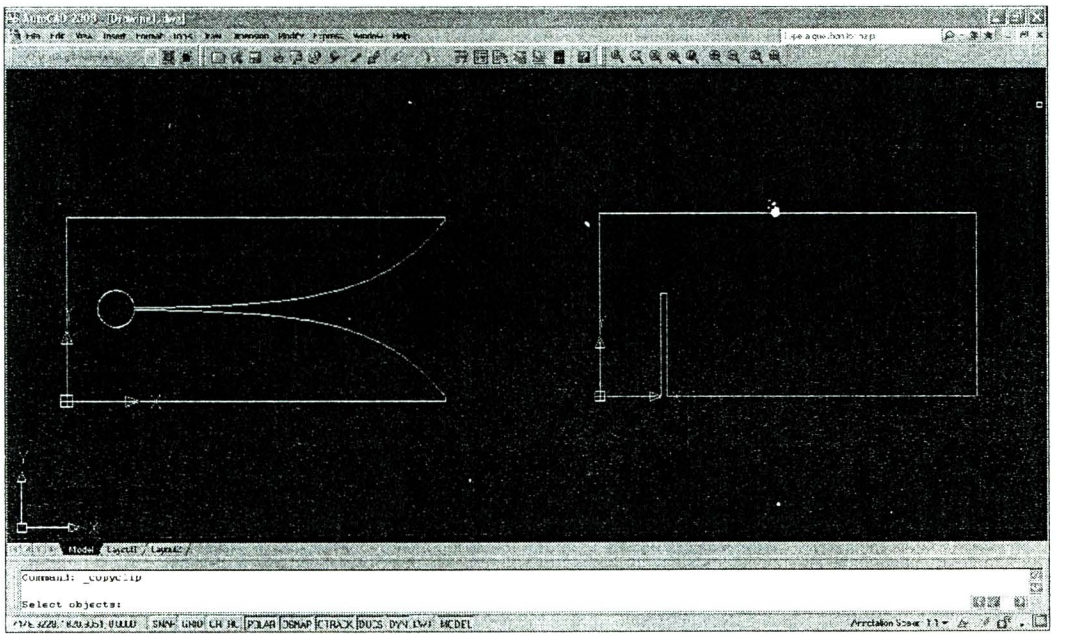
บทที่ 5
ผลการวัดทดสอบ

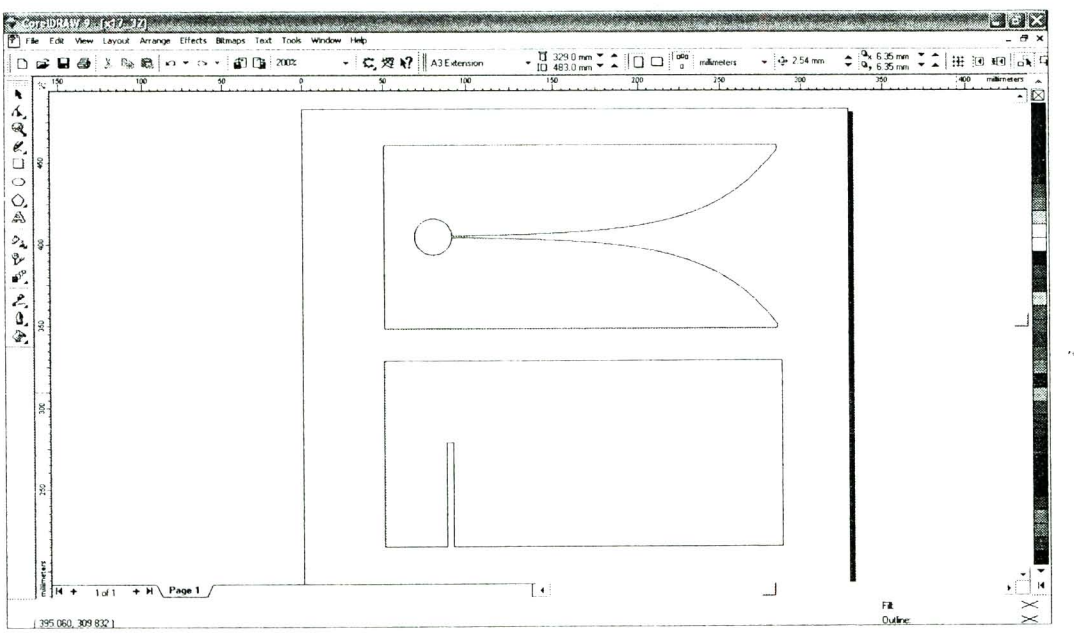
จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตลอดจนการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแถวลำดับวงกลมดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ดังนั้นในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบขึ้น เพื่อทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย โดยมีตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ โดยในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้น จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8720C สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ทั้งสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบหนึ่งอิลิเมนต์และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

5.1 วิธีการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

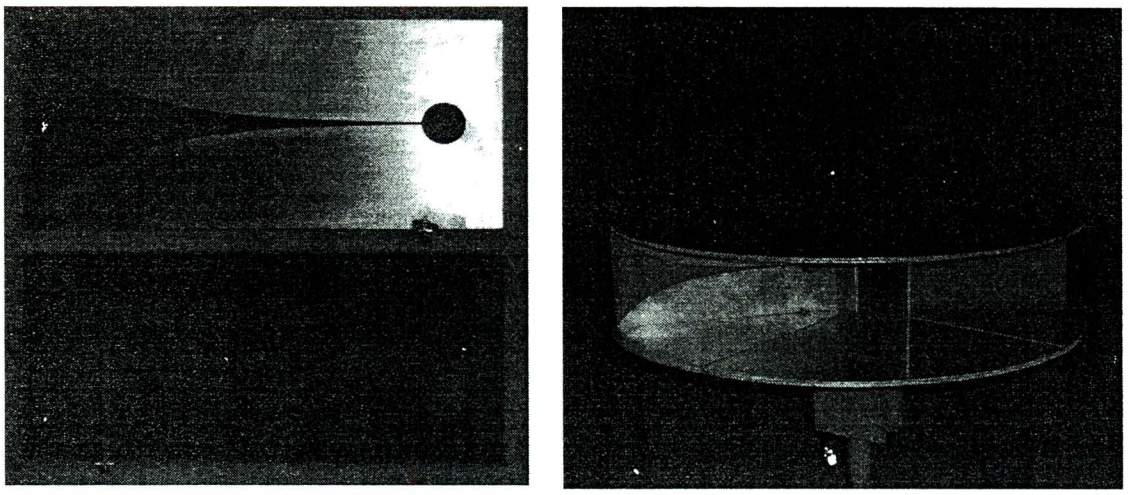
จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จนได้ขนาดและรูปแบบของแถวลำดับของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยผลจากการจำลองจะมีนามสกุลแฟ้มข้อมูลคือ MOD ซึ่งจะต้องนำไฟล์ออก (export file) จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลแฟ้มข้อมูลที่ได้ คือ ชื่อแฟ้มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้แฟ้มข้อมูลแล้ว ได้นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม Auto CAD 2008 แสดงดังรูปที่ 5.1 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม CorelDRAW 9 ดังรูปที่ 5.2 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งได้ใช้แผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 จากนั้นนำสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบต่อเข้ากับขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์มโดยรูปที่ 5.3(ก) แสดงสายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบที่สร้างเสร็จแล้ว และรูปที่ 5.3(ข) เป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่ถูกปิดด้านบนและด้านล่างด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อให้ช่วยในการบีบลำคลื่นให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ในระนาบอะซิมุธให้กว้างขึ้นและเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ตลอดจนเพิ่มความสะดวกสำหรับการวัดทดสอบและการนำไปใช้งานจริง และมีอะลูเนียมรูปทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน ที่ตำแหน่งแกนกลางของสายอากาศแถวลำดับวงกลม สำหรับสะท้อนคลื่นพูหลังให้แผ่ออกไปด้านหน้าทั้งหมด ซึ่งจะมีผลทำให้ได้อัตราขยายเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 โปรแกรม AutoCAD 2008 กำหนดการกัดและตัดแผ่น PCB



รูปที่ 5.2 โปรแกรม CorelDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่น PCB



(ก) สายอากาศร่องแบบเรียวต้นแบบที่สร้าง (ข) สายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่สร้าง

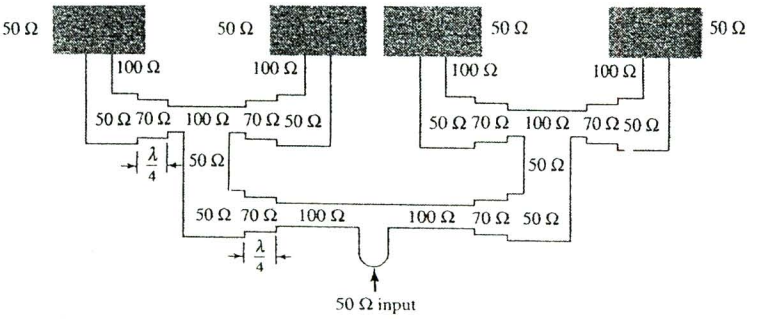
รูปที่ 5.3 สายอากาศที่สร้างขึ้น

5.2 ผลการวัดทดสอบตัวแบ่งกำลังงาน

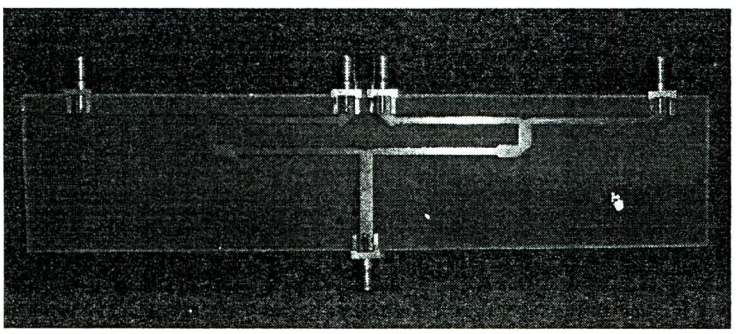
ในรายงานฉบับนี้ได้ใช้ตัวแบ่งกำลังงานเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแบ่งกำลังจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (อุปกรณ์ภาคส่ง) จากหนึ่งพอร์ตด้านเข้าให้เป็นสี่พอร์ตด้านออกตามจำนวนของสายอากาศร่องแบบเรียว โดยมีลายวงจรในการออกแบบและตัวแบ่งกำลังงานที่สร้างแสดงดังรูปที่ 5.4(ก) และ (ข) ตามลำดับ และสมการสำหรับคำนวณหาขนาดความกว้างของเส้นสตริป คือ

$$H' = \frac{Z_0\sqrt{2(\varepsilon_r+1)}}{119.9} + \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\right)\left(\ln\frac{\pi}{2} + \frac{1}{\varepsilon_r}\ln\frac{4}{\pi}\right) \tag{5.1}$$

$$\frac{W_1}{h} = \left(\frac{\left(\exp H'\right)}{8} - \frac{1}{4\left(\exp H'\right)}\right)^{-1} \tag{5.2}$$



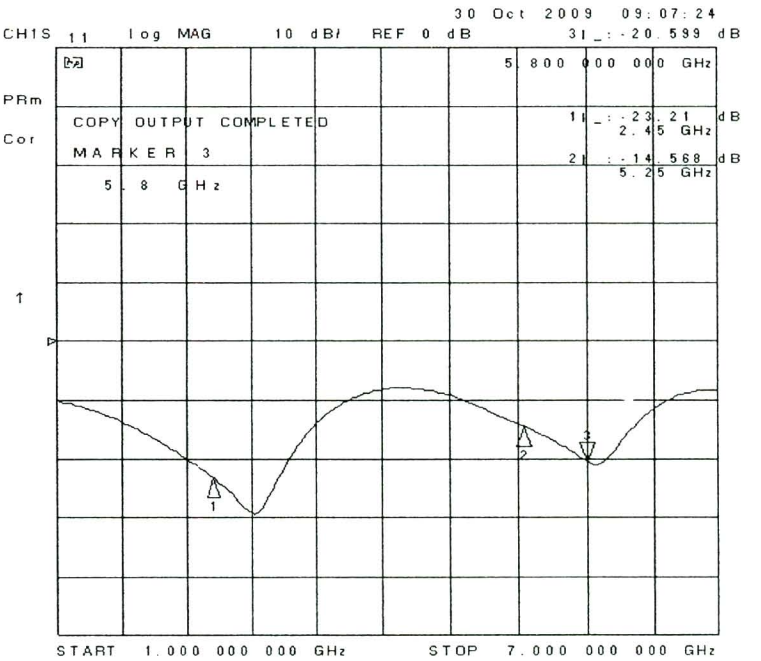
(ก) ลายวงจรที่ใช้ในการออกแบบตัวแบ่งกำลังงาน



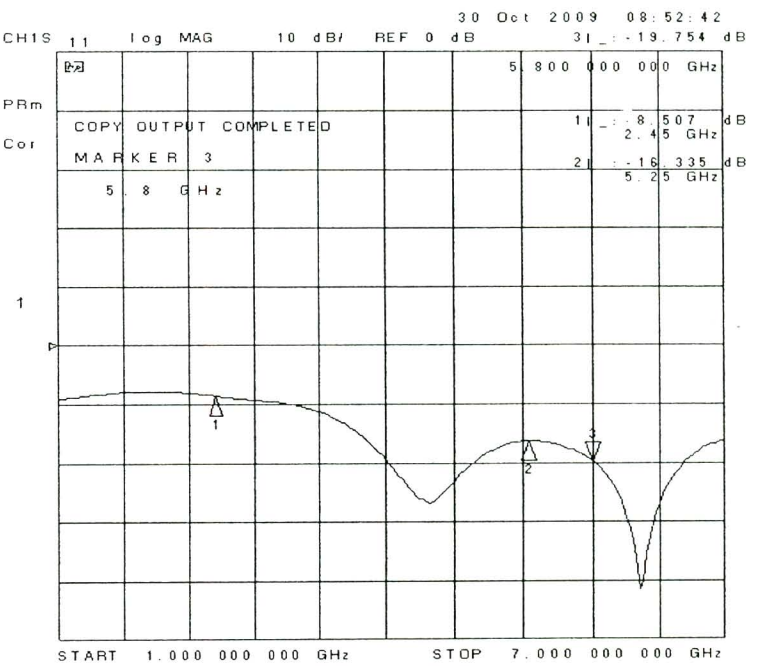
(ข) ตัวแบ่งกำลังงานที่สร้าง

รูปที่ 5.4 ตัวแบ่งกำลังงาน

โดยที่ W_1 คือ ความกว้างของไมโครสตริป ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ λ คือ ความยาวคลื่น จากการออกแบบตามสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะได้ความกว้างของสตริปที่ $Z_0 = 50\,\Omega$ เท่ากับ 3.06 มิลลิเมตร ที่ $Z_0 = 70\,\Omega$ เท่ากับ 1.62 มิลลิเมตร ที่ $Z_0 = 100\,\Omega$ เท่ากับ 0.71 มิลลิเมตร สำหรับการวัดทดสอบการแมตช์ของตัวแบ่งกำลังนั้นได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่แต่ละพอร์ตของตัวแบ่งกำลัง โดยพอร์ตที่ทำการวัดทดสอบนั้นจะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและพอร์ตที่เหลือจะต่อเข้ากับหัวต่อ 50 Ω ถ้า ณ ความถี่ที่พิจารณามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบรูณ์ และจากการวัดทดสอบได้ผลดังรูปที่ 5.5(ก) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ตด้านเข้า รูปที่ 5.5(ข) ถึง (จ) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ตด้านออกซึ่งก็คือพอร์ตที่ต่อเชื่อมกับสายอากาศร่องแบบเรียวพอร์ตที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ

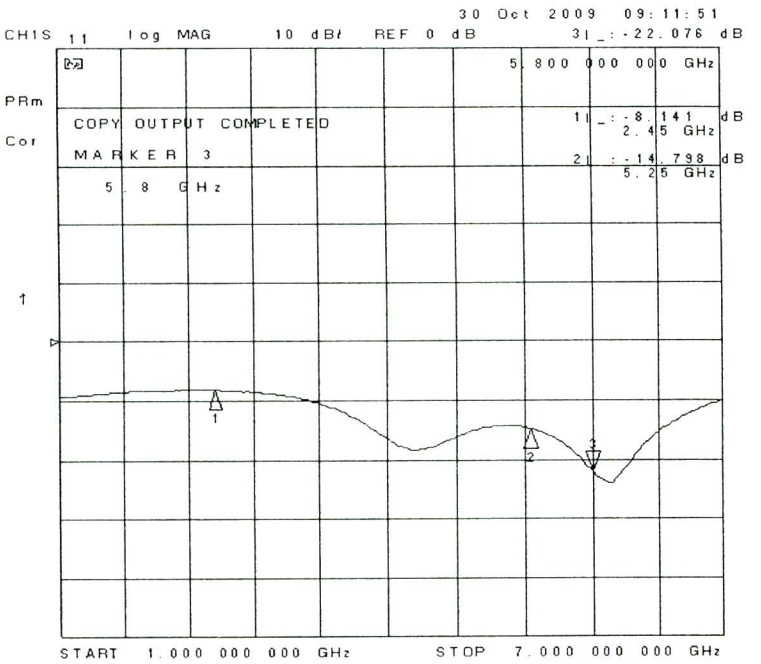


(ก) ที่พอร์ตด้านเข้า

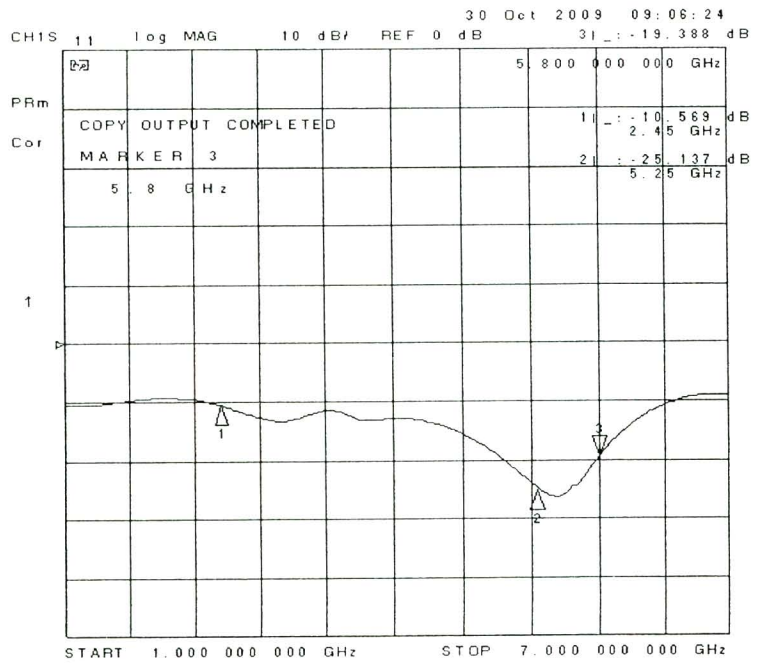


(ข) ที่พอร์ตด้านออกที่ 1

รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน

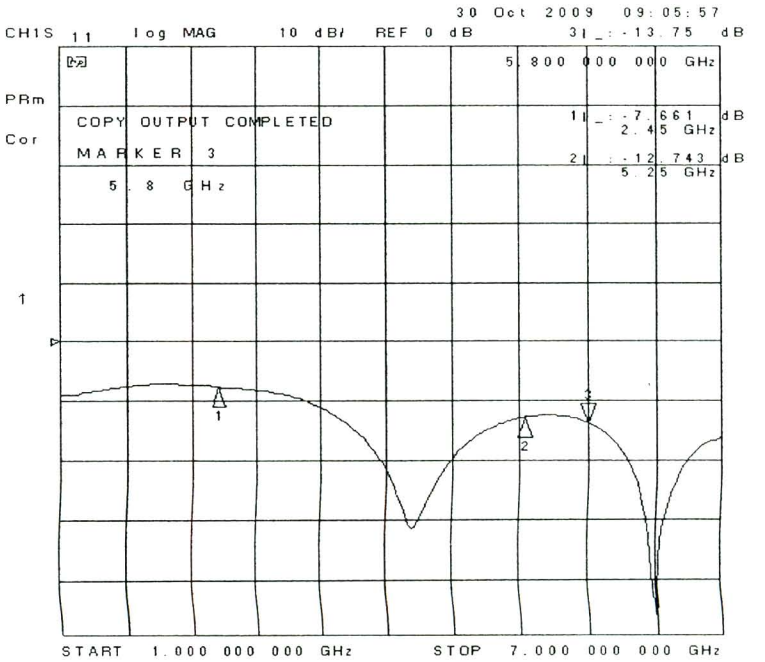


(ค) ที่พอร์ตด้านออกที่ 2



(ง) ที่พอร์ตด้านออกที่ 3

รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน (ต่อ)



(จ) ที่พอร์ตด้านออกที่ 4

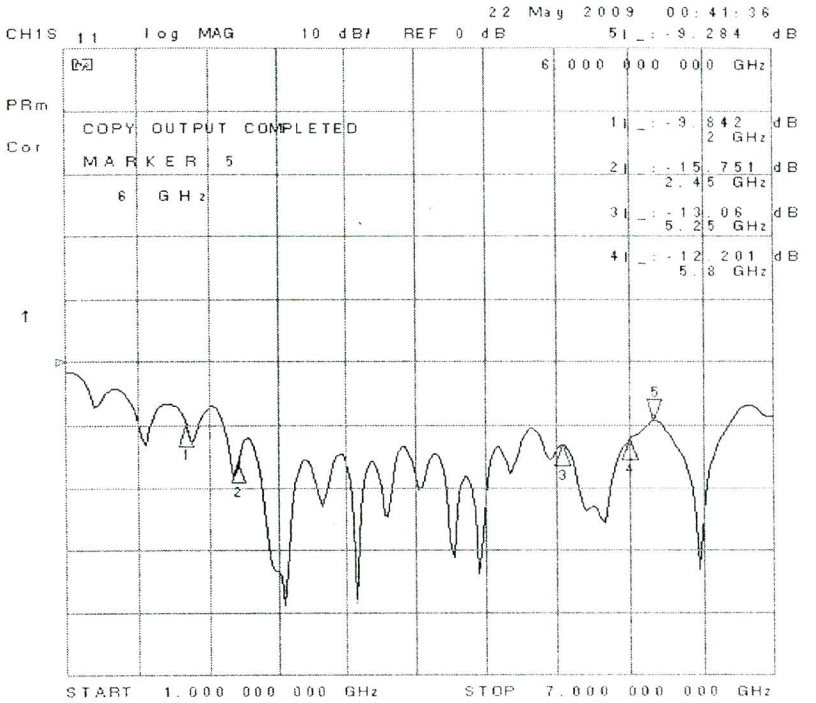
รูปที่ 5.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับตัวแบ่งกำลังงาน (ต่อ)

จากผลการวัดทดสอบตัวแบ่งกำลังงาน จะเห็นว่าที่พอร์ตด้านออกทั้ง 4 พอร์ต มีการแมตช์ยังไม่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานรวมของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่วัดได้ ดังนั้นจึงได้ทำการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) ของผลวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

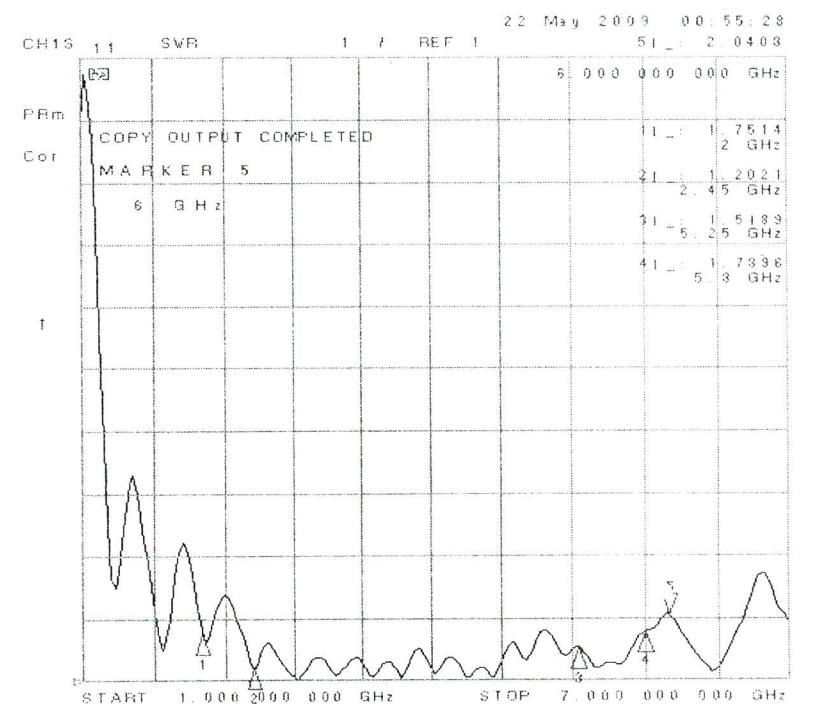
5.3 ผลการวัดทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความกว้างแถบ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตช์อิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient) หรือในรูปของพารามิเตอร์ S_{11} และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ S_{11} หมายถึงการสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า (port 1) ของสายอากาศ ซึ่งขนาดของ S_{11} อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด (รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงค์, ม.ป.ป) สำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ ในงานประยุกต์ต่าง ๆ ค่าของ S_{11} จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดี จากรูปที่ 5.6(ก) แสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบในรูปของพารามิเตอร์ S_{11} จากรูปจะสังเกตได้ว่าสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz ซึ่งสอดคล้องกับค่า SWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 2 GHz ถึง 6 GHz เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 5.6(ข)

รูปที่ 5.7(ก) และ (ข) แสดงกราฟเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งตามลำดับ

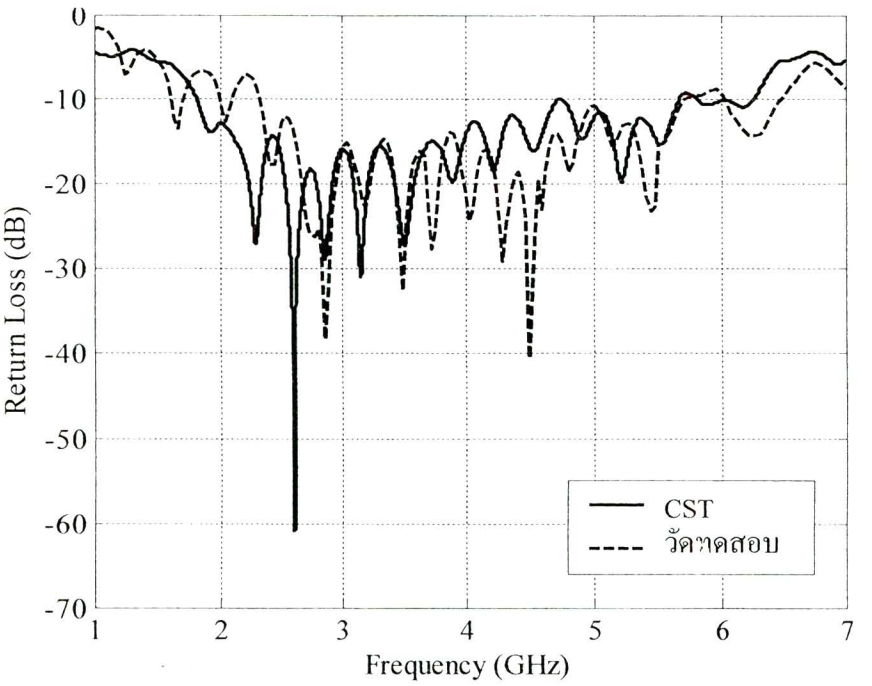


(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

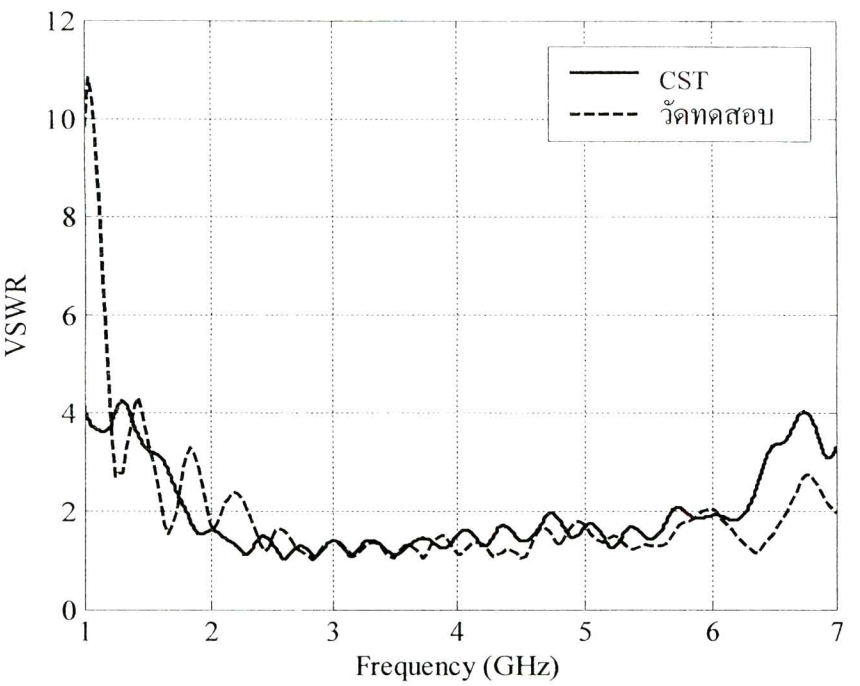


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.6 ผลการวัดทดสอบของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

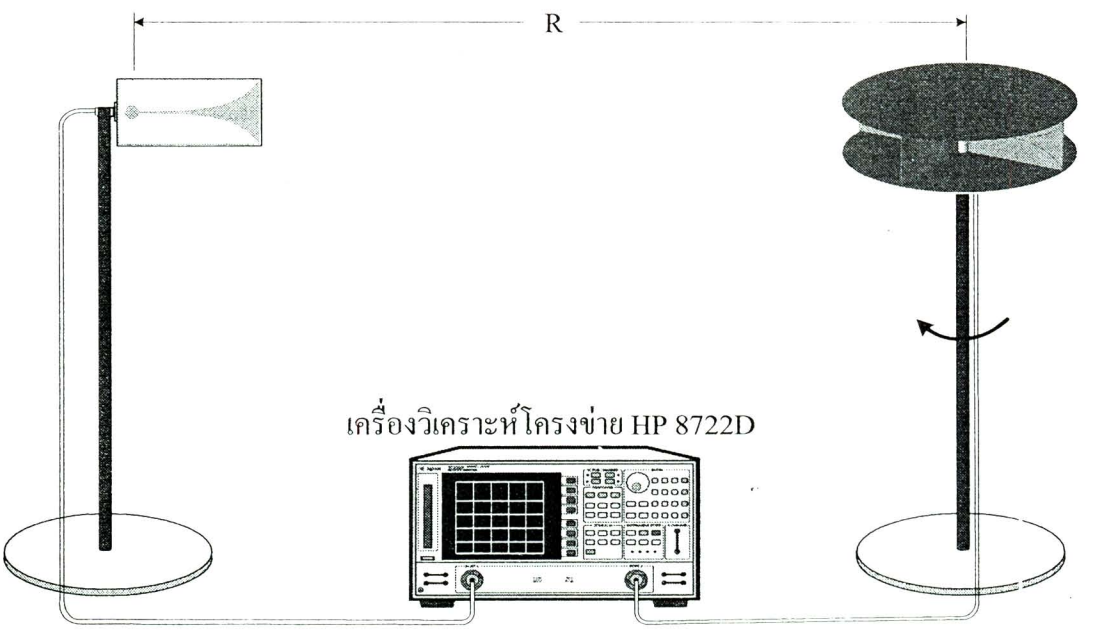


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

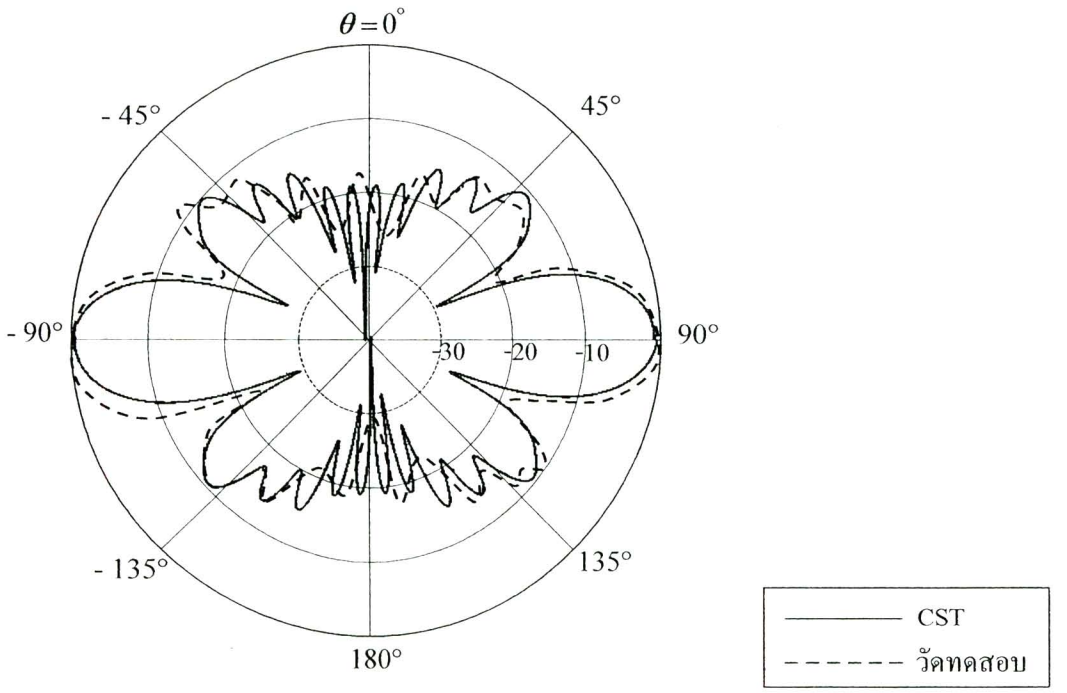
รูปที่ 5.7 ผลการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

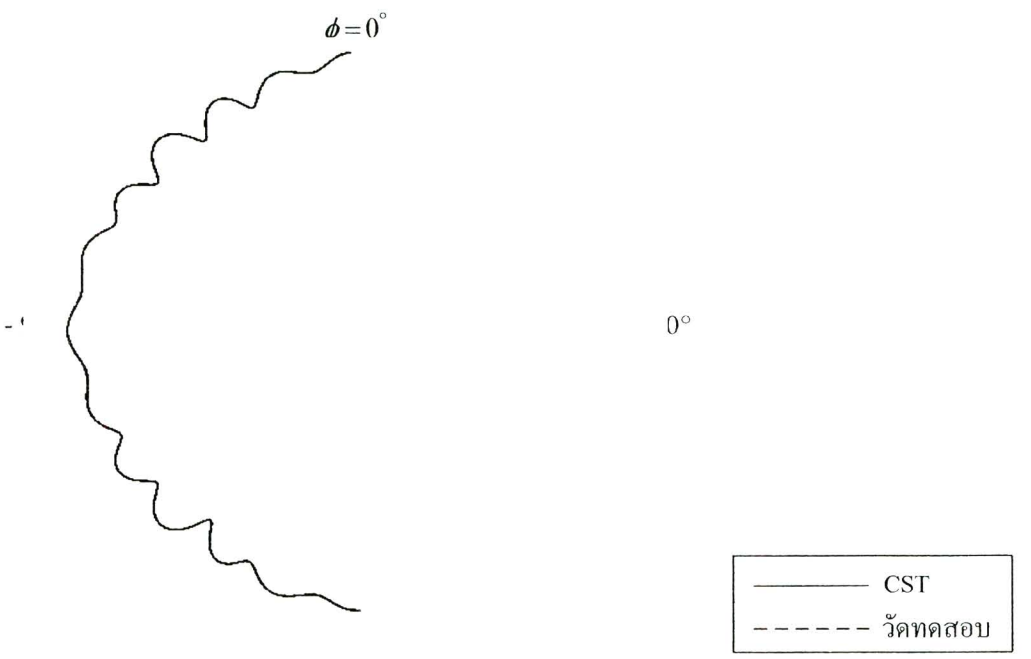
จากรูปที่ 5.8 แสดงวิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยทำการทดสอบในระยะสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2 / \lambda$ ซึ่ง R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบและสายอากาศอ้างอิงโดยการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ความถี่สูงสุดมีค่าเท่ากับ 82.65 เซนติเมตร และ D คือขนาดความกว้างของร่องเรียวของสายอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.62 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศร่องแบบเรียว โดยมีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2 GHz ถึง 6 GHz หนึ่งอิลิเมนต์มาเป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่นำมาทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับ ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนหมุนเพื่อรับคลื่นจากมุม 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา โดยได้ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และผลจากการวัดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.9 จะเห็นได้สายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบมีแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบแม่เหล็กที่มีระดับของสัญญาณเฉลี่ยไม่แตกต่างกันในแต่ละมุม ส่งผลให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างกว่า



รูปที่ 5.8 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

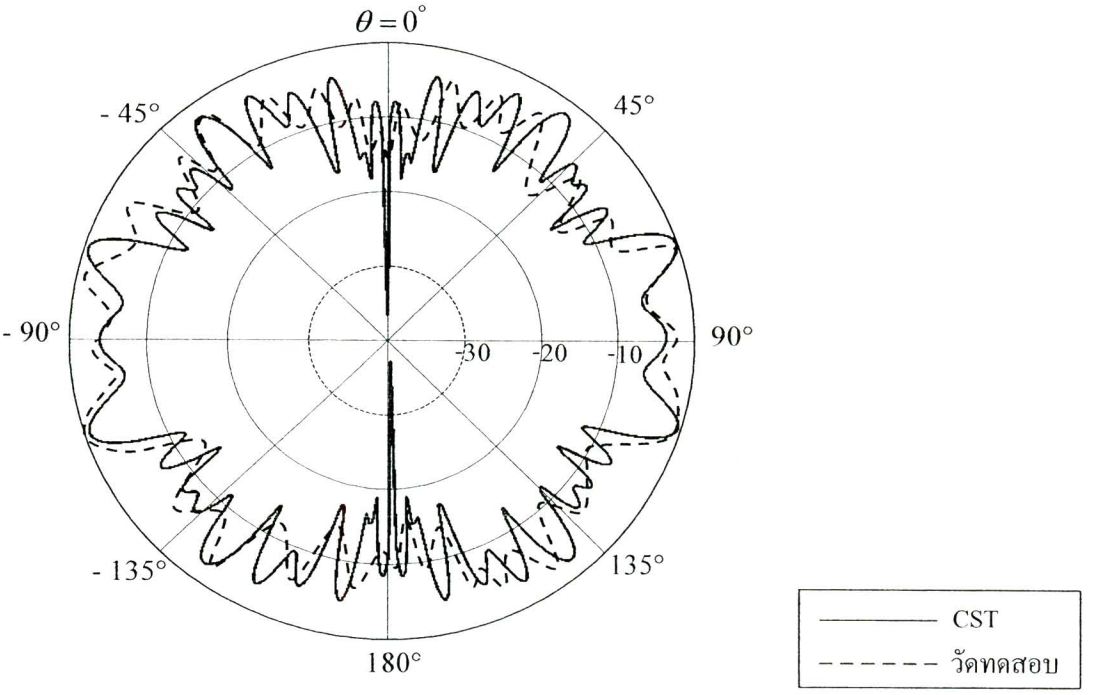


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 2.45 GHz

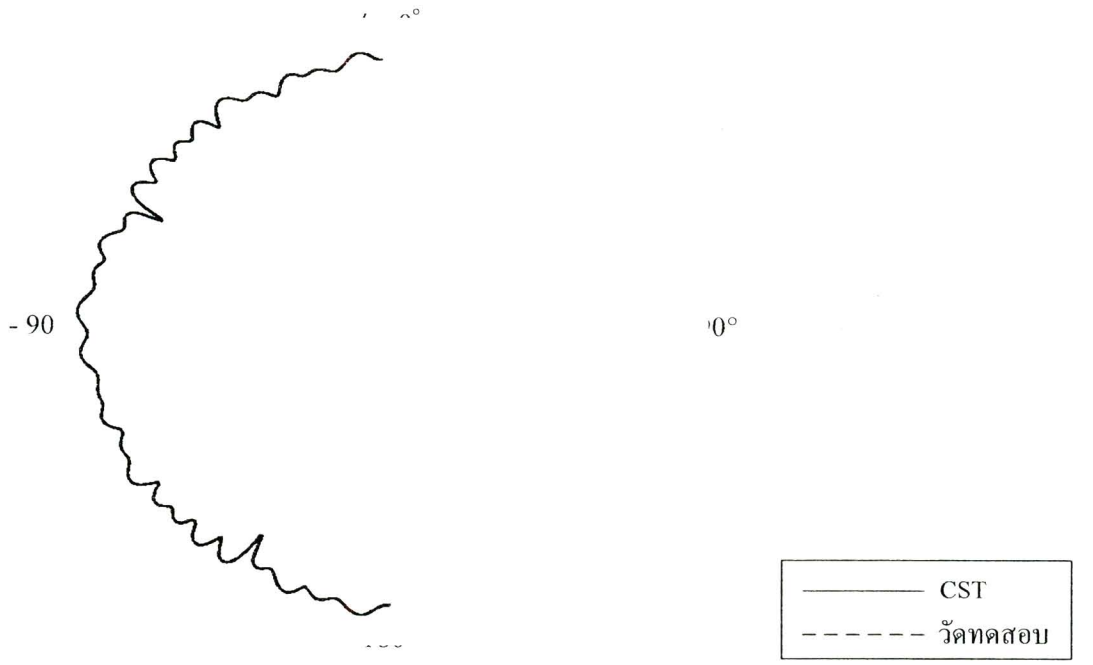


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ

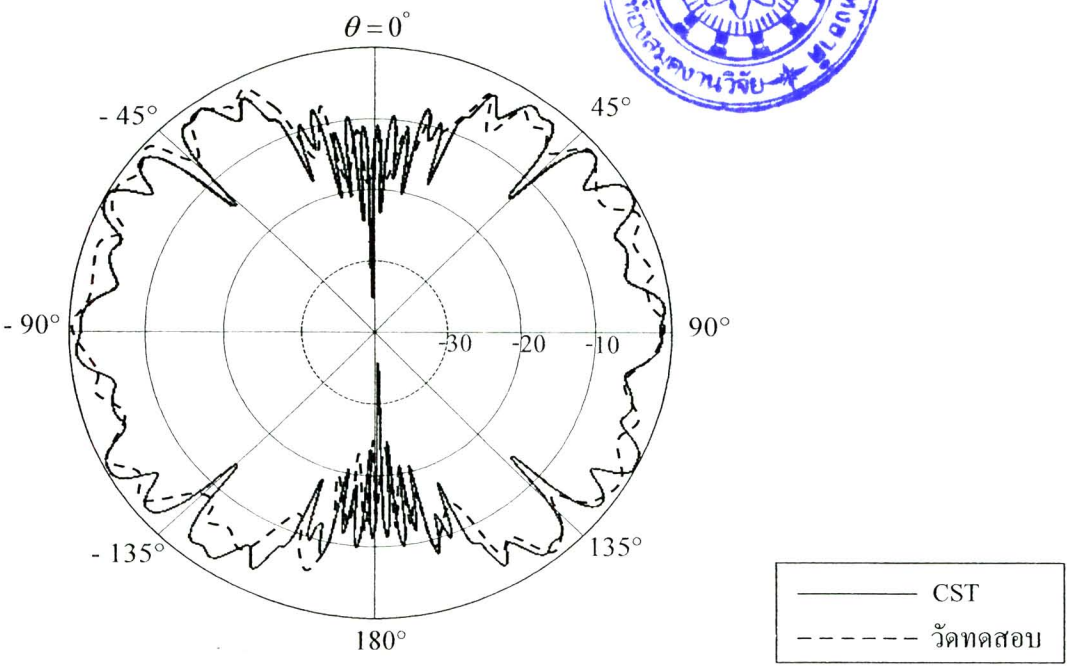


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.25 GHz

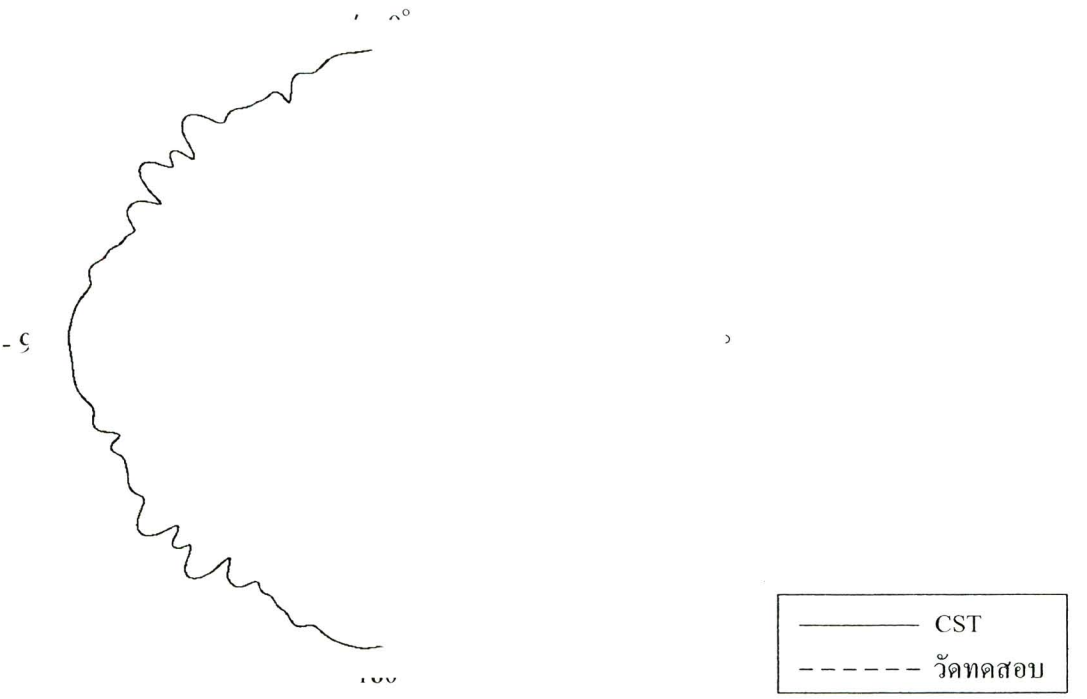


(ง) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.25 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ (ต่อ)



(จ) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 5.8 GHz

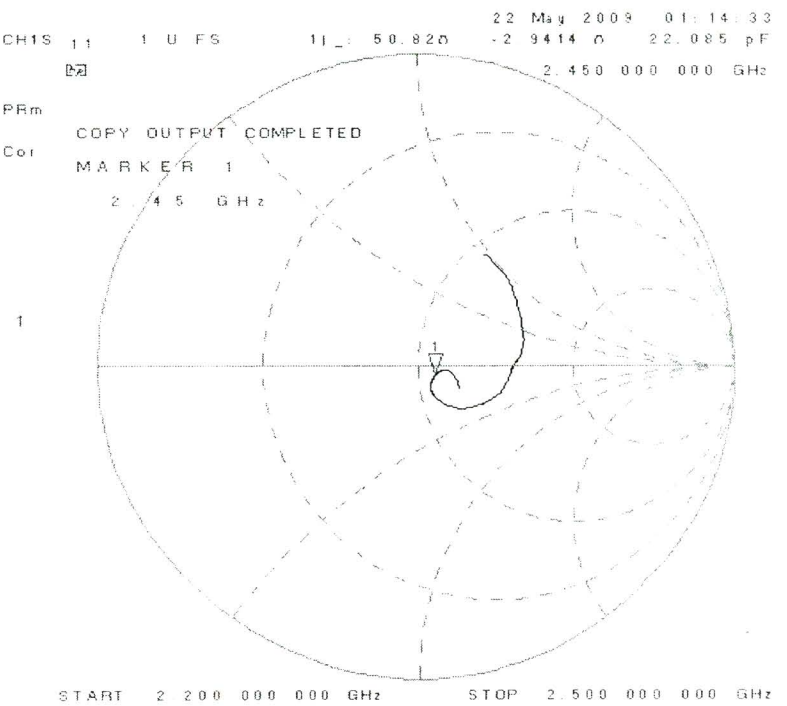


(ฉ) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และการวัดทดสอบ (ต่อ)

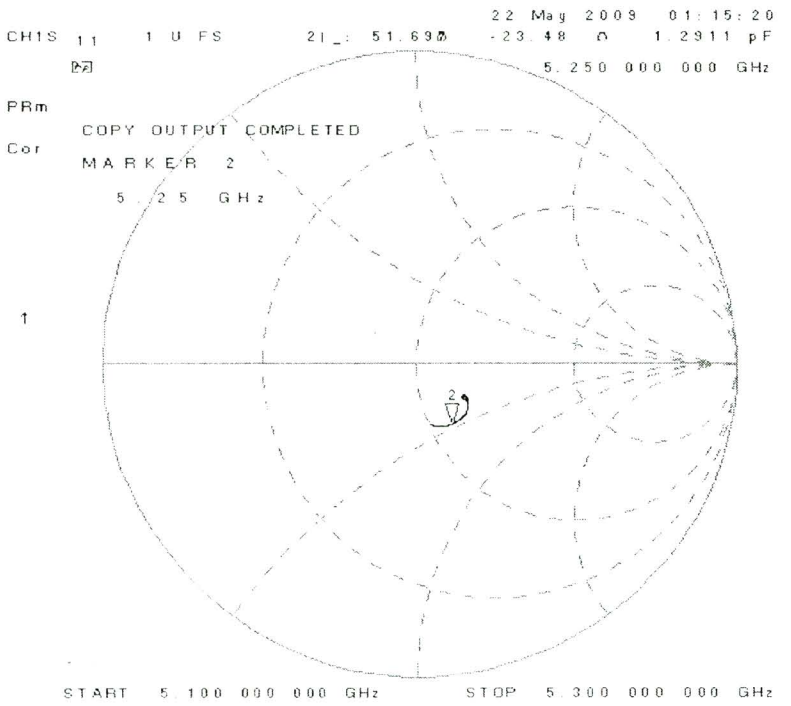
5.5 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบโดยทำการแมตช์ด้วยวงจรแบ่งกำลัง ซึ่งอ้างอิงมาจากทฤษฎีการแบ่งกำลังของวิลคินสัน (Wilkinson divider) ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแถวลำดับ ซึ่งจะกำหนดให้เป็นสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ จากรูปที่ 5.10 แสดงผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50.82 – j2.94 โอห์ม 51.69 – j23.48 โอห์ม และ 49.94 – j38.19 โอห์ม ดังรูปที่ 5.13(ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ

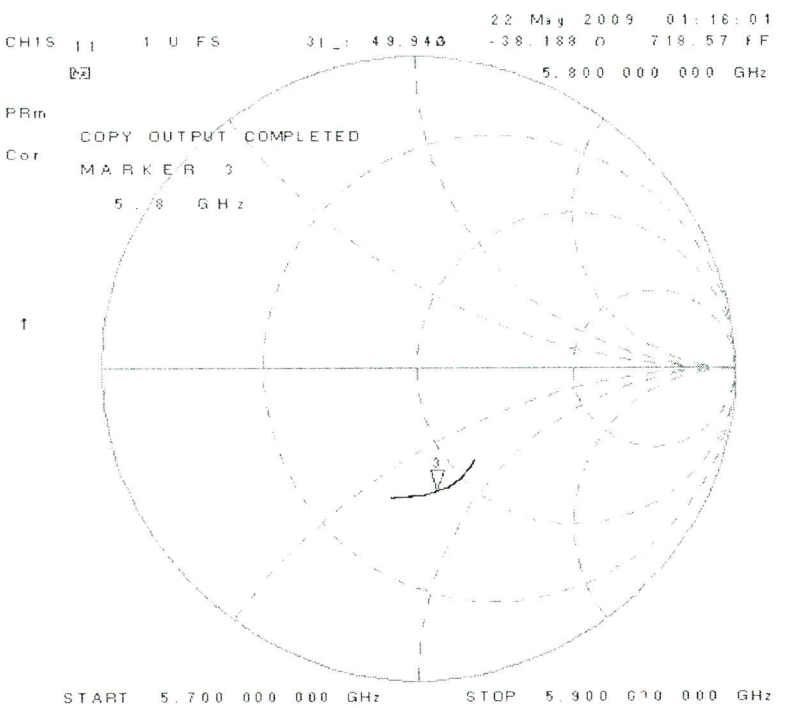


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 2.45 GHz

รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการวัดทดสอบ



(ข) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 5.25 GHz

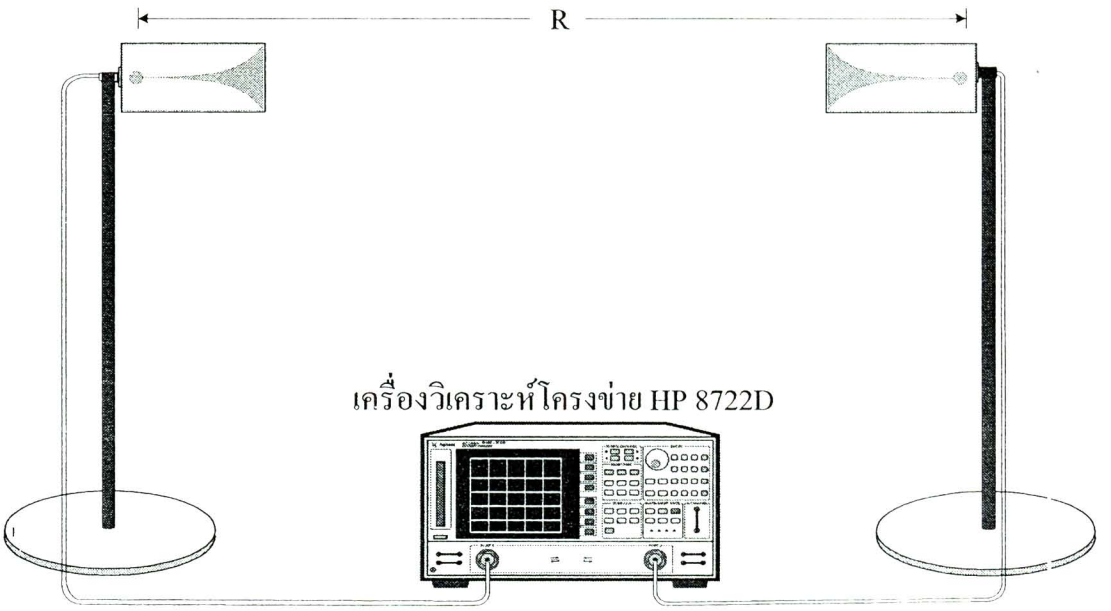


(ค) ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 5.10 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจากการวัดทดสอบ (ต่อ)

5.6 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบนั้นในขั้นตอนแรกได้ทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียว เพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศเพียงอิลิเมนต์เดียวแสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ



รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอีลิเมนต์

จากนั้นใช้สมการการส่งผ่านของฟริส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศหนึ่งอีลิเมนต์ โดยสมการการส่งผ่านของฟริสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_t G_r \tag{5.3}$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + Loss}{2}\right) \tag{5.4}$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)}{2} \right) \tag{5.5}$$

$$G_{r_{dB}} = P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} - G_{t_{dB}} + 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \tag{5.6}$$

โดยที่ P_t คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง $(-10\,dB)$

P_r คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ

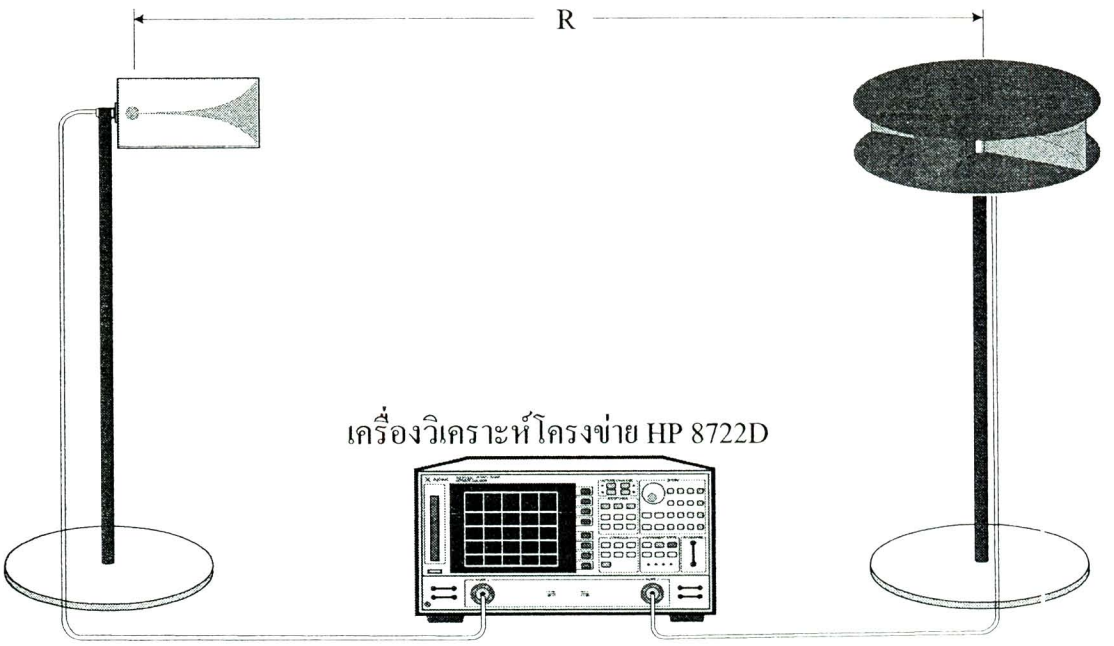
G_{dB} คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ เมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน

G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง

G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ

R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ $\left(82.65\times10^{-2}\,m\right)$

และในขั้นตอนต่อมาได้ทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลม แสดงดังรูปที่ 5.12 โดยกำหนดให้สายอากาศร่องแบบเรียวเป็นสายอากาศภาคส่งและสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับ ซึ่งได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดกำลังไฟฟ้าที่รับได้ โดยกำหนดระยะทางระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับที่ใช้ในการวัดทดสอบเท่ากับ 82.65 เซนติเมตร ทั้งที่ความถี่ 2.45 GHz 5.25 GHz และ 5.8 GHz มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่งเท่ากับ -10 dB



รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

5.6.1 ผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์

จากสมการ (5.5) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียวได้ดังนี้ และแสดงค่าได้ดังตารางที่ 5.1

ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$G_{\mathrm{dB}} = \left(\frac{(-26.9099\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times\left(82.65\times10^{-2}\right)}{3\times10^{8}/2.45\times10^{9}} \right)}{2} \right) = 10.83\ \mathrm{dB}$$

ที่ความถี่ 5.25 GHz

$$G_{\mathrm{dB}} = \left(\frac{(-38.9098\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times\left(82.65\times10^{-2}\right)}{3\times10^{8}/5.25\times10^{9}} \right)}{2} \right) = 8.14\ \mathrm{dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz

$$G_{\mathrm{dB}} = \left(\frac{(-41.935\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times(82.65\times10^{-2})}{3\times10^{8}/5.8\times10^{9}} \right)}{2} \right) = 7.06\ \mathrm{dB}$$

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราขยายของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอีลิเมนต์

คุณลักษณะของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอีลิเมนต์	แถบความถี่		
	2.45 GHz	5.25 GHz	5.8 GHz
อัตราขยาย (dB) (CST)	11	8.35	7.37
อัตราขยาย (dB) (วัดทดสอบ)	10.83	8.14	7.06

5.6.2 ผลการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

จากสมการ (5.6) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่างได้ดังนี้

ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$G_{r_{\mathrm{dB}}} = (-25.6299\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) - (10.83\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times(82.65\times10^{-2})}{3\times10^{8}/2.45\times10^{9}} \right) = 12.11\ \mathrm{dB}$$

ที่ความถี่ 5.25 GHz

$$G_{r_{\mathrm{dB}}} = (-37.2\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) - (8.14\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times(82.65\times10^{-2})}{3\times10^{8}/5.25\times10^{9}} \right) = 9.87\ \mathrm{dB}$$

ที่ความถี่ 5.8 GHz

$$G_{r_{\mathrm{dB}}} = (-40.865\ \mathrm{dB}) - (-10\ \mathrm{dB}) - (7.06\ \mathrm{dB}) + 20\log\left(\frac{4\times\pi\times(82.65\times10^{-2})}{3\times10^{8}/5.8\times10^{9}} \right) = 8.13\ \mathrm{dB}$$

จากผลการคำนวณจะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ จากการวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ	แถบความถี่		
	2.45 GHz	5.25 GHz	5.8 GHz
อัตราขยาย (dB) (CST)	12.31	10.03	8.32
อัตราขยาย (dB) (วัดทดสอบ)	12.11	9.87	8.13

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอัตราขยายจากผลการวัดทดสอบของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำสายอากาศร่องแบบเรียวมาจัดแถวลำดับแบบวงกลมที่มีตัวสะท้อนอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกและแผ่นอะลูมิเนียมปิดด้านบนและล่าง จะมีค่าอัตราขยายที่สูงกว่าในทุก ๆ แถบความถี่ และยังมีคุณลักษณะเช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง คือ มีลักษณะการกระจายของคลื่นรอบ ๆ สายอากาศในระนาบอะซิมุธ โดยคลื่นจะถูกแผ่กระจายออกไปทุกทิศทาง จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายทั้งภายในและภายนอกอาคาร หรือสวนสาธารณะ

ตารางที่ 5.3 ค่าอัตราขยายจากผลการวัดทดสอบของสายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์และสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ

ความถี่ (GHz)	สายอากาศร่องแบบเรียวหนึ่งอิลิเมนต์	สายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ
	อัตราขยาย (dB)	อัตราขยาย (dB)
2.45	10.83	12.11
5.25	8.14	9.87
5.80	7.06	8.13

5.7 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศแถวลำดับวงกลมต้นแบบ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบ และจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกลทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าอิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่าผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และจากการวัดทดสอบมีค่าคล้ายคลึงกัน สำหรับผลบางส่วนที่แตกต่างกันซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากข้อจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลตลอดจนผลที่เกิดจากการวัดทดสอบในสภาพจริง