

สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบร่วมที่มีการปรับจูนระนาบกราวด์
แบบชั้นบันไดสองชั้นสำหรับประยุกต์ใช้งานย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง

CPW-Fed Rectangular Aperture Antenna with Two-Step Ground-Plane Tuning for UWB Applications

วัชรพล นาคทอง¹ ปิยคนัย บุญไมตรี¹ สุภาธิณี กรสิงห์¹ เอกจิต คุ่มวงศ์¹ อำนวย เรืองวาริ²

Received: June, 2014; Accepted: September, 2014

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบร่วมที่มีการปรับจูนระนาบกราวด์สำหรับประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง โดยใช้เทคนิคการปรับสลับที่ตัวสายอากาศ และการเจาะรูแบบบันไดสองชั้นที่ระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ 129.41% (3 - 14 GHz) ถูกออกแบบด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ FR4 มีค่าไดอิเล็กตริก 4.3 มีความหนา 0.764 มม. และมีขนาดพื้นที่ 60×50 มม.² โครงสร้างของสายอากาศวิเคราะห์จากการจำลองแบบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ พบว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้ครอบคลุมย่านความถี่ UWB (3.1 - 10.6 GHz) และมีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 4.79 dBi การวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CST ในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

คำสำคัญ : สายอากาศช่องเปิด; สี่เหลี่ยมผืนผ้า; ระนาบร่วม; ระนาบกราวด์บันไดสองชั้น; ความถี่แถบกว้างยิ่ง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

E - mail : oachi525@gmail.com, amnoiy.r@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper presents a CPW-fed rectangular aperture antenna with ground-plane tuning for UWB applications by using the stub tuning and two-step etching techniques on both sides of the ground-plane were implemented. The antenna was designed on the FR4 substrate printed circuit board with dielectric constant of 4.3, thickness of 0.764 mm and planar dimension of $60 \times 50 \text{ mm}^2$. Structure of the antenna was analyzed by simulations then compared with experimental results. From the comparison, it was found that the antenna had impedance bandwidth 129.41% (3 - 14 GHz) which was applicable and covering the UWB (3.1 - 10.6 GHz) frequency range with average gain of 4.79 dBi. In this research, the CST program was used to analyze and design the antenna.

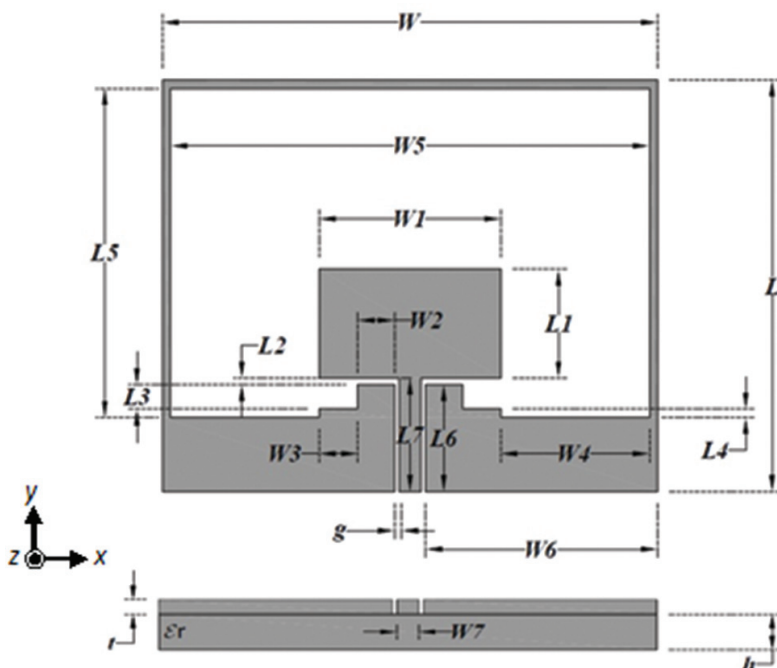
Keywords : Aperture antenna; Rectangular; Co-planar; Two-step ground-plane; Ultra-wideband (UWB)

บทนำ

ปัจจุบันสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างยิ่ง ได้ถูกพัฒนาจากสายอากาศที่ใช้งานแบบหลายย่านความถี่ (Chen W.S., et al., 2007; Abunjaileh A.I., 2007) หรือจากสายอากาศแบบใช้งานย่านความถี่กว้างจนถูกพัฒนา มาเป็นความถี่กว้างยิ่งในปัจจุบัน แต่ละแบบจะใช้งานที่แตกต่างกันไปตามระบบและมาตรฐานที่ถูกบังคับ ใช้งานในแต่ละประเทศ ซึ่งใช้ในด้านพาณิชย์ อุตสาหกรรม ภาครัฐการและด้านการศึกษา เป็นต้น จึงมีผู้คิดค้นหาวิธีออกแบบให้สายอากาศมีผลตอบสนองตามมาตรฐานของ FCC ที่กำหนดช่วง ย่านความถี่แถบ คือ 3.1 - 10.6 GHz (Ultra-Wide Band : UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a (FCC. 2002; Schantz H. 2005; Hong T., et al., 2009; Kim S. J., 2007) ซึ่งมีข้อดีคือ ส่งผ่านข้อมูล ที่ความถี่สูงใช้ส่งข้อมูลจำนวนมากและส่งได้อย่างรวดเร็ว แต่มีปัญหาคือ สายอากาศที่ใช้กับย่านความถี่ สูงมีราคาแพงมาก จึงมีการพัฒนาสายอากาศให้ตอบสนองต่อช่วงย่านความถี่กว้างยิ่ง แต่ยังมีปัญหา ในส่วนของโครงสร้างปรับจูนที่ซับซ้อนต่อการสร้าง (Eldek A. A. 2006; Jan J. Y., et al., 2006; ปวีร์ และคณะ, 2554) ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบร่วมแบบพื้นฐาน (ปวีร์ และคณะ, 2554) เพื่อขยายแบนด์วิดท์ โดยใช้เทคนิคการเจาะร่องระนาบกราวด์แบบชั้นบันได สองชั้น (Eldek A. A. 2006; Jan J. Y., et al., 2006; ปวีร์ และคณะ, 2554) ซึ่งการปรับเจาะร่องชั้นบันได จะเป็นตัวปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นที่ส่งผลต่อค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับและค่าอินทิแดนซ์ ($R+jX$) ของสายอากาศตามที่ต้องการ ให้ตอบสนองกับย่านความถี่แถบกว้างยิ่งที่ความถี่ 3.1 - 10.6 GHz การจำลองโครงสร้างสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงาน

การออกแบบและผลการจำลองแบบ

1. โครงสร้างสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดความกว้าง (W) และความยาว (L) เท่ากับ 60×50 มม.² ในการออกแบบสายอากาศใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าไดอิเล็กตริก (ϵ_r) 4.3 ค่าไดอิเล็กตริกlossแทนเจนต์ 0.015 มีค่าความหนา (h) 0.764 มม. และขนาดความหนาของแผ่นทองแดง (t) 0.017 มม. โดยทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

การเช่าห้องและการทำค่าอิมพีแดนซ์คำนวณได้จากสมการที่ 1 - 6 (ประยุทธ, 2537) ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการออกแบบสายอากาศจะแสดงในตารางที่ 1

$$Z_o = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{r'e}}} \times \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (1)$$

โดยที่ค่า $K' = \sqrt{1 - (k)^2}$ (2)

$$\varepsilon_{re} = 1 + q(\varepsilon_r - 1) \quad (3)$$

$$q = \frac{1}{2} \left[\frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right] \quad (4)$$

ค่า K_1 และ K_2 จะได้

$$K_1 = \frac{a}{b}; \quad a = \frac{W_n}{2}, \quad b = \frac{(2g + W_n)}{2} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{\sinh(\frac{\pi a}{2h})}{\sinh(\frac{\pi b}{2h})} \quad (6)$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากกรอกแบบสายอากาศ

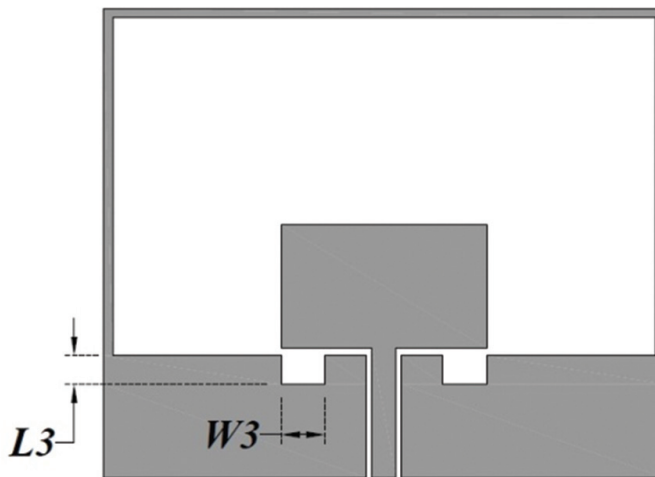
ขนาดความกว้าง		ขนาดความยาว	
ตัวแปร ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W	60	L	50
W_1	22	L_1	13.2
W_2	4.4	L_2	0.8
W_3	4.7	L_3	3
W_4	18	L_4	1
W_5	59	L_5	36
W_6	28.1	L_6	13
W_7	2.6	L_7	13.8
g	0.3	h	0.764

2. ผลการจำลองแบบของสายอากาศ การออกแบบโครงสร้างใช้วิธีเชิงประสบการณ์ (Empirical Method) ร่วมกับโปรแกรมจำลอง CST สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบร่วมพื้นฐาน จากงานวิจัย (ปวีร์ และคณะ, 2554) และการเจาะร่องระนาบกราวด์แบบชั้นบันไดสองชั้นของสายอากาศ ไมโครสตริป จากงานวิจัยที่ (Eldek A. A., 2006) การหาค่าความยาวคลื่นสัมพันธ์ (λ_g) (Balanis C. A., 1982) คำนวณได้ดังสมการที่ 7 โดยกำหนดความถี่ (f) เท่ากับ 3 GHz และค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า (ϵ_r) เท่ากับ 4.3

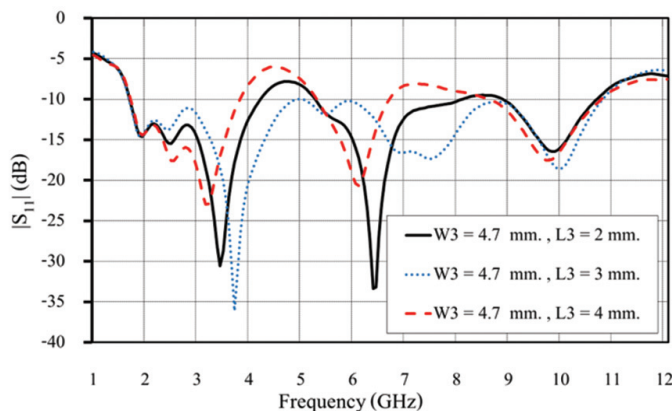
$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}}; \quad \epsilon_{eff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (7)$$

ซึ่งการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์ที่ส่งผลได้ดีที่สุดมี 2 ส่วนสำคัญคือ ส่วนที่หนึ่งจะทำการเจาะร่องที่ระนาบกราวด์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าในส่วนของชั้นบันไดที่หนึ่ง ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2 ทำให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่มีผลต่อค่าอินพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างขึ้น จากการออกแบบที่ช่วงความถี่ 3 GHz จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือค่าความกว้าง W_3 และค่าความยาว L_3 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.1\lambda_g$ ถึง $0.2\lambda_g$ และช่วง $0.04\lambda_g$ ถึง $0.05\lambda_g$

(ปวีร์ และคณะ, 2554) ดังนั้น สามารถหาค่าระยะ W_3 และ L_3 ของสายอากาศช่องเปิด ในรูปที่ 2 ได้โดยการเลือกปรับค่าคงที่ตามเทคนิคของงานวิจัยที่ (Eldek A. A. 2006; Jan J. Y., et al., 2006; ปวีร์ และคณะ, 2554) จากการเซาะร่องระนาบกราวด์ของค่าความกว้างเลือกแบบคงที่ จะได้ W_3 เท่ากับ 4.7 มม. ทำให้ช่วยลดการปรับจูนค่าความยาวคลื่นลงและค่าความยาว L_3 จะถูกปรับต่อตามความยาวคลื่นโดยมีขนาดตั้งแต่ 2, 3 และ 4 มม. พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของ W_3 เท่ากับ 4.7 มม. และ L_3 เท่ากับ 3 มม. ซึ่งผลของการตอบสนองสามช่วงความถี่คือ ความถี่ต่ำ 89.40% (1.67 - 4.37 GHz) ความถี่กลาง 43.96% (5.24 - 8.19 GHz) และความถี่สูง 16.41% (9.01 - 10.62 GHz) ดังรูปที่ 3 แต่ยังไม่ครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ จึงทำการปรับต่อในส่วนที่สอง

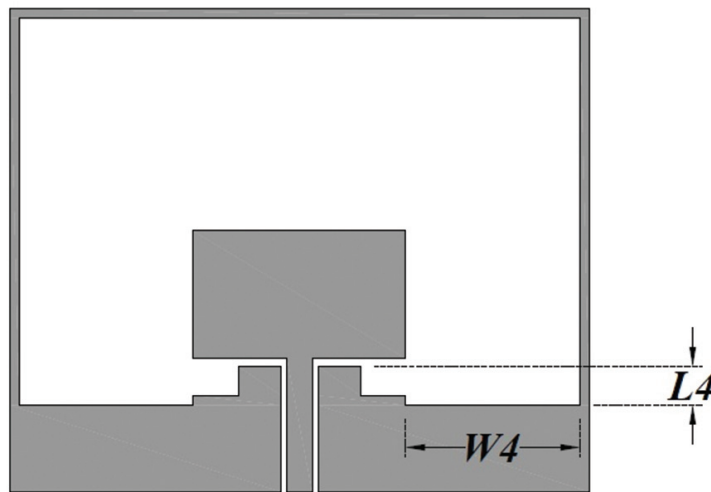


รูปที่ 2 การเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ของสายอากาศช่องเปิดแบบระนาบ

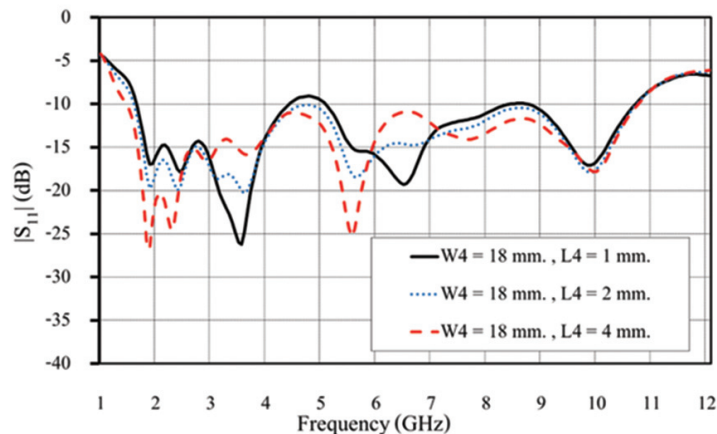


รูปที่ 3 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับ W_3 และ L_3

ส่วนที่สองจะทำการเจาะรูที่ระนาบกราวด์ชั้นบนโดแบบสองชั้น ดังรูปที่ 4 จากการสังเกตพบว่า ค่าความกว้างของระนาบกราวด์กับตัวสายอากาศจะตรงกัน ทำให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่แบนด์วิดท์กว้างมากขึ้นและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือค่าความกว้าง W_4 และค่าความยาว L_4 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ในช่วง $0.1\lambda_g$ ถึง $0.2\lambda_g$ และช่วง $0.04\lambda_g$ ถึง $0.05\lambda_g$ (Eldek A. A. 2006; Jan J. Y., et al., 2006; ปวีร์ และคณะ, 2554) จากการเจาะรูของระนาบกราวด์ของค่าความกว้างเลือกแบบคงที่ จะได้ W_4 เท่ากับ 18 มม. ทำให้ช่วยลดการปรับจูนค่าความยาวคลื่นลงและค่าความยาว L_4 ถูกปรับต่อตามความยาวคลื่น ซึ่งใช้หลักการเช่นเดียวกับชั้นบนโดแรก โดยมีขนาดตั้งแต่ 1, 2 และ 4 มม. พบว่าค่าที่เหมาะสมของ W_4 เท่ากับ 18 มม. และ L_4 เท่ากับ 4 มม. ซึ่งผลของการตอบสนองต่อความถี่ตั้งแต่ 150.86% (1.5 - 10.71 GHz) ดังรูปที่ 5 ซึ่งมีช่วงความถี่ที่ครอบคลุมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a (3.1 -10.6 GHz) ที่ต้องการ

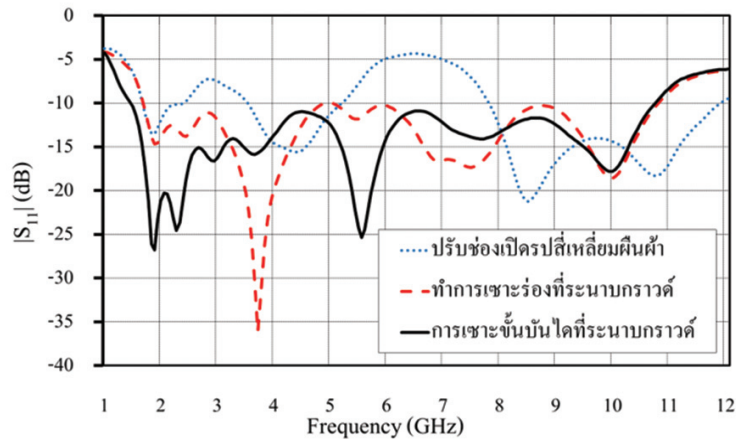


รูปที่ 4 การเจาะรูที่ระนาบกราวด์ชั้นบนโดแบบสองชั้นของสายอากาศช่องเปิดแบบระนาบ



รูปที่ 5 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อปรับ W_4 และ L_4

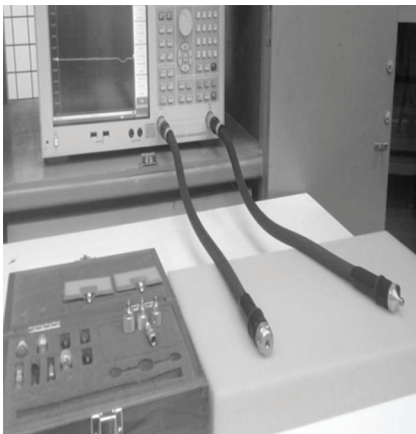
จากการปรับขนาดของสายอากาศที่จุดต่าง ๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่กว้างยิ่งได้ถูกนำมาสร้างเป็นกราฟ เพื่อเปรียบเทียบแต่ละส่วนที่มีผลต่อแบนด์วิดท์ช่วงต่าง ๆ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดแบบระนาบร่วม

การสร้างและผลการวัด

การออกแบบและสร้างจริง เพื่อทำการวัดผลหาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อัตราการขยาย (Gain) แบบรูปการแผ่พลังงานและค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (Group Delay) นั้น ใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C และสายอากาศทั้ง 2 ตัว ดังรูปที่ 7(ก) พบว่าผลของ ($VSWR \leq 2$) และ ($S_{11} \leq -10\text{dB}$) มีความสัมพันธ์กันและสอดคล้องกันในทางทฤษฎี คือ 129.41% (3-14 GHz) ครอบคลุมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ดังรูปที่ 8 - 9

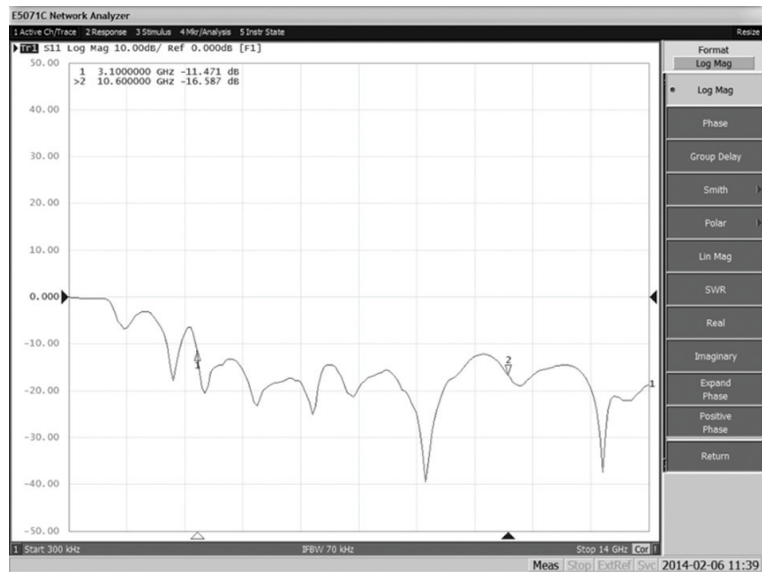


(ก) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

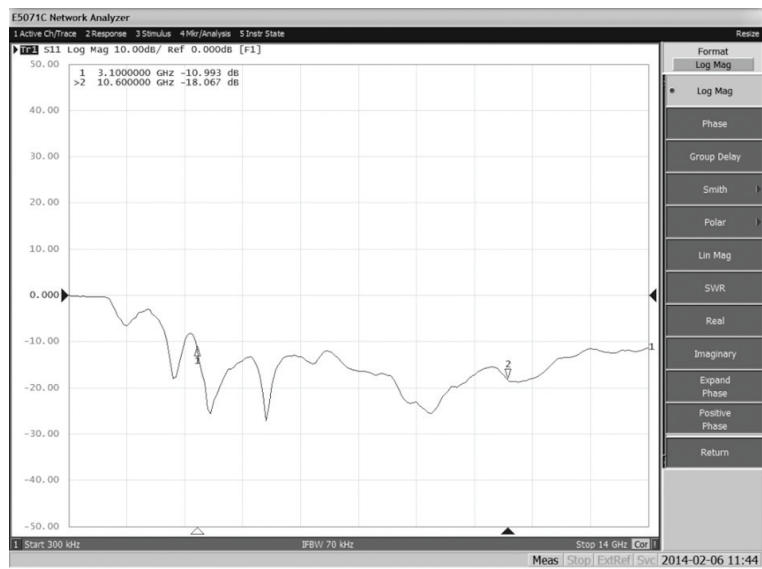


(ข) สายอากาศไมโครสตริป

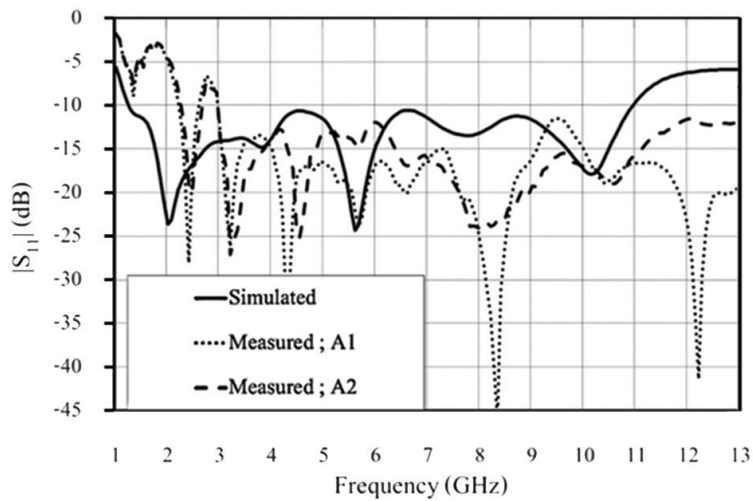
รูปที่ 7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและสายอากาศ



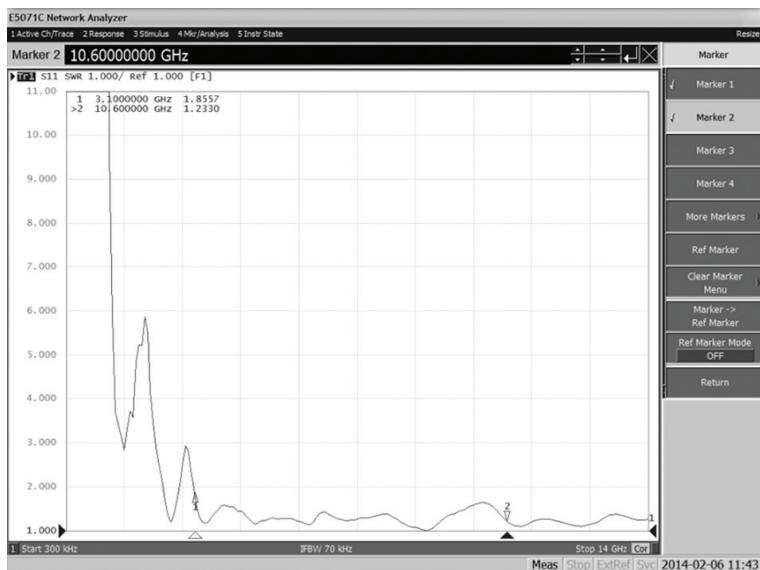
รูปที่ 8 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวที่ 1



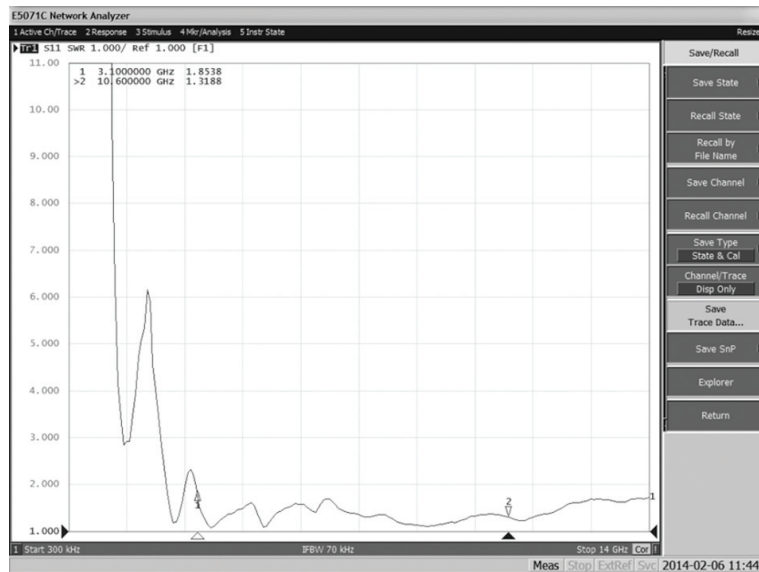
รูปที่ 9 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวที่ 2



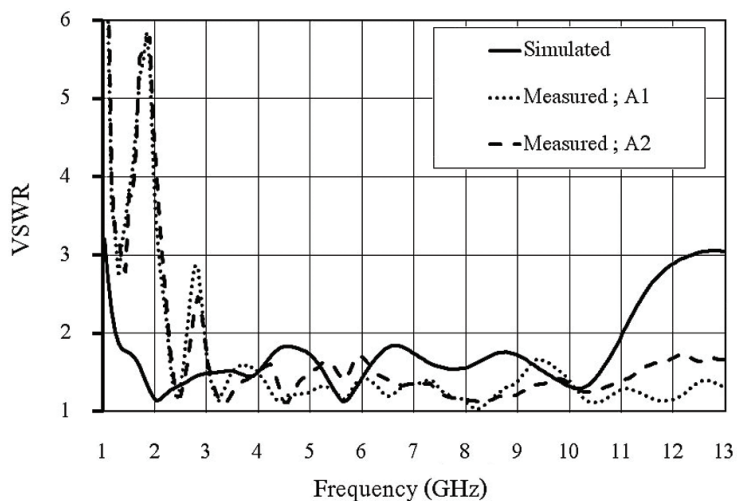
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



รูปที่ 11 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวที่ 1



รูปที่ 12 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) สายอากาศช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัวที่ 2

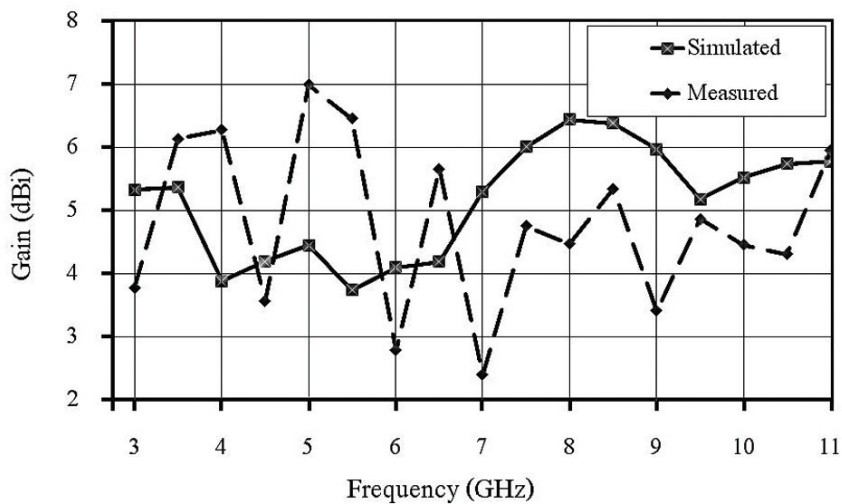


รูปที่ 13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

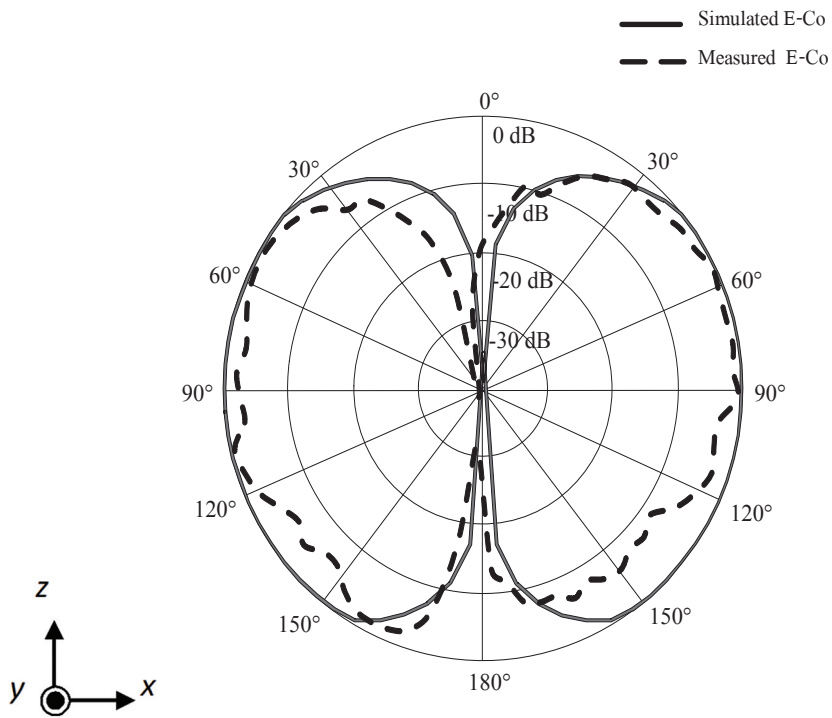
ส่วนของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่มีความแตกต่างกัน เกิดจากค่าความนำทางไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีความแตกต่างกัน ทำให้การควบคุมค่าพารามิเตอร์ให้ตรงตามทฤษฎีนั้นสามารถทำได้ยาก จากรูปที่ 8 - 9 ผลที่ได้กล่าวในข้างต้น ถือว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการรับส่งสัญญาณพัลส์ในช่วงความถี่กว้างยิ่ง (UWB) ตามที่ต้องการ

การวัดค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่ความถี่ 3 - 11 GHz มีค่าเท่ากับ 4.79 dBi ดังรูปที่ 10 โดยผลของค่าอัตราขยาย มีผลที่แตกต่างกันเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างสายอากาศในช่วงความถี่ย่านกว้างยิ่ง 3.1 - 10.6 GHz นั้นการตอบสนองต่อแผ่นวงจรพิมพ์และหัวต่อสัญญาณ SMA ในทางปฏิบัติจะมีค่าที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่ความถี่ใช้งาน

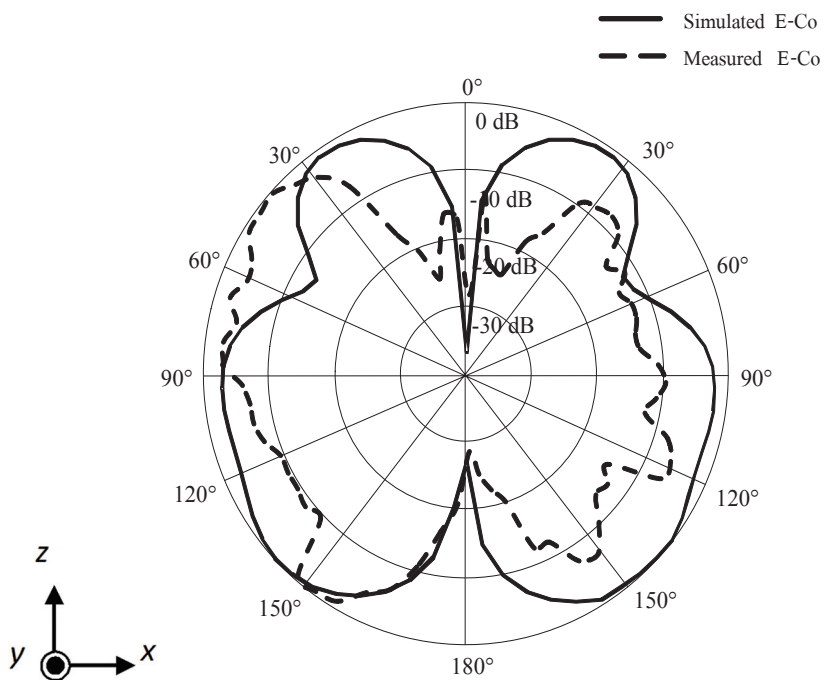
ส่วนผลวัดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 3.1 GHz, 6.8 GHz และ 10.6 GHz มีรูปแบบสองทิศทาง (Bidirectional) ดังรูปที่ 15 - 16 ตามลำดับ



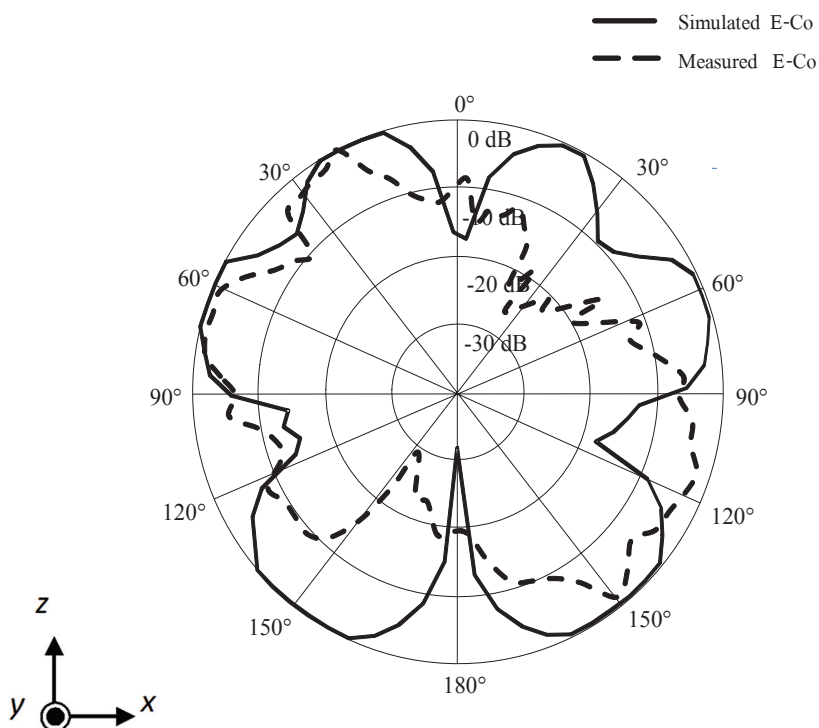
รูปที่ 14 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยาย



(ก) ความถี่ 3.1 GHz

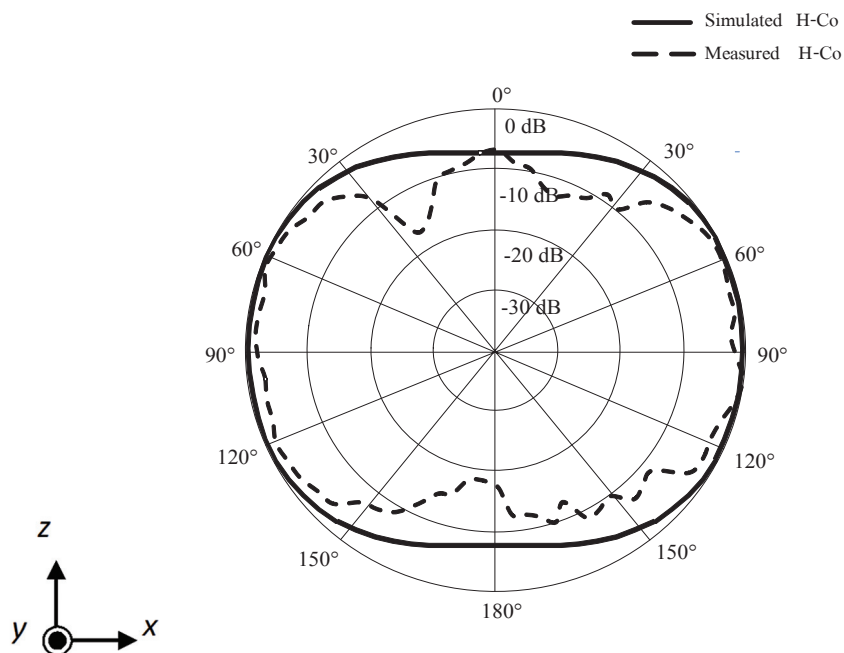


(ข) ความถี่ 6.8 GHz

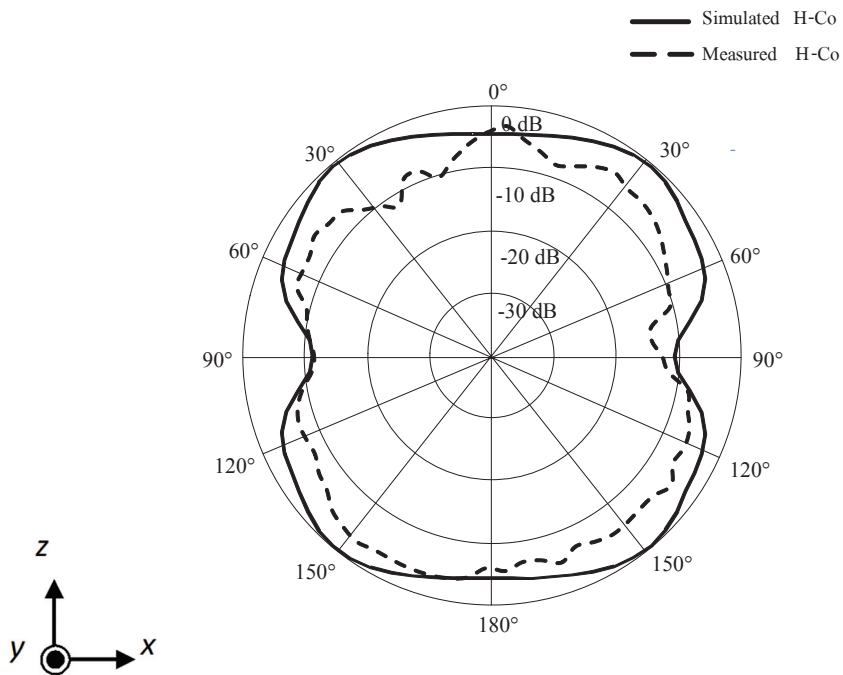


(ค) ความถี่ 10.6 GHz

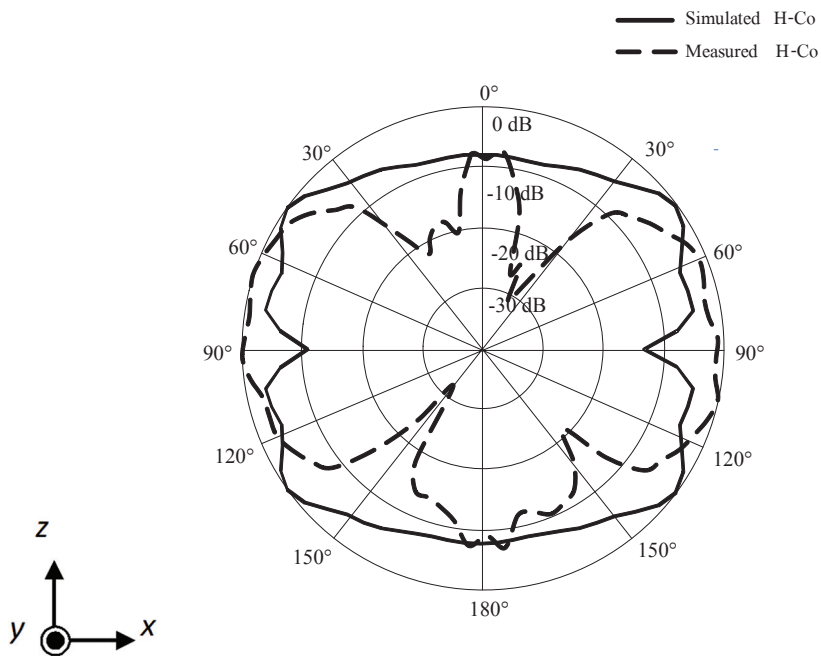
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระนาบ E-plane



(ก) ความถี่ 3.1 GHz



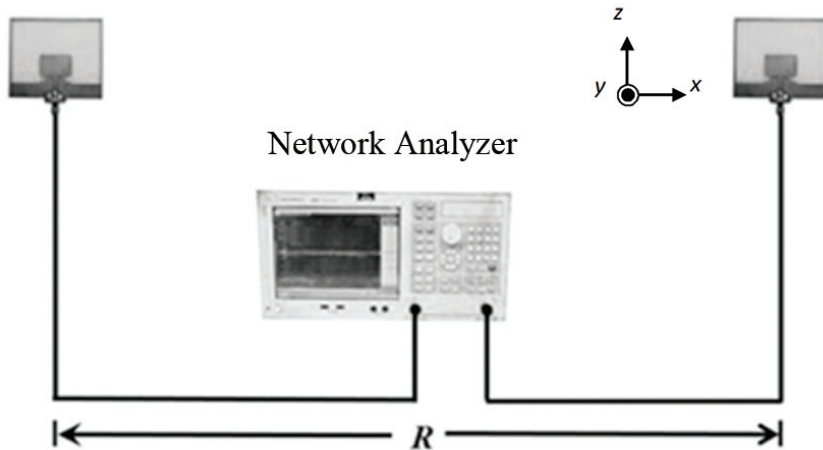
(ข) ความถี่ 6.8 GHz



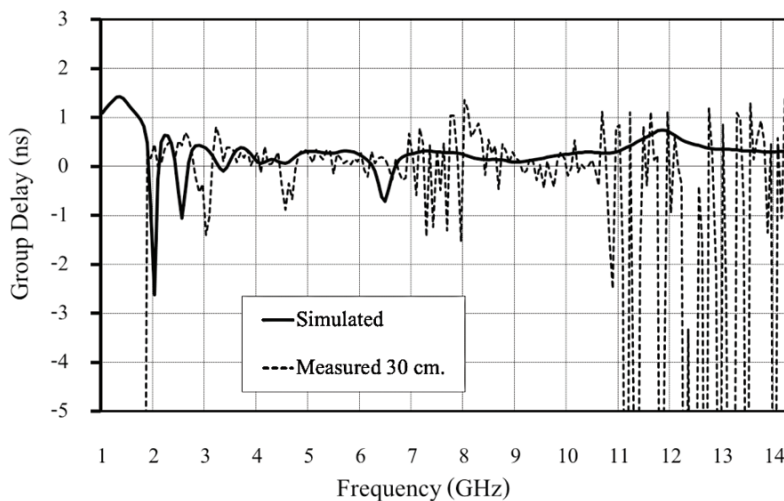
(ค) ความถี่ 10.6 GHz

รูปที่ 16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระนาบ H-plane

หลังจากเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะทำการทดสอบค่า Group Delay ที่การแกว่งของค่าการหน่วงไม่เกิน ± 1.5 ns คือ การนำสายอากาศสองตัวมาทดสอบ โดยใช้สายอากาศรูปแบบเดียวกัน ตั้งที่ตำแหน่งความสูงที่เท่ากัน โดยตั้งสายอากาศหันเข้าหากัน ดังรูปที่ 17 จากการทดสอบพบว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวคือ 10 - 30 ซม. ดีที่สุดในระยะการใช้งาน โดยแสดงระยะที่ 30 ซม. ดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 การทดสอบผลค่า Group Delay ของสายอากาศทั้งสองตัว



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลองค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม Group Delay ที่ระยะ 30 ซม.

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเซาะร่องระนาบกรวดแบบชั้นบันไดสองชั้น เป็นเทคนิคที่ช่วยหาค่าอินพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ต้องการได้รวดเร็วและช่วยลดความซับซ้อนในการหาจุดปรับจูนโครงสร้างของสายอากาศโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของสายอากาศเดิม จากการวัดผลพบว่าผลของ ($VSWR \leq 2$) และ ($S_{11} \leq 10\text{dB}$) ค่าอินพีแดนซ์แบนด์วิดท์มีค่าความถี่ตั้งแต่ 129.41% (3 - 14 GHz) ทั้งสองตัว ซึ่งมีอัตราขยายเฉลี่ยที่ความถี่ 3 - 11 GHz มีค่าเท่ากับ 4.79 dBi 3.94 dBi และแบบรูปการแพร่ของคลื่นเป็นสองทิศทาง และค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (Group Delay) มีระยะการใช้งานที่ 10 - 30 ซม. จากค่าการแกว่งของค่าการหน่วงไม่เกิน ± 1.5 ns ตามมาตรฐาน Ultra-Wide Band (UWB) ในข้อกำหนดของ Federal Communications Commission (FCC) ซึ่งมีช่วงความถี่ 3.1 - 10.6 GHz ที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองผลและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ด้านเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C ในการวัดผลงานวิจัย

บรรณานุกรม

- ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน. (2537). การออกแบบวงจรไมโครเวฟ. มีสเตอร์ก๊อปปี. ไทย
- ปวีร์ ชัยบุญ อภิธา นามแสง และอานวย เรืองวาริ. (30 พฤศจิกายน - 2 ธันวาคม 2554). สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมบนระนาบสร้างเงาที่มีช่องว่างไม่สมมาตรและสลับโหนดแบบชั้นสำหรับย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง. ใน การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON-34). ชลบุรี. ประเทศไทย. หน้า 717-720
- Abunjaileh A. I., Hunter I. C and Kemp A. H. (2007). Multi-band Matching Technique for Microstrip Patch Antenna Transceivers. Proceedings of the 37th Microwave Conference. 2007. European, Munich, Germany. pp. 254-257
- Balanis C. A. (1982). Antenna Theory, 2nd Edition, New York. John Wiley & Son. Inc.
- Chen W. S., Chang Y. C., Chen H. T., Chang F. S., and Su H. C. (2007). Novel Design of Printed Monopole Antenna for WLAN/WiMAX. Applications Antennas and Propagation Society International Symposium. 2007 IEEE. pp. 3281-3284

- Eldek A. A. (2006). Numerical Analysis of a Small Ultra Wideband Microstrip-fed tap Monopole Antenna. *Progress In Electromagnetics Research: PIER* 65. pp. 59-69.
- FCC. (2002). FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of Ultra Wideband (UWB) Systems from 3.1-10.6 GHz. Washington DC.
- Hong T., Gong S. X., Jiang W., Xu Y. X., and Wang X., (2009). A Novel Ultra-wide Band Antenna With Reduced Radar Cross Section. *Progress In Electromagnetics Research: PIER* 96. pp. 299-308
- Jan J. Y., Kao J. C., Cheng Y. T., Chen W. S. and Chen H. M. (2006). CPW-Fed Wideband Printed Planar Monopole Antenna for Ultra-Wideband Operation. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* 2006. pp. 1697-1700
- Kim S. J., Baik J. W., and Kim Y. S., (9-15 June, 2007). A CPW-Fed UWB Monopole Antenna with Switchable Notch-band. *Antennas and Propagation Society International Symposium. 2007 IEEE*. pp. 4644-4671
- Schantz H. (2005). *The Art and Science of Ultrawideband Antennas*. Boston. London. Artech House.