

บทที่ 4

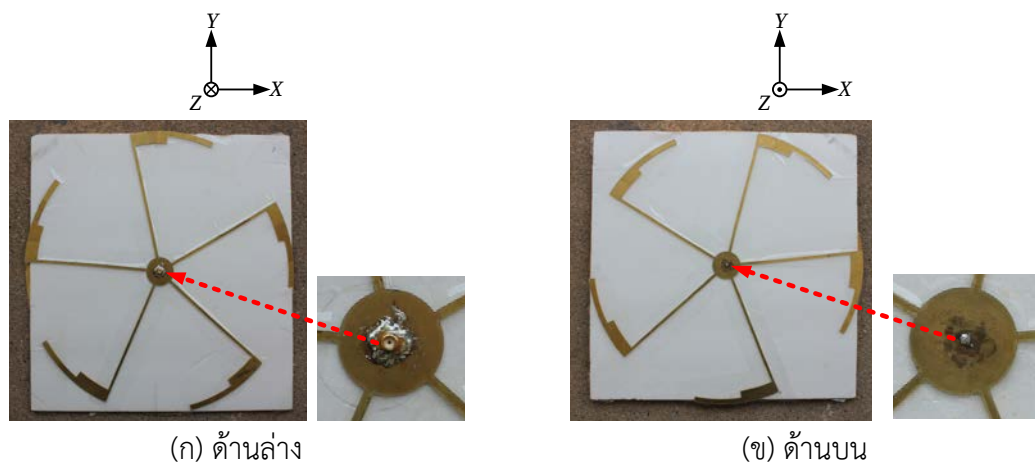
การทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล ซึ่งจะพิจารณาคุณลักษณะของค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy และ xz และอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และนำผลจากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ มาทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องระหว่างผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัล เพื่อยืนยันความถูกต้องจากการจำลอง โดยสายอากาศดังกล่าวมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ครอบคลุมช่วงความถี่ 470 MHz ถึง 862 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ยูเอชเอฟ และมีแบนด์วิดธ์อย่างน้อย 493 MHz ตามข้อกำหนดของ DVB-T2 และมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล ของ กสทช. โดยสายอากาศชนิดนี้ถูกออกแบบด้วยแผ่นทองเหลือง ที่มีความหนา 1 mm และใช้คอนเนคเตอร์ต่อร่วมกับสายนำสัญญาณ 75Ω โดยโครงสร้างของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

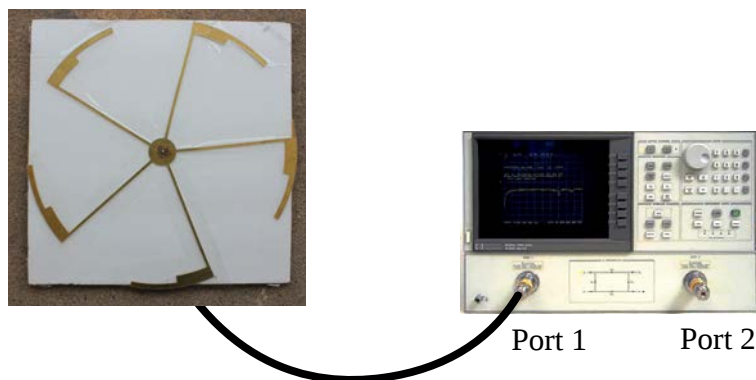
4.3 ขั้นตอนและผลการทดสอบ

การทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่เหมาะสม เพื่อทดสอบสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน สำหรับประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่โทรทัศน์ระบบดิจิทัล มีดังนี้

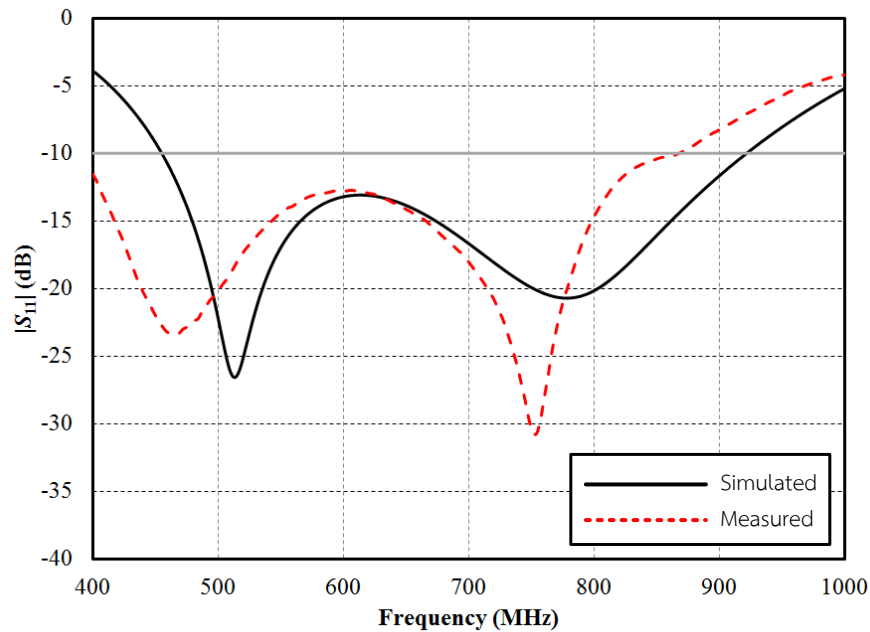
- ห้องไร้การสะท้อนของคลื่น (Microwave anechoic chamber)
- เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) รุ่น HP-8720C
- สายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50Ω
- บาลัน 50Ω/75Ω

4.3.1 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$

การทดสอบคุณลักษณะของค่า $|S_{11}|$ ทำได้โดยนำสายอากาศโพลาริซ์แนวนอนรอบตัวโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันเชื่อมต่อเข้ากับสายนำสัญญาณและพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายตามลำดับ โดยก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับสายอากาศเพื่อที่จะทดสอบนั้น จะทำการปรับเทียบให้กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยการปรับเทียบดังกล่าวจะอยู่ที่ปลายสายของสายนำสัญญาณเพื่อลดการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณที่อาจจะส่งผลกระทบต่อค่า $|S_{11}|$ โดยการทดสอบ $|S_{11}|$ จะมีวิธีการติดตั้งสายอากาศร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยสายนำสัญญาณจะมีการเชื่อมต่อที่ด้านหลังของสายอากาศ และผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การทดสอบคุณลักษณะ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องกัน โดยผลการทดสอบของค่า $|S_{11}|$ มีค่าน้อยกว่า -10 dB โดยมีช่วงความถี่ที่ตั้งแต่ 404 MHz ถึง 871 MHz และมีแบนด์วิดท์ เท่ากับ 467 MHz ซึ่งยังมีความคลาดเคลื่อนทางความถี่เกิดขึ้น กล่าวคือ ความถี่เกิดการเลื่อนลงมา ส่งผลให้ช่วงความถี่ของสายอากาศที่นำมาทดสอบเลื่อนต่ำลงมาจากผลที่ได้จากการจำลอง อันเนื่องมาจากการจำลองของสายอากาศในโปรแกรมจำลองไม่มีการออกแบบในส่วนของคนเนคเตอร์เชื่อมต่อสัญญาณ ที่ไม่ทราบคุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ภายใน จึงยากที่จะทำการออกแบบในโปรแกรมเพื่อจำลองร่วมกับสายอากาศ อีกทั้งขั้นตอนของการสร้างสายอากาศอาจมีความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ทำการออกแบบยังคงมีช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ตรงตามข้อกำหนดของ DVB-T2 และมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลของ กสทช. ที่กำหนดไว้

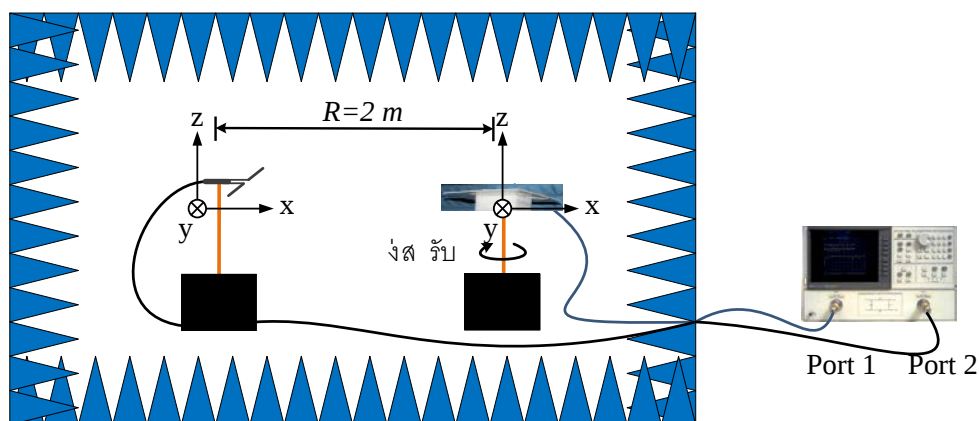
4.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบตัวโพลาริไรซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบได้จะเป็นของสายอากาศภาครับ และใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่ง เนื่องจากสายอากาศไดโพลมาตรฐาน มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริไรซ์ที่แน่นอน จึงเหมาะสมกว่าที่จะใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบ เนื่องจากยังไม่ทราบถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและโพลาริไรซ์ โดยการติดตั้งสายอากาศภาคส่งและภาครับสำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างมากพอที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะคงที่ หรือเรียกระยะดังกล่าวนี้ว่าระยะสนามระยะไกล (Far-field : R) ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$R \geq \frac{2(D^2)}{\lambda} \quad (4.1)$$

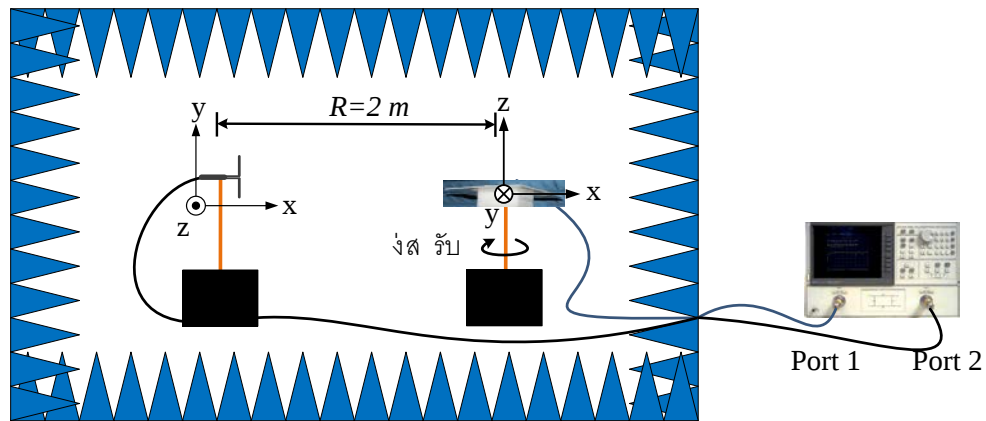
เมื่อ D คือ มิติยาวที่สุดของสายอากาศ (m)

โดยการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันจะทดสอบในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นห้องที่มีสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงช่องว่างอิสระ (Free space) มากที่สุด โดยการติดตั้งสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะต้องทำการเชื่อมต่อสายอากาศภาคส่งเข้าที่พอร์ต 1 และเชื่อมต่อสายอากาศภาครับเข้าที่พอร์ต 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.6 จากรูปดังกล่าวแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซ์ร่วมในระนาบ xy และในระนาบ xz ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.4 และ 4.7 จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบโพลาริซ์ร่วมในระนาบ xy และในระนาบ xz ตามลำดับ โดยจะพิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 ซึ่งการวางแผนในการทดสอบสายอากาศโพลาริซ์แนวนอนรอบตัวโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันสามารถอ้างอิงได้จากรูปที่ 4.1 โดยผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.10 ตามลำดับ



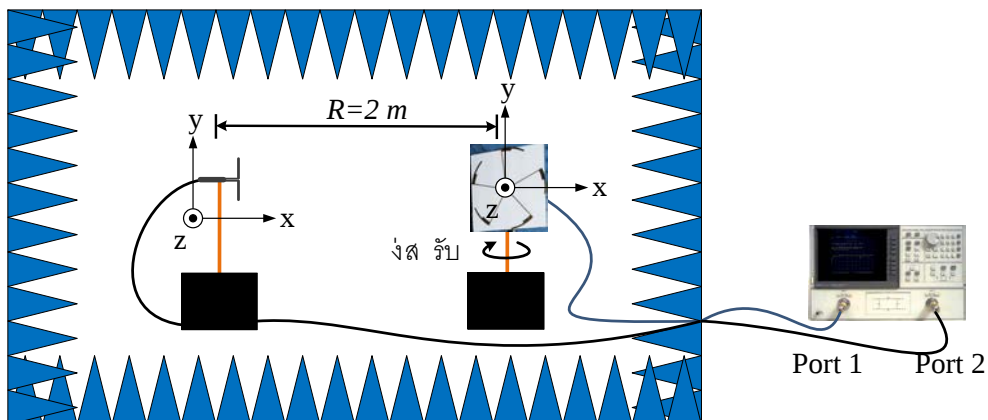
รูปที่ 4.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซ์ร่วม (Co-polar) ในระนาบ xy

จากรูปที่ 4.4 จะเป็นการแสดงวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาริซ์ร่วม (Co-polar) ในระนาบ xy สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวนอน ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 4.1 จะวางในแนวนอน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ 360 องศา และทำการบันทึกค่า $|S_{11}|$



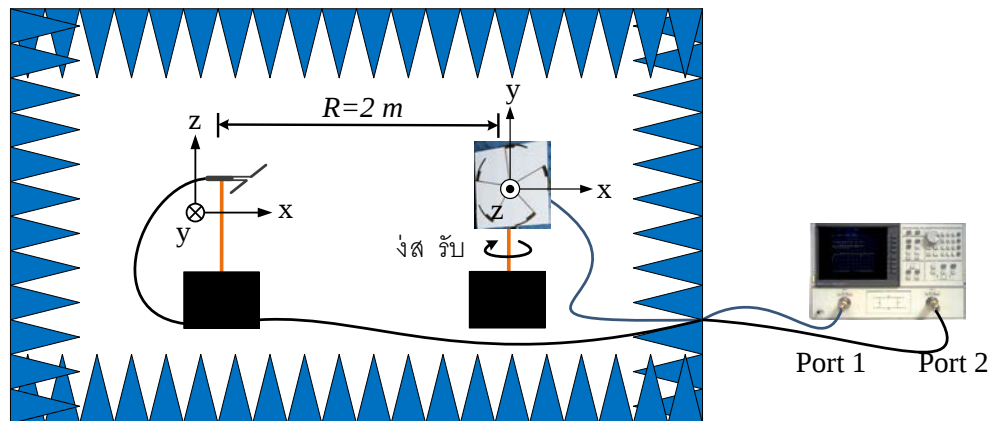
รูปที่ 4.5 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polar) ในระนาบ xy

จากรูปที่ 4.5 จะเป็นการแสดงวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polar) ในระนาบ xy สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 4.1 จะวางในแนวนอน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ 360 องศา และทำการบันทึกค่า $|S_{11}|$



รูปที่ 4.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polar) ในระนาบ xz

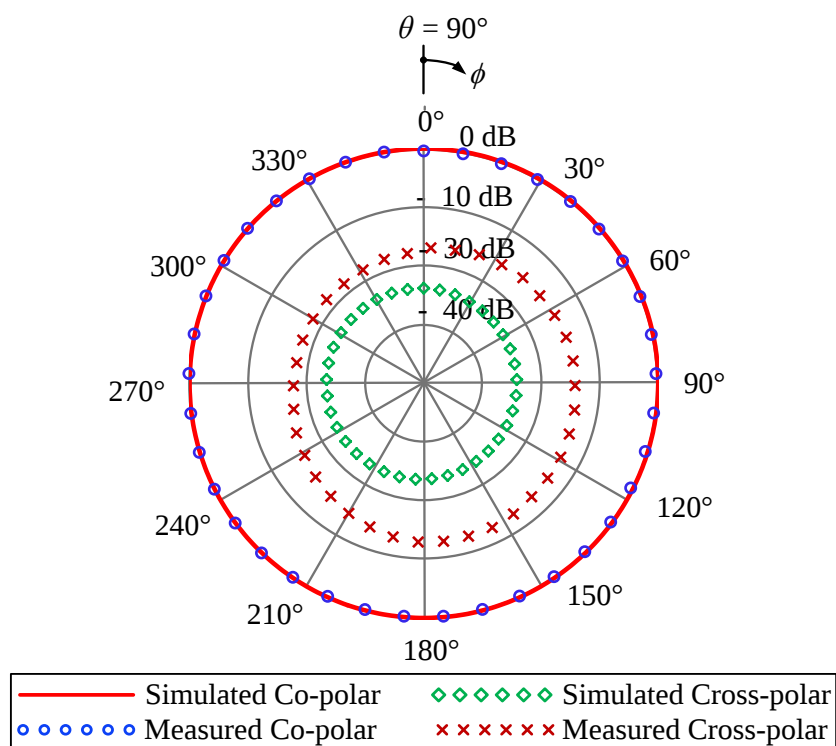
จากรูปที่ 4.6 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม (Co-polar) ในระนาบ xz สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวตั้ง ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 4.1 จะวางในแนวตั้งเหมือนกัน จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ 360 องศา และทำการบันทึกค่า $|S_{11}|$



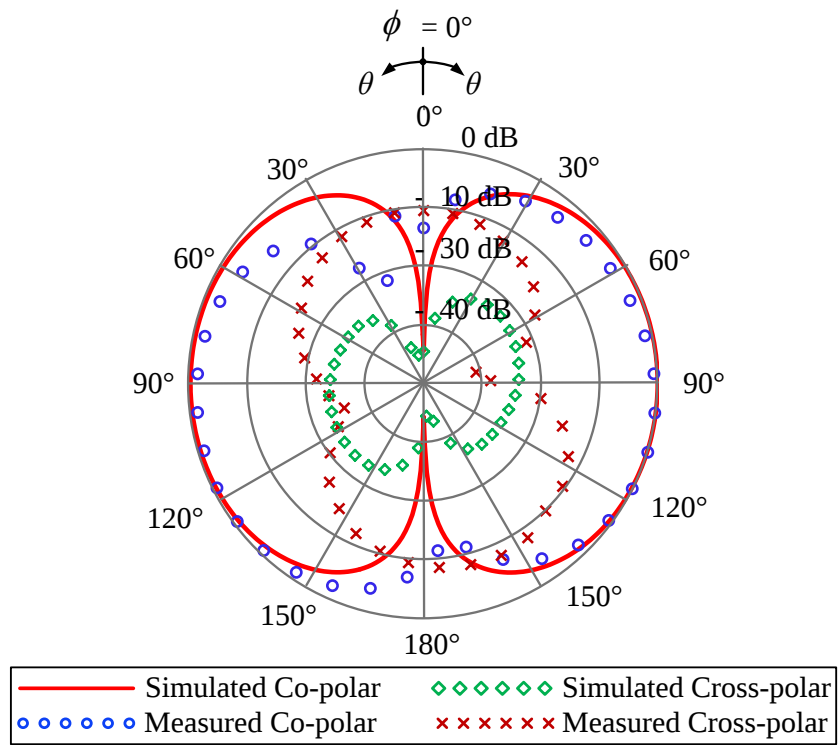
รูปที่ 4.7 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polar) ในระนาบ xz

จากรูปที่ 4.7 จะเป็นการแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polar) ในระนาบ xz สายอากาศส่งคือสายอากาศไดโพล โดยจะวางสายอากาศในแนวนอน ส่วนสายอากาศรับคือสายอากาศต้นแบบในรูปที่ 4.1 จะวางในแนวตั้ง จากนั้นทำการหมุนสายอากาศรับ 360 องศา และทำการบันทึกค่า $|S_{11}|$

จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 4 แบบ นั้นจะได้ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ถึง รูปที่ 4.10

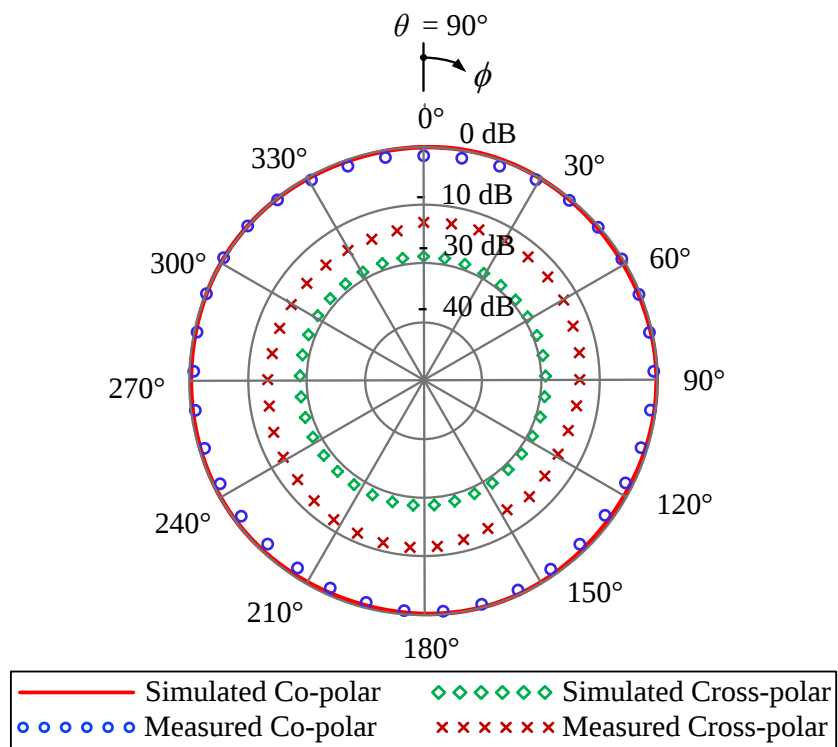


(ก) ระนาบ xy

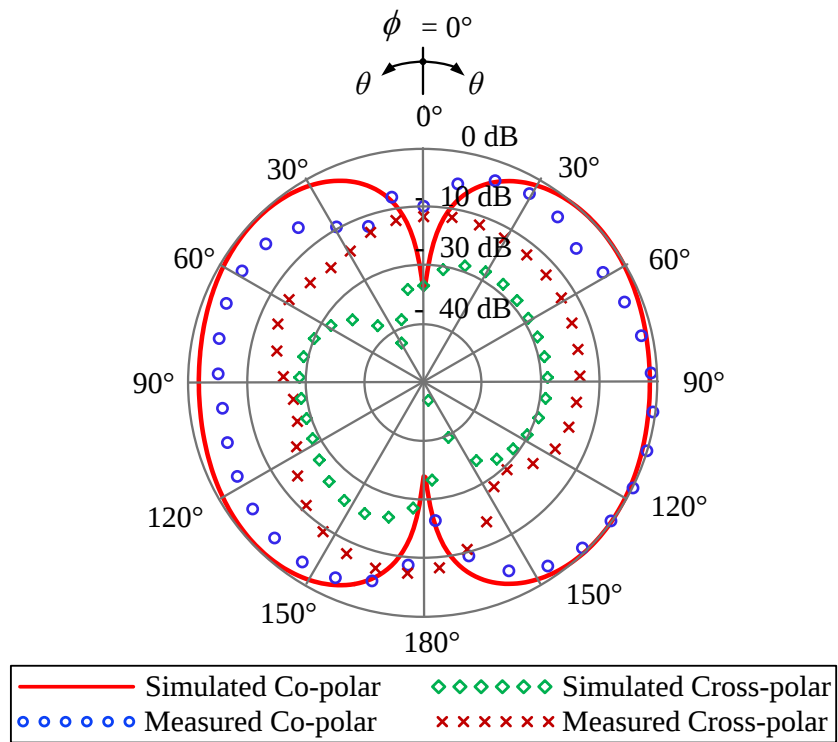


(ข) ระนาบ xz

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างผลการจำลอง
และผลการทดสอบที่ความถี่ 470 MHz

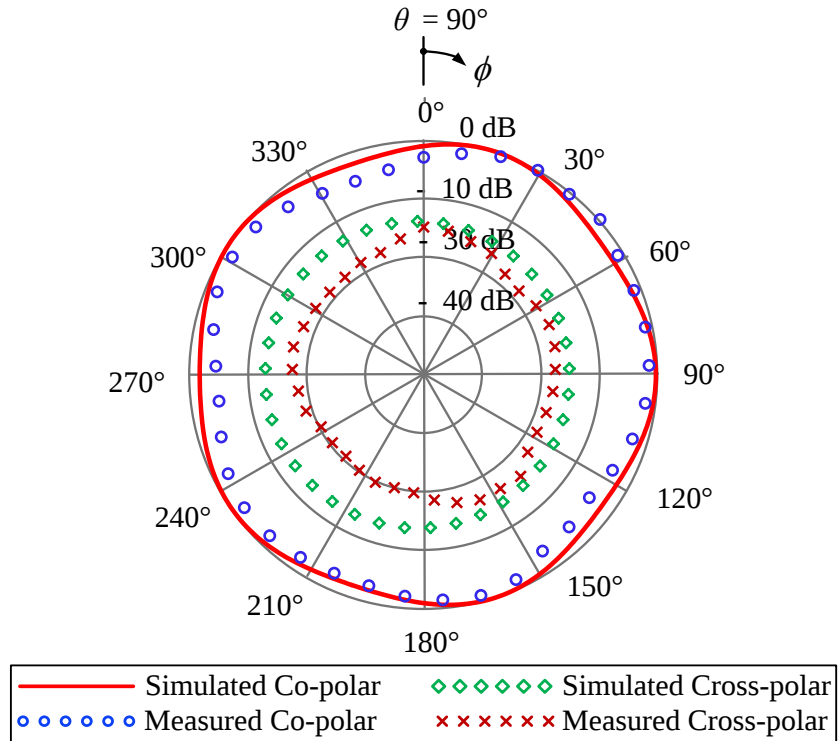


(ค) ระนาบ xy

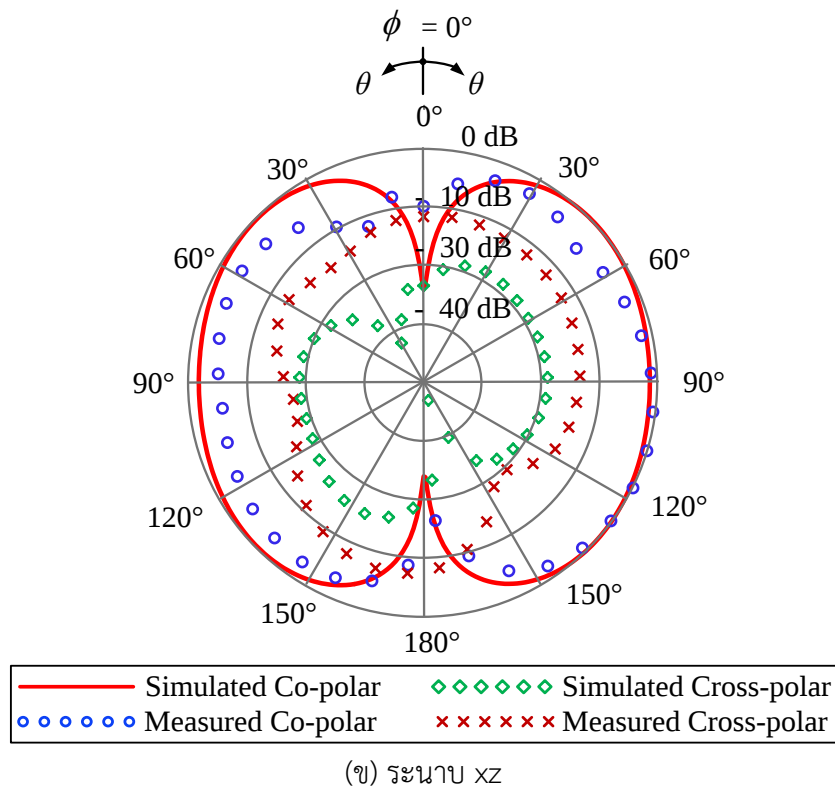


(ข) ระนาบ xz

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างผลการจำลอง
และผลการทดสอบที่ความถี่ 666 MHz



(ก) ระนาบ xy



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นระหว่างผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ 862 MHz

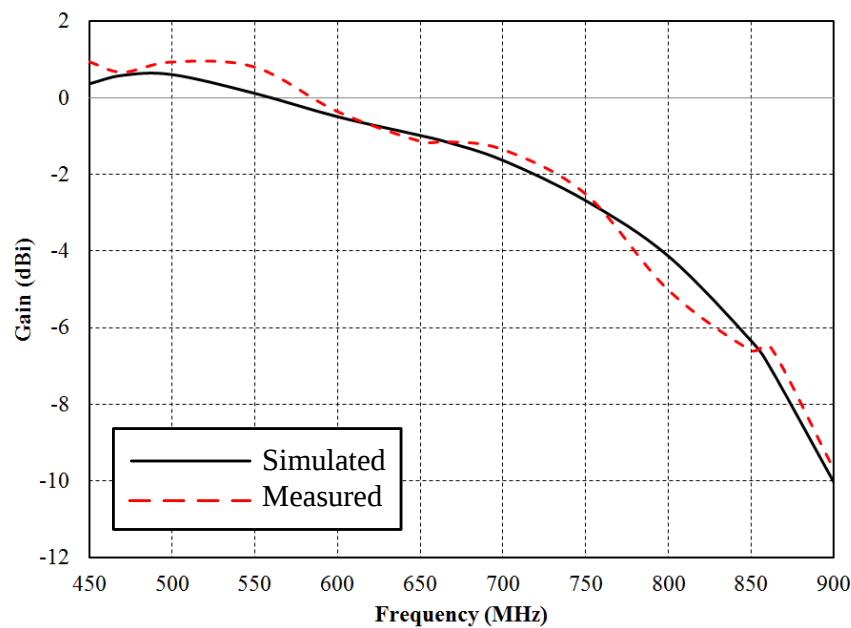
จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy และ ระนาบ xz ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม และแบบโพลาไรซ์ไขว้ ซึ่งผลที่ได้พบพบว่า กำลังงานที่รับได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ไขว้นั้น มีค่าน้อยกว่ากำลังงานที่รับได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์ร่วม 20 dB จึงสามารถสรุปได้ว่า สายอากาศรอบตัวโพลาไรซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกันเป็นสายอากาศที่มีโพลาไรซ์เป็นเชิงเส้นแนวนอน และพบว่า ผลการจำลองและผลการทดสอบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ มีความสอดคล้องกัน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางที่แพร่กระจายแบบรอบทิศทางในระนาบ xy ได้ดี โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz เป็นแบบรอบตัวในระนาบ xy โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เป็น 121.8 องศา 140 องศา และ 38.9 องศา ตามลำดับ

4.3.3 อัตราขยาย (Gain)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศสามารถใช้วิธีการติดตั้งดังรูปที่ 4.4 แต่จะไม่มี การหมุนที่สายอากาศภาครับ โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศภาคส่ง ที่มี อัตราขยายเท่ากับ 2 dBi และใช้สายอากาศรอบตัวโพลาไรซ์แนวนอนโดยใช้วงแหวนวงกลมซ้อนกัน เป็นสายอากาศภาครับเพื่อทดสอบหาอัตราขยาย ซึ่งอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ทดสอบสามารถ คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 และผลการทดสอบอัตราขยายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad (4.2)$$

- เมื่อ G_{0t} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dBi)
 G_{0r} คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dBi)
 R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ (m)
 λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน (m)
 P_t คือ กำลังของภาคส่ง (W)
 P_r คือ กำลังของภาครับ (W)



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราขยายระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอน โดยใช้วงกลมซ้อนกัน โดยที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ผลการทดสอบมีอัตราขยาย 0.67 dBi -1.14 dBi และ -6.52 dBi ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มของอัตราขยายของสายอากาศที่ลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยมีความสอดคล้องกันระหว่างผลจากการจำลองและผลการทดสอบ ซึ่งสังเกตได้ว่าผลการทดสอบมีการกระเพื่อมเล็กน้อย โดยสาเหตุอาจจะเกิดจากสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเกิดการสูญเสียระหว่างคอนเนคเตอร์และสายนำสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

โดยผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงกลมซ้อนกันสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงกลมวงกลมซ้อนกัน

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการทดสอบ		
ความถี่ที่ออกแบบ	470 MHz	666 MHz	862 MHz
$ S_{11} $	-11.02 dB	-14.59 dB	-14.90 dB
แบนด์วิดท์	404 MHz ถึง 871 MHz		
โพลาริซ์	เชิงเส้นแนวนอน		
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	รอบทิศทาง ในระนาบ xy	รอบทิศทาง ในระนาบ xy	รอบทิศทาง ในระนาบ xy
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz	100 องศา	70 องศา	40 องศา
ความแตกต่างระหว่างกำลังงาน ที่แพร่กระจายได้มากที่สุดและน้อยที่สุด	0.56 dB	1.69 dB	3.06 dB
อัตราขยายของสายอากาศ	0.67 dBi	-1.14 dBi	-6.52 dBi

4.4 สรุป

จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศรอบตัวโพลาริซ์แนวนอนโดยใช้วงกลมวงกลมซ้อนกันสำหรับรับสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอล ที่ประกอบไปด้วยค่า $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริซ์ และอัตราขยายของสายอากาศ โดยนำผลที่ได้จากการจำลองที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 นี้ พบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการจำลองของสายอากาศไม่ได้มีการออกแบบอุปกรณ์คอนเนคเตอร์ และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างขั้นตอนการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศต้นแบบสามารถนำไปใช้งานในช่วงความถี่ของโทรทัศน์ระบบดิจิตอลได้ โดยมีช่วงความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ 404 MHz ถึง 871 MHz และมีแบนด์วิดท์ 467 MHz ซึ่งมากพอสำหรับการประยุกต์ใช้งานตามข้อกำหนดของ กสทช. และการพิจารณาถึงคุณลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่พิจารณาที่ความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz ตามลำดับ พบว่าที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 3 ความถี่ดังกล่าวมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างผลการทดสอบและผลการจำลอง โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบ xy ทั้ง 3 ความถี่มีความแตกต่างของกำลังที่แพร่กระจายได้สูงสุดและต่ำสุดไม่เกิน 3 dB จึงสามารถจะกล่าวได้ว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางในระนาบ xy และผลการทดสอบยังมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณที่ด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสายนำสัญญาณร่วมกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง และการส่งสัญญาณที่มาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะต้องผ่านสายนำสัญญาณมาสู่สายอากาศ ที่มีจุดเชื่อมต่อกันระหว่างคอนเนคเตอร์อยู่มาก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบสำหรับความถี่ 470 MHz 666 MHz และ 862 MHz เป็นแบบรอบตัวในระนาบ xy โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เป็น 121.8 องศา 140 องศา และ 38.9 องศา ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว และมีอัตราขยายในช่วงความถี่ตั้งแต่ 470 MHz ถึง 862 MHz พบว่าผลการทดสอบและผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นอัตราขยายของสายอากาศจะลดลง โดยมีอัตราขยายน้อยที่สุดและมากที่สุดคือ -6.52 dBi และ 0.67 dBi ตามลำดับ ตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา