสเปกตรัมต่อเข้ากับสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก นำมาเป็นภาครับ โดยทำการทดสอบที่ความถี่ 350 kHz และได้จัดเตรียมแท่งอิเล็กโทรดและลวดตัวนำไฟฟ้าที่มีความยาวเท่ากับที่ระบบของ HeyPhone นำมาใช้งานทดสอบ

ขั้นตอนแรก เราจะกำหนดการจัดวางแนวสายอากาศในรูปแบบการวางแบบแนวนอนและแนวตั้ง จำนวน 1 อีลิเมนต์ ผลการทดสอบกำลังสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องสเปกตรัมในรูปแบบแนวนอนได้ที่ -57.1 dBm ในขณะที่สายอากาศที่จัดวางในรูปแบบแนวตั้งกำลังของสัญญาณที่รับได้ -52.9 dBm การวางในรูปแบบการวางแนวตั้งของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก จึงได้รับการยอมรับว่าเป็นการกำหนดค่าที่เลือกไว้สำหรับการวัดการจัดแถวลำดับ

หลังจากนั้นจึงได้นำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 2 อีลิเมนต์ นำมาจัดแถวลำดับกันและหาระยะห่างระหว่างของแต่ละอีลิเมนต์ที่เหมาะสมและดีที่สุด ระยะห่างตั้งแต่ 10 เซนติเมตรถึง 100 เซนติเมตร ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร ผลการทดสอบ การจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x2 อีลิเมนต์ และการจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร ส่งผลให้ได้ค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -44.3 dBm และ -55.2 dBm ตามลำดับ ทำให้การจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x1 อีลิเมนต์ เพิ่มขึ้น 8.6 dB

หลังจากนั้นจึงได้นำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ นำมาจัดแถวลำดับกันและหาระยะห่างระหว่างของแต่ละอีลิเมนต์ที่เหมาะสมและดีที่สุด ระยะห่างตั้งแต่ 10 เซนติเมตรถึง 100 เซนติเมตร ระยะห่างที่เหมาะสมที่สุดระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร ผลการทดสอบการจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 1x4 อีลิเมนต์ การจัดเรียง



รูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ และการจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 2x2 อีลิเมนต์ ส่งผลให้ได้กำลังของสัญญาณที่รับได้เท่ากับ -43.2 dB, -33.1 dB และ -43.6 dB ตามลำดับ ทำให้การจัดเรียงรูปแบบวางแนวตั้งของสายอากาศแถวลำดับแบบบ่วงขนาดเล็ก 4x1 อีลิเมนต์ ค่ากำลังของสัญญาณได้สูงที่สุด

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการวัดทดสอบถ้าพระโพธิสัตว์ จ.สระบุรี แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กมาเพิ่มเป็น 2 อีลิเมนต์ 4 อีลิเมนต์ มาจัดแถวลำดับกัน ทำให้พบว่าการกำลังของสัญญาณที่รับได้สูงขึ้น โดยเฉพาะสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 4 อีลิเมนต์ของการจัดเรียงรูปแบบแนวตั้งในรูปแบบจัดแถวลำดับ 4x1 อีลิเมนต์ ซึ่งมีระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแต่ละอีลิเมนต์อยู่ที่ 70 เซนติเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการจัดวางแนวของสายอากาศแบบบ่วงแนวตั้ง 1 อีลิเมนต์ มีค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้สูงกว่า 19.8 dB

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

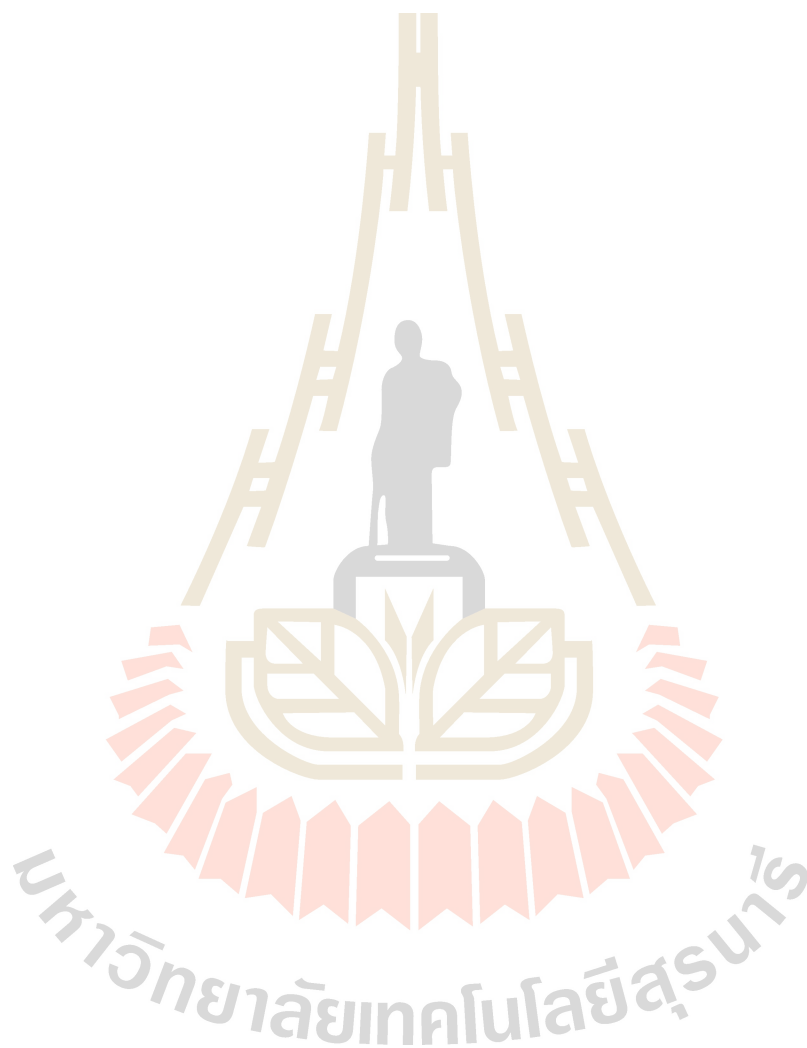
จากผลการสรุปของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบสายอากาศการจัดแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ การจัดเรียงรูปแบบแนวตั้งในรูปแบบจัดแถวลำดับ 4x1 อีลิเมนต์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กได้ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาซึ่งนำไปใช้งานในถ้าได้ทั่วประเทศ และไม่ยุ่งยากต้องการติดตั้งสายอากาศในพื้นที่ที่อยู่ภายในถ้าลึกๆ ได้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่าการออกแบบ วิเคราะห์ และผลการทดสอบ วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำไปเป็นประโยชน์ ในแนวทางการช่วยเหลือผู้ประสบภัยภายในถ้าหรือด้านต่างๆ ให้แก่ผู้ที่สนใจในเรื่องนี้

## เอกสารอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สรรคค์. (2555). วิศวกรรมสายอากาศ . นครราชสีมา ประเทศไทย: ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Howard, R. S., & Vaughan, H. D. (1998). Navy Electricity and Electronics Training Series, Module 10 : Introduction to Wave Propagation, Transmission Lines, and Antennas. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, Florida.
- M. Bedford, "Introducing a New Cave Radio for Rescue Use," BCRA Cave Radio & Electronics Group, Journal 41, September 2000.
- N. W. Damiano, L. Yan, B. Whisner, and C. Zhou, "Simulation and Measurement of Through-the-Earth, Extremely Low-Frequency Signals Using Copper-Clad Steel Ground Rods," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol: 53, No: 5, 5088-5095, 2017.
- L. Van and C. Sunderman, "Electric Field of Grounded Horizontal Line Transmitter for Through-the-Earth Communication," 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), Vol. 31, March 22-26, 2015, Virginia, USA.
- M. Bedford, J. Hey and B. J. Jopling. "A Loop Antenna for the HeyPhone." BCRA CAVE RADIO & ELECTRONICS GROUP, JOURNAL 50, DECEMBER 2002.
- M. Bedford, "Introducing the HeyPhone," C&C Magazine, pp.15-17, Autumn/winter 2001.
- J. Huri and C. Ebi, "Alpine Cave Radio-Earth-current at Holloch," Journal of BCRA Cave Radio & Electronics Group, No.25, September 1996.
- C. Trayner, "CRO HeyPhone Communications System Technical Reference Manual (Temporary)," No. 3, pp. 1-39, 23 June 2002.
- Joshi, Akshay, and S. K. Behera. "Method of Moments analysis of Circular loop linear array and Circular loop circular array." 2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). IEEE, 2016.

พีรสันต์ คำ สาลี, อรรถวิท จันทอุปสี, รัชสรรค์ วงศ์สรรคร์ วารสารงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์  
โดย สมาคม ECTI, 2022





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

### งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Suphawit Julthochai, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan, “An Experimental Study of Wave Propagation in Sandstone Cave,” the 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2023). Kuala Lumpur, Malaysia, 30 October - 2 November 2023, pp.1-2.

Suphawit Julthochai, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan, “Small Loop Antenna Arrangement Investigation for 350 kHz Through-the-Earth Communications in Limestone Cave” the 2024 International Electrical Engineering Congress (IEECON 2024). Pattaya Chonburi, Thailand 6-8 March 2024 , pp1-4.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



# An Experimental Study of Wave Propagation in Sandstone Cave

Suphawit Julthochai, Atawit Jantaupalee, Peerasan Khamsalee, and Rangsan Wongsan  
 School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology  
 Nakhon Ratchasima, Thailand  
 Suphawit.Jul@gmail.com, d6300647@g.sut.ac.th, peerasan@sut.ac.th, rangsan@sut.ac.th

**Abstract**— Effective communication in caves is crucial for rescuers during accidents or disasters. Previous studies have investigated wave propagation in tunnels and limestone caves. This paper presents an experimental study of wave propagation in a sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave in Thailand, covering the MF to UHF bands in both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) scenarios. The study aims to investigate the behavior of waves while traveling in the sandstone cave. The study found that in LOS, the path loss decreases with higher frequencies, contrary to the propagation theory in free space. Since waves traveling in a cave behave like they are in a dielectric-walled waveguide. In NLOS, the path loss in the L-Bend range at low frequencies was lower than that at high frequencies due to the ability to reflect, diffract, and encounter obstructions. In contrast, at 350 kHz, a high attenuation is caused by the skin effect when the wave travels through the arc, penetrating the cave wall. The study results will aid in developing communication systems and antennas for use in caves.

**Keywords**— Wave propagation, Cave communication, Propagation measurement

## I. INTRODUCTION

For a long time, communication within mines or caves was essential to rescue in accidents or disasters within mines and caves. According to all incidents, rescuers must have the most effective communication support. Previous works have studied wave propagation in tunnels, mines, and caves. Reference [1] studied wave propagation in narrow man-made tunnels. Including the study of wave propagation in natural caves from research [2-4]. Significantly, these studies are a model for studying wave propagation in limestone caves in Thailand [5].

Therefore, this paper presented an experimental study of wave propagation in a sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave, Thailand. Where with the experimental measure receives power at each distance to investigate the behavior of waves while traveling in the cave, covering from MF to UHF bands both in line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS). In summary, the study results will lead to the development of communication systems and antennas for use in the cave in the future.

## II. METHODOLOGY

The experimental method in this paper is based on the methodology in [1-4], which led to research in [5]. The principal purpose of wave propagation study is to consider the propagation path loss. To predict each frequency's wave attenuation behavior while propagating in the cave. Therefore, this experimental method will measure the RF transmission within the cave in Line of Sight (LOS) and Non-Line of Sight (NLOS). The experiment frequency consists of 350 kHz, 1,650 kHz, 3 MHz, 16.5 MHz, 30 MHz, 165 MHz, 300 MHz, 1.65 GHz, and 3 GHz, which

cover the MF to UHF bands by choosing beginning, middle, and end of each.

The propagation path loss was measured using a wideband RF signal generator, RF spectrum analyzer, and antennas for each frequency band. On the transmitting side, a narrow-band continuous wave (CW) signal is fed from the Rohde & Schwarz SMB100B signal generator to the antenna via a 50 Ohm low-loss cable. The receiving side consists of a Rohde & Schwarz FPH spectrum analyzer with a Rohde & Schwarz HE400UWB antenna and a Rohde & Schwarz HE400HF antenna. All transmitting equipment is positioned at the starting point. The receiving equipment will measure signal levels by the initial distance between the transmitting and receiving antennas, which is 2 meters. Also, it will be progressively enlarged by 2 meters until the last distance equals 20 meters, as shown in Figure 1. Figure 2 shows that the experiment location is the Wat Tham Patihan cave. This section is located in the middle of the cave, consisting of LOS and NLOS parts. Specifically, the radiated power from the transmitter antenna can consider path loss by the slope of received power and predict the behavior of waves traveling in the cave. The LOS experiment can consider such loss directly, and the NLOS experiment will investigate the ability of diffraction or reflection on the cave wall with windings route for each frequency.

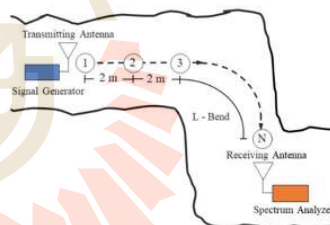


Fig. 1. The diagram of the experimental method



Fig. 2. The experiment location is called "Wat Tham Patihan Cave"

### III. RESULT AND DISCUSSION

This section presents a graph comparing the propagation loss per meter of the LOS experiment, as shown in Figure 3, and the results of the NLOS experiment, shown in Figure 4.

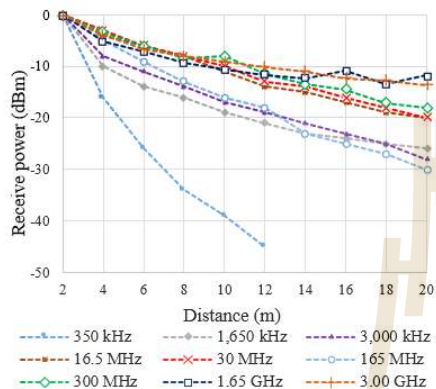


Fig. 3. The result of the LOS experiment covers the MF to UHF bands

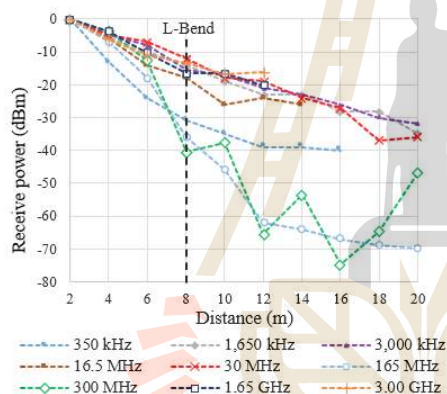


Fig. 4. The result of the NLOS experiment covers the MF to UHF bands

From the LOS results in Figure 3, the slope of the graph in dB/m can be shown as follows: 4.30@ 350 kHz, 1.24@ 1,650 kHz, 1.37@ 3,000 kHz, 1.10@ 16.5 MHz, 1.08@ 30 MHz, 1.62@ 165 MHz, 0.97@ 300 MHz, 0.59@ 1.65 GHz, and 0.67@ 3 GHz. The attenuation is lower with higher frequencies, contrary to the propagation theory in free space. Caused by waves traveling in a cave are like traveling in a dielectric-walled waveguide. However, from [5], it was found that at frequencies below the cut-off frequency of the waveguide theory still propagated due to the skin effect, allowing the wave to travel into the cave wall.

The NLOS measurement results can describe wave behavior when encountering the obstructed cave wall onto the straightway (L-Bend). Therefore, the NLOS test consists of a LOS part and an NLOS part, an L-Bend curve obscuring the traveling waves in line of sight at a distance from 8 meters up. Figure 4, the slope of the graph in dB/m at L-

bend shows as follows: 1.10@ 350 kHz, 1.54@ 1,650 kHz, 1.44@ 3,000 kHz, 1.10@ 16.5 MHz, 2.11@ 30 MHz, 2.73@ 165 MHz, 1.45@ 300 MHz, 0.90@ 1.65 GHz, and 0.70@ 3 GHz. The results showed that the path loss in the L-Bend range at low frequencies was lower than attenuation per distance at high frequencies due to the ability to reflect, diffract, and encounter obstructed. Nonetheless, at 350 kHz, a high attenuation is caused by the skin effect while the wave travels through the arc, penetrating the cave wall.

### IV. CONCLUSIONS

Effective communication is crucial for rescuers in mines and caves, and previous studies have investigated wave propagation in these environments. This paper presents an experimental study on wave propagation in the sandstone cave at Wat Tham Patihan Cave, covering the MF to UHF bands and examining both line of sight (LOS) and non-line of sight (NLOS) propagation. The results show that each frequency's behavior has advantages and disadvantages. The path loss in the LOS propagation is lower with higher frequencies that contrast with free-space theory because the wave propagation in the cave is similar to traveling in a dielectric-walled waveguide, and frequencies below the waveguide cutoff still propagate due to the skin effect. The NLOS results describe the wave behavior when encountering the obstructed cave wall in the L-Bend curve, demonstrating that the path loss at low frequencies is lower than at high frequencies due to the wave's ability to reflect, diffract, and encounter obstructions. However, at 350 kHz, the wave experiences high path loss due to the skin effect while traveling through the arc and penetrating the cave wall. Overall, this study provides valuable insights into RF propagation in sandstone caves, which can inform the design and deployment of communication systems in similar environments.

### V. FUTURE WORK

From the results, it shows the propagation behavior of each frequency. The low frequencies can penetrate the rock layers, causing to development Through-The-Earth (TTE) communications and specific antennas. Moreover, high-frequency communications can also be improved within caves using repeaters during curves or obstacles.

### REFERENCES

- [1] E. Kjeldsen, and M. Hopkins. "An experimental look at RF propagation in narrow tunnels." In MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference, IEEE, pp. 1-7, October 2006.
- [2] M. Rak, and P. Pechac. "UHF propagation in caves and subterranean galleries." IEEE Transactions on antennas and propagation 55, no. 4, pp. 1134-1138, April 2007.
- [3] Bedford, Michael D., and Gareth A. Kennedy. "Modeling microwave propagation in natural caves passages." IEEE Transactions on antennas and propagation 62, no. 12, pp. 6463-6471, October 2014.
- [4] Soo QP, Lim SY, Lim DW, Yap KM, Lau SL. Propagation measurement of a natural cave-turned-wine-cellar." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 17, no. 5, pp. 743-746, March 2018.
- [5] R. Wongsan, P. Khamalee, A. Wannakomol, P. Kumsawat, A. Srikaew, and A. Jantaupalee. "A Study on Radio Wave Propagation in Chiang Dao Cave". NBTC Journal, vol. 6, no. 6, pp. 123-47, November 2022.



2024 International Electrical Engineering Congress (IEEECON 2024)  
March 6-8, 2024, Pattaya Chonburi, THAILAND

# Small Loop Antenna Arrangement Investigation for 350 kHz Through-the-Earth Communications in Limestone Cave

Peerasan Khamsalee  
School of Telecommunication Engineering, Suranaree  
University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
[peerasan@sut.ac.th](mailto:peerasan@sut.ac.th)

Suphawit Julthochai  
School of Telecommunication Engineering, Suranaree  
University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
[Suphawit.Jul@gmail.com](mailto:Suphawit.Jul@gmail.com)

Rangsan Wongsan  
School of Telecommunication Engineering, Suranaree  
University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
[rangsan@sut.ac.th](mailto:rangsan@sut.ac.th)

Atawit Jantaupalee  
School of Telecommunication Engineering, Suranaree  
University of Technology  
Nakhon Ratchasima, Thailand  
[d6300647@g.sut.ac.th](mailto:d6300647@g.sut.ac.th)

**Abstract**—This paper proposes the arrangement investigation of the small loop antenna for Through-the-Earth (TTE) communications in limestone cave. Specifically designed with a  $1/50$  wavelength at the operating frequency of 350 kHz for cave use. The measurement setup consists of a transmitter system located at the surface station on a mountain and a receiver system at an underground station within the limestone cave at Wat Tham Phra Phothisat, Saraburi, Thailand. The signals are transmitted from the surface transmitter with an earth-grounded antenna, propagating through the earth to reach the small loop antenna with the receiver underground. We investigate the arrangement of the array and the increase of the small loop antenna element from one to four elements. From the measurement results, we found that a vertically oriented single small loop antenna effectively receives signal power from the earth-grounded antenna. Moreover, the increasing of elements to the small loop antenna enhances its capacity to receive higher signal power, with the optimal arrangement being a 4x1 vertical array antenna that exhibits an increase of approximately 19.2 dB when compared with the single small loop antenna.

**Keywords**—small loop, through the earth, array.

## I. INTRODUCTION

In the 2018, football team rescue at Khun Nam Nang Non Cave in Mae Sai District, Chiang Rai Province, Thailand, it was noted that rescuers employed handheld walkie-talkies for communication within the cave. Nevertheless, a problem emerged as radio communication and mobile phone systems operating in the VHF and UHF bands proved unsuitable for long-distance communication within the cave. This limitation stems from a decrease in signal strength due to the absorption and interference of waves, which undergo reflection or partial diffraction based on the different geological features of cave walls, floors, and ceilings.

Through-the-Earth communication is widely used for transmitting signals from the Earth's surface to subterranean or caves by introducing electric currents through mountains into the caves [1-2]. When waves travel into the cave within the low-frequency band, they exhibit the ability to diffract along the walls. Furthermore, low-frequency waves possess a

characteristic known as skin depth, a crucial parameter enabling these waves to penetrate the cave walls more effectively than high-frequency waves, especially when the cave walls exhibit high conductivity [3], a characteristic often applied to Through-the-Earth communication. The Molephone is one of the Through-the-Earth communication systems using a loop antenna, particularly suitable for shallow caves [4-5]. However, a design problem with the loop antenna occurs from the necessity to size it according to the wavelength of the operating frequency. Consequently, when using the loop antennas in the low-frequency band with their extended wavelengths, the antenna necessitates a considerably large diameter, posing difficulties for use in the cave. To fix this problem, the antenna must be designed to reduce the size into a small loop antenna. Furthermore, various techniques exist to enhance antenna efficiency, with one such technique being the optimization of the antenna array. This commonly used and straightforward method involves arranging the array in a suitable format and ensuring the proper distance between its elements, contributing to increased antenna efficiency.

This paper proposed an investigation into optimizing the arrangement of a small loop antenna for Through-the-Earth communications operating at 350 kHz. The aim is to find a suitable arrangement that enhances the antenna's efficiency for transmitting and receiving signals within a cave. Our findings show that a 4x1 vertical array antenna demonstrates to be a suitable arrangement, demonstrating an increase in the receive signal power of approximately 19.2 dB compared to a single small loop antenna.

## II. PRINCIPLE OF THROUGH-THE-EARTH COMMUNICATION

The principle of a Through-the-Earth (TTE) communication system comprises a TTE transceiver linked to two earth electrodes positioned at the end of the earth-grounded antenna. To generate a signal in the earth, it is essential to create a potential difference between these two earth electrodes. These electrodes may include a variety of components such as multiple ground rods, a combination of grounded metal structures, or single rods in the simplest case. The flow of current through these electrodes induces a current

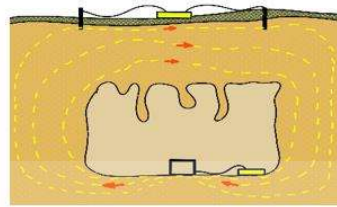


Fig. 1. Through-the-Earth (TTE) communication.

in the earth. This current then travels through the earth medium for a certain distance, as shown in Fig. 1. Another set of electrodes, positioned at a distance, can detect the transmitted signal as a potential difference, applying the same principle of utilizing two electrodes. The extent to which this current can propagate through the earth is influenced by various factors, including but not limited to earth conductivity (with multiple layers), the contact impedance of each electrode, and the transmitted current [6-7].

### III. MEASUREMENT SYSTEM AND SETUP

The measurement system of the Through-the-Earth comprises 1) a surface transmitter system with an earth-grounded antenna and RF generator, and 2) an underground receiver system with a Rider FPH spectrum analyzer and small loop antenna as shown in Fig. 2.

The measurement setup at Wat Tham Phra Phothisat in Saraburi, Thailand, involves the subterranean receiver system that receives the wave passes through the earth from the surface transmitter, as shown in Fig. 3.



Fig. 2. Through-the-Earth measurement system.

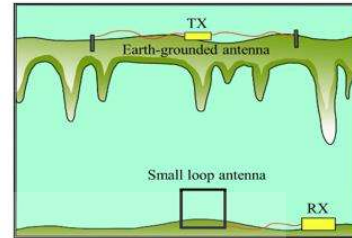


Fig. 3. Through-the-Earth measurement setup.



Fig. 4. A satellite view of Wat Tham Phra Phothisat.

The measurement area is shown in Fig. 4 using a satellite image. Positioned on the mountain (Point A), the surface transmitter system uses a grounded antenna featuring metal rods at each end of the wire, stuck in the earth. It operates at a frequency of 350 kHz, delivering a transmit power of 5 W. The separation between the transmitter and receiver systems is 12.5 m, and the thickness of the cave's ceiling is estimated to be around 3 meters. Located at point number 5 within the cave, the receiver system comprises a small loop antenna made from a 60-way ribbon cable, having a diameter of approximately 1 meter, and inducing current from the earth. Utilizing a spectrum analyzer, the received signal power is carefully measured. The design process of the  $1/50$  wavelength small square loop antenna involved scaling HexPhone's 87 kHz frequency-operating loop antenna to operate at 350 kHz for the analog transceiver. To optimize the overall performance of the small loop antenna, it was methodically arranged into arrays of 1, 2, and 4 elements. The objective was to determine the most efficient configuration for maximizing signal power reception.

### IV. THE MEASUREMENT RESULTS

#### A. A single small loop antenna

In the first phase, we determine the best antenna orientation for a single small loop antenna by considering both horizontal and vertical alignments, shown in Fig. 5. Based on the measurement results at a distance of 12.5 m, the signal power received by the spectrum analyzer for the horizontally oriented one received  $-57.1$  dBm, whereas a vertically oriented single small loop antenna was  $-52.9$  dBm at the frequency of 350 kHz. Consequently, the vertical orientation of the small loop antenna (Type I) is recognized as the selected configuration for subsequent array measurements.





(a) Horizontal



(b) vertical

Fig. 5. The orientation of a single small loop antenna.

#### B. Two-element array of small loop antenna

Subsequently, a vertical single small loop antenna was arranged into a two elements linear array, with a 12.5-meter separation between the receiver and transmitter. We determine the signal power received by the spectrum analyzer to find the appropriate spacing between each element (d), as shown in Fig. 6. The optimal spacing between each element was identified as 70 centimeters, resulting in received signal powers of -44.3 dBm and -55.2 dBm, respectively, for the vertical arrangement of the antenna array (Type II) and the horizontal arrangement of the antenna array (Type III). Measurement findings demonstrated that the two-element array yielded higher power. The vertical arrangement of the antenna array exhibited an increase of around 8.6 dB when compared to the received signal power from a single small loop antenna, as shown in Table I.

TABLE I. THE MEASUREMENT RESULTS OF 2 ELEMENT ARRAY

Spacing of element (d) (centimeters)	Received signal power (dBm)	
	Type II	Type III
10	-44.5	-56.4
20	-51.4	-55.6
30	-44.5	-55.5
40	-44.4	-55.6
50	-44.5	-55.5
60	-44.4	-55.3
70	-44.3	-55.2
80	-44.4	-55.6
90	-44.5	-55.4
100	-44.6	-56.2



(a) The vertical arrangement of the antenna array



(b) The horizontal arrangement of the antenna array

Fig. 6. The arrangement of two-element array.



(a) The vertical arrangement of the antenna array



(b) The horizontal arrangement of the antenna array



(c) The planar arrangement of the antenna array

Fig. 7. The arrangement of four-element array.

### C. Four-element array of small loop antenna

Arranging a vertical single loop antenna into three distinct element arrays with a 12.5-meter gap between the receiver and transmitter, the measurement results showed that four-element arrays could achieve higher power compared to both a single small loop antenna and two-element small loop antenna arrays. The optimal spacing for each element ( $d$ ) was determined through an evaluation of the signal power received via the spectrum analyzer, as shown in Fig. 7.

Identifying the suitable spacing for the vertical arrangement of the antenna array (Type IV), the horizontal arrangement of the antenna array (Type V), and the planar arrangement of the antenna array (Type VI) as 70 centimeters, these configurations exhibited received signal powers of -33.1 dBm, -43.2 dBm, and -43.6 dBm, respectively. In comparison to the power obtained from a single small loop antenna, the received signal power demonstrated a noticeable increase, with approximately 19.8 dB, 9.7 dB, and 9.3 dB, respectively, as shown in table II.

Analysis of the data presented in Table III revealed that the array of small loop antennas can induce the highest current from the earth. The investigation identified the most effective configuration for the small loop antenna array, identifying the 4 elements of the vertical arrangement of the antenna array with an optimal element spacing of 70 centimeters. This particular arrangement showcased a substantial increase in received signal power, approximately 19.8 dB more compared to a single small loop antenna. Furthermore, the impedance of the Type IV antenna was measured at  $35.29 + j6962.14$  ohms. These results highlight the success of this specific array configuration in increasing signal power reception for Through-the-Earth (TTE) communications within limestone caves.

TABLE II. THE MEASUREMENT RESULTS OF 4 ELEMENT ARRAY

Spacing of element (d) (centimeters)	Received signal power (dBm)		
	Type IV	Type V	Type VI
10	-33.6	-43.6	-43.8
20	-33.4	-44.4	-43.7
30	-37.5	-43.4	-43.8
40	-33.6	-43.6	-44.6
50	-33.5	-45.4	-43.9
60	-33.4	-43.4	-43.7
70	-33.1	-43.2	-43.6
80	-33.8	-45.5	-43.8
90	-33.7	-44.4	-44.9
100	-33.6	-45.2	-44.7

TABLE III. THE COMPARISON OF THE RECEIVED SIGNAL POWER

Type of antenna	Received signal power (dBm)
Type I	-52.9
Type II	-55.2
Type III	-44.3
Type IV	-33.1
Type V	-43.2
Type VI	-43.6

### V. CONCLUSION

We propose an investigation into the arrangement of small loop antennas for Through-the-Earth (TTE) communications in limestone caves. These antennas are designed with a  $1/50$  wavelength for the operating frequency of 350 kHz in cave environments. Our measurement involved signal measurements, transmitting from a surface transmitter to an underground receiving, positioned at a 12.5 m distance within a cave test site. To achieve optimal configurations, we expanded the number of receiver antennas, incorporating 2 and 4 elements in small loop antenna arrays. The results showed that the increased array size induced higher currents from the earth, resulting in high signal power reception. Notably, the 4 elements of the vertical arrangement of the small loop antenna array (Type IV), featuring a well-suited spacing of 70 centimeters between elements, demonstrated a signal power at the receiving system approximately 19.8 dB higher than that of a single small loop antenna. In practical techniques involving wave transmission through the earth using a radio transceiver, the implementation of a matching circuit is necessary to optimize impedance matching between the transceiver and the 4 element small loop array antenna. This optimization significantly enhances the overall efficiency of wave transmission.

### REFERENCES

- [1] M. Bedford, "Introducing a New Cave Radio for Rescue Use," BCRA Cave Radio & Electronics Group, Journal 41, September 2000.
- [2] N. W. Damiano, L. Yan, B. Whisner, and C. Zhou, "Simulation and Measurement of Through-the-Earth, Extremely Low-Frequency Signals Using Copper-Clad Steel Ground Rods," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 5, 5088-5095, 2017.
- [3] L. Van and C. Sunderman, "Electric Field of Grounded Horizontal Line Transmitter for Through-the-Earth Communication," 2015 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES), Vol. 31, March 22-26, 2015, Virginia, USA.
- [4] M. Bedford, J. Hey and B. J. Jopling, "A Loop Antenna for the HeyPhone." BCRA CAVE RADIO & ELECTRONICS GROUP, JOURNAL 50, DECEMBER 2002.
- [5] M. Bedford, "Introducing the HeyPhone," C&C Magazine, pp.15-17, Autumn/winter 2001.
- [6] J. Huri and C. Ebi, "Alpine Cave Radio-Earth-current at Holloch," Journal of BCRA Cave Radio & Electronics Group, No.25, September 1996.
- [7] C. Trayner, "CRO HeyPhone Communications System Technical Reference Manual (Temporary)," No. 3, pp. 1-39, 23 June 2002.



## ประวัติผู้เขียน

นายศุภวิชญ์ จุลโทชัย เกิดวันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2537 เกิดที่ จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับ  
ประถมศึกษาจากโรงเรียนปทุมพรพิทยา (2550) สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้นและระดับ  
มัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย (2555) สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี  
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (2560)

