

การพัฒนาสายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบแถบความถี่กว้าง

ระพีพันธ์ แก้วอ่อน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

tod_dodo@hotmail.com

ไกรสร สาริษา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

gook_pong@hotmail.com

ประยุทธ์ อัครเอกผดามลิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าพระนครเหนือ

sivilize@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาการออกแบบและการสร้างสายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบแถบความถี่กว้าง ซึ่งได้ทำการจำลองแบบการทำงานด้วยโปรแกรมออกแบบสายอากาศย่านความถี่ไมโครเวฟ (IE3D) โดยการออกแบบให้สายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างเป็นระนาบร่วม เพื่อให้สามารถใช้งานในย่านความถี่กว้าง จากการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์กว้าง 109.5% ณ ความถี่กลาง ในขณะที่สายอากาศที่มีผู้วิจัยไว้จะมีแบนด์วิดท์การใช้งานที่แคบคือประมาณ 50 - 60% โดยสายอากาศแบบร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่วิจัยขึ้น จะมีขนาดเล็กกว่าแบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่ใช้งานเริ่มต้นเดียวกัน ซึ่งมีแถบความถี่อยู่ในย่านการใช้งานของระบบการสื่อสารไร้สาย เช่น GSM 1800, GSM 1900, IMT-2000 และโดยเฉพาะระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN) ทั้งสองความถี่ คือ 2.4 GHz และ 5.2 GHz

Abstract

This paper presents to developed for the designation and implementation of a broadband coplanar waveguide (CPW)-fed equilateral hexagonal slot antenna. The antenna has been simulated by IE3D program. The antenna has been simulated by IE3D program. The transmission line has been designed to be a coplanar structure. It is found that the proposed antenna is accessible a bandwidth about 109.5% at the centre frequency compared to other existing antennas that have narrow bandwidths of 50 - 60%. When comparing with the square slot antenna whiles the same range of bandwidth, the proposed antenna is smaller. This antenna can be employed for several application band such as GSM 1800, GSM 1900, IMT- 2000 and wireless LAN network both 2.4 GHz and 5.2 GHz.

คำสำคัญ

สายอากาศแบนด์กว้าง, สายนำสัญญาณระนาบร่วม

1. บทนำ

ระบบสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างมากจึงต้องการสายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูง คือ สายอากาศที่สามารถใช้งานในย่านความถี่กว้าง ยิ่งสายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากประสิทธิภาพในการสื่อสารยิ่งมากไปด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาสายอากาศแบบร่อง (Slot antenna) ที่มีการป้อนโดยสายนำสัญญาณระนาบร่วม (CPW-fed) เป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งปัจจุบันมีผู้วิจัย [1-6] นำมาสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากสายอากาศบนโครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นค่าการสูญเสียของสัญญาณ และการผิดเพี้ยนต่ำมีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่าสายอากาศในแบบอื่น ๆ เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างวงจรรวม เช่น มิงานวิจัย [1] ที่ใช้เทคนิคการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศ โดยใช้การจูนสตับสี่เหลี่ยมที่ทำให้ได้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น และในส่วนของงานวิจัยนี้ได้พัฒนารูปร่างของสายอากาศ ให้มีขนาดเล็กลงและใช้เทคนิคการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศโดยใช้วิธีการจูนสตับสามเหลี่ยมด้านเท่า ที่ทำให้ได้แบนด์วิดท์กว้างถึง 109.5% บทความนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาการออกแบบสายอากาศแบบใหม่ที่ใช้งานได้ในความถี่กว้าง โดยใช้เทคนิคเด่นที่ผสมผสานของสายอากาศ โดยเฉพาะสายอากาศร่องควีนูซาไฟ [4] ซึ่งมีข้อดีที่มีแบนด์วิดท์มากถึง 125% แต่มีข้อเสียที่มีขนาดใหญ่มาก และออกแบบยาก กับสายอากาศแบบช่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วม [1] ที่มีข้อดีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียที่มีแบนด์วิดท์น้อยคือ 60 % ได้เป็นสายอากาศแบบใหม่เรียกว่าสายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณ

ระนาบร่วมแบบแถบความถี่กว้าง ที่รวมเอาข้อดีของสายอากาศ [1] และ [4] ได้สายอากาศแบบใหม่ที่มีขนาดเล็ก แต่มีแบนด์วิดท์มากถึง 109.5% ที่ความถี่ตั้งแต่ 1.85 - 6.39 GHz ซึ่งครอบคลุมการใช้ย่านความถี่ เช่น ความถี่ย่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ และย่าน WLAN

2. ที่มาและแรงจูงใจของปัญหา

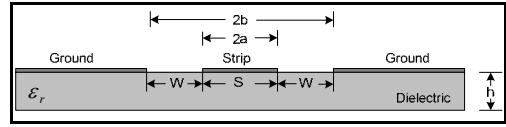
สายนำสัญญาณที่ถูกนำมาใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟมีอยู่หลายชนิด ได้แก่สายโคแอกเซียลไมโครสตริป และสายนำสัญญาณระนาบร่วม ซึ่งไมโครสตริปกับสายนำสัญญาณระนาบร่วมจะนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการออกแบบ การสร้าง และยังสามารถพัฒนาไปเป็นวงจรรวมไมโครเวฟ จากผลการวิจัย และพัฒนาที่ผ่านมา โครงสร้างที่เป็นไมโครสตริปจะประสบปัญหา และข้อจำกัดเช่น เมื่อต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีช่องผ่าน (Via Holes) เพื่อเชื่อมต่อตัวนำด้านบนกับระนาบกราวด์ด้านล่าง ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง (High Dispersion) และการสูญเสียสูง (High Insertion Loss) เพื่อแก้ปัญหาทางานวิจัยนี้จึงนำเสนอสายนำสัญญาณโครงสร้างระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านล่างแสดงในรูปที่ 2-1 จากผลการวิจัย และการพัฒนาที่ผ่านมาโครงสร้างระนาบร่วมที่มีกราวด์ด้านล่างสามารถลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ (Low Dispersion) และการสูญเสีย (Low Insertion Loss) โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรง สามารถลดช่องผ่าน และเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบเพื่อใช้งาน

3. งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม

สายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมถูกคิดค้นขึ้นโดย Wen ในปี ค.ศ.1969 ในที่นี้จะขอกล่าวถึงสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วมชนิดที่ไม่มีกราวด์ด้านล่าง (Waveguide) ในภาพที่ 2-1

3.2 การหาคุณลักษณะของสายนำสัญญาณ แบบระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง



รูปที่ 1 โครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วมชนิดไม่มีกราวด์ด้านล่าง

การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการส่งคงรูปเพื่อหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) จะอยู่ในเทอมอินทิกรัลของการอินทิกรัลวงรีแบบสมบูรณ์อันดับแรก (Complete Elliptic Integral of the First Kind) โดยกำหนดให้

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าโดยรวมของสายนำสัญญาณ

C^a คือ ค่าความจุไฟฟ้า แต่จะแทนไดอิเล็กตริกทั้งหมด

$$\epsilon_{re} = \frac{C}{C^a} \tag{1}$$

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \tag{2}$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{re}}} \tag{3}$$

$$Z_o = \frac{1}{Cv_p} = \frac{1}{c\sqrt{\epsilon_{re}} C^a} \tag{4}$$

ϵ_{re} หมายถึง ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของฐานรอง

V_p หมายถึงความเร็วเฟสในสายนำสัญญาณ

λ_g หมายถึงความยาวคลื่นในสายนำสัญญาณ

c หมายถึง ความเร็วของสนามไฟฟ้าในอวกาศว่าง

Z_o หมายถึง อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ

ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณหาได้จาก

$$Z_o = \frac{30\pi K'(k_1)}{\sqrt{\epsilon_{re}} K(k_1)} \tag{5}$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลหาได้จาก

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_r - 1) \tag{6}$$

โดยที่ $q = \frac{1K(k_2)K'(k_1)}{2K'(k_2)K(k_1)}$ (7)

เมื่อ q หมายถึง ตัวประกอบการคูณ (Filling Factor)

และ $k_1 = \frac{a}{b}$ (8)

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a / 2h)}{\sinh(\pi b / 2h)} \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{\tanh(\pi a / 2h_1)}{\tanh(\pi b / 2h_1)} \quad (10)$$

เมื่อ $a = \frac{S}{2}$ (11)

$$b = \frac{(2W + S)}{2} \quad (12)$$

โดยที่ h หมายถึง ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก

S หมายถึง ความกว้างของสายนำสัญญาณ

W หมายถึง ความกว้างของร่อง

การอินทิเกรตวงรีแบบสมบูรณ์ชั้นแรกสามารถหาได้โดย

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} \quad (13)$$

เมื่อ θ หมายถึง ตัวแปรเชิงซ้อนโดย

$$K'(k_1) = K(k_1')$$
 (14)

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (15)$$

4. รายละเอียดการพัฒนา

4.1 ภาพรวมของระบบ

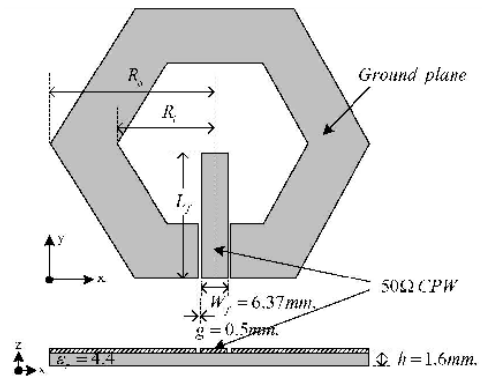
การออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสายนำสัญญาณ โครงสร้างระนาบร่วมไม่มีกราวด์ด้านล่าง ซึ่งประกอบไปด้วย สตรีป (Strip) อยู่ตรงกลางด้านบนบนของฐานรองไดอิเล็กตริก (Substrate) โดยมีความกว้างของสตรีป (W_f) = 6.37 มม. ด้านข้างทั้งสองด้านของสตรีปมีลักษณะเป็นร่อง (Slot) และ ระนาบกราวด์ตามลำดับ มีความกว้างระหว่างสตรีปถึงระนาบ กราวด์ (g) = 0.5 มม. และวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ แบบหน้าเดียว โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ซึ่งเป็น แผ่นวงจรพิมพ์ที่หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพง โดยมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) = 4.4 Loss Tangent

(δ) = 0.025 ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก (h) = 1.6 มม. และความหนาของทองแดง (T_k) = 0.018 มม.

4.2 การออกแบบสายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่า

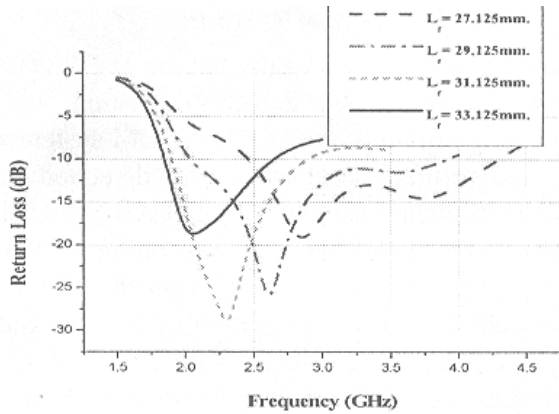
ในขั้นตอนแรกกำหนดค่าเริ่มจากการสเกลที่ $R_0 = 35$ มม.

$R_i = 21$ มม. และทดลองเพิ่มความยาวของสายนำสัญญาณ (L_f) 4 ค่า คือ 27.125 มม., 29.125 มม., และ 31.125 มม., 33.125 มม. ขั้นตอนที่ 2 คือ ได้ค่า L_f ที่พอใจแล้วก็คงค่านั้นไว้ แล้วทำการปรับค่าขนาดร่องของสายอากาศ (R_i) 3 ค่าคือ 21, 23 และ 25 มม., เมื่อได้ค่า R_i เป็นที่พอใจก็คงค่านั้นไว้ แล้วทำการปรับเลือกร่องหกเหลี่ยมด้านเท่า S_h ขึ้น จนกว่าจะได้ค่า แบบดัดวิธของการใช้งานที่ต้องการให้ครอบคลุมในย่านการ สื่อสารไร้สาย โดยได้แสดงโครงสร้างสายอากาศร่องหกเหลี่ยม ด้านเท่า ที่แสดงพารามิเตอร์ในการปรับเปลี่ยนค่า ตามรูปที่ 2



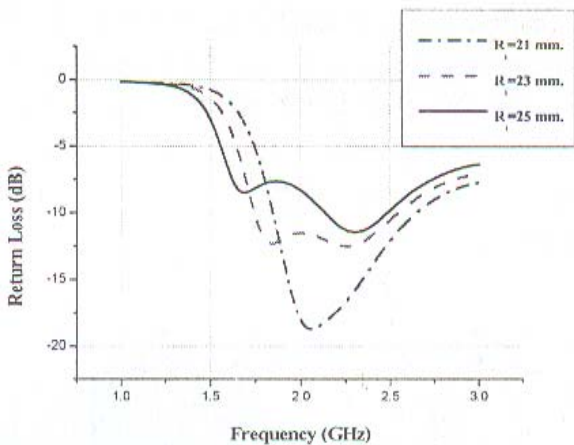
รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ ในการปรับเปลี่ยนค่า

ผลการจำลองการทำงานโดยปรับความยาวของสายนำสัญญาณ (L_f) ปรับขนาดของร่องหกเหลี่ยมด้านเท่า (R_i) และปรับเลือกร่องของสายอากาศ S_h แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



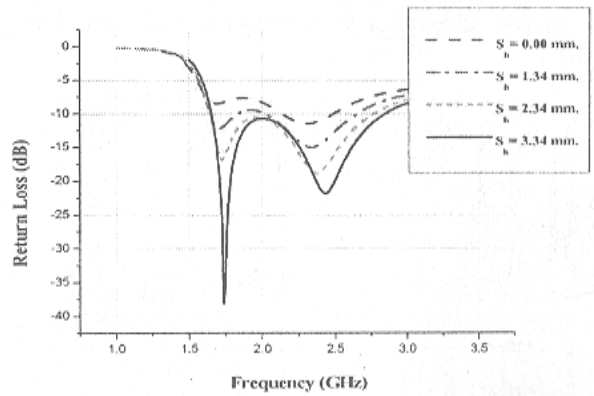
รูปที่ 3 ผลการจำลองค่า S_{11} โดยปรับความยาวของ L_f

จากรูปที่ 3 เมื่อปรับค่า L_f เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ (f_r) เลื่อนลงมาทางด้านความถี่ต่ำ ถึงจะส่งผลให้แบนด์วิดท์ลดลง แต่มีผลช่วงของความถี่และแบนด์วิดท์ใกล้เคียงที่ต้องการยิ่งขึ้น



รูปที่ 4 ผลการจำลองค่า S_{11} โดยการปรับขนาด R_i

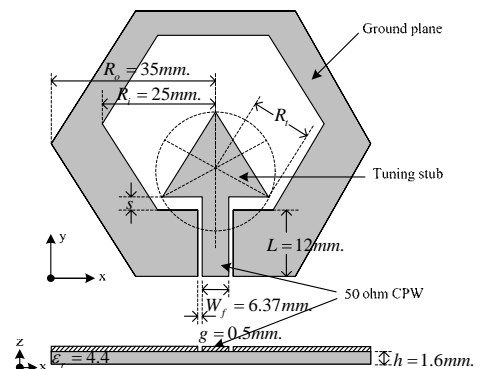
จากการจำลองเมื่อปรับค่า R_i เพิ่มขึ้นมีผลให้มีผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ (f_r) เลื่อนลงมาทางด้านความถี่ต่ำอย่างชัดเจน



รูปที่ 5 ผลงานจำลองค่า s_{11} โดยการปรับขนาด S_h

จากการจำลองเมื่อเพิ่มค่า L_f , R_i และ S_h มีผลให้การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S_{11}) ลดต่ำลง จึงทำให้ค่าแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นและครอบคลุมในย่านการใช้งานตามต้องการ

4. การเพิ่มแบนด์วิดท์สายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่า สายอากาศแบบร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าที่ป้อนด้วยสายนนำสัญญาณระนาบรวม ดังในรูปที่5 โดยที่ช่องการแพร่กระจายคลื่นหกเหลี่ยมด้านเท่ามีขนาดรัศมี R_i สายป้อนสัญญาณที่ใช้สายนนำสัญญาณระนาบร่วมมีค่าอิมพีแดนซ์ 50Ω มีความกว้าง W_f และช่องระหว่างสายนนำสัญญาณ กับ กราวด์คือ g ในส่วนถัดมาที่ต่อกับสายป้อนสัญญาณ คือ ส่วนของตัวรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ใช้ในการปรับจูน (Triangular Widened Tuning Stub)

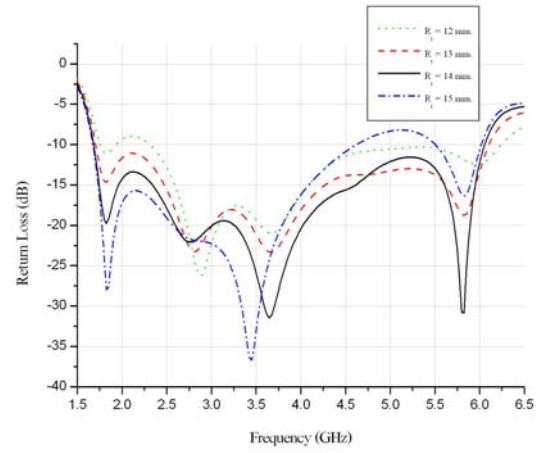


รูปที่ 6 สายอากาศร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าแบบแถบความถี่กว้างที่ป้อนด้วยสายนนำสัญญาณระนาบร่วม

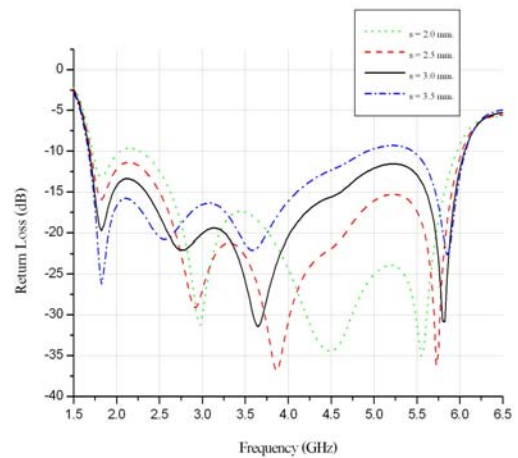
มีระยะรัศมีสามเหลี่ยมด้านเท่าในการออกแบบสายอากาศนี้ เริ่มต้นจะกำหนดค่าขนาดของสายอากาศ $R_o = 35$ มม., $R_i = 25$ มม., $L = 12$ มม., และค่า $g = 0.5$ มม. เนื่องจากบทความนี้มุ่งเน้นพัฒนาให้สายอากาศเพิ่มประสิทธิภาพในด้านแบนด์วิดท์เป็นหลักจึงสนใจพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของแบนด์วิดท์มากที่สุด ในที่นี้คือค่า R_i และ s ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

5. การสร้างและทดสอบ

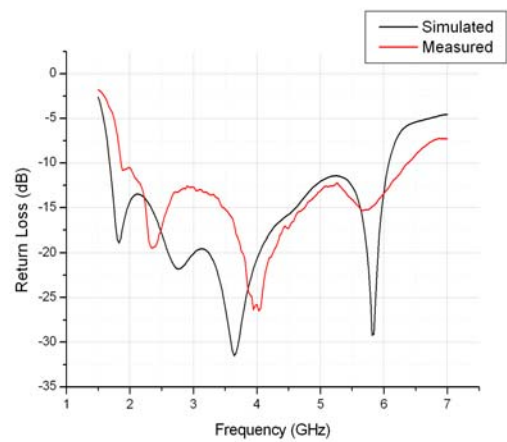
เริ่มต้นจากการออกแบบสายนำสัญญาณให้ได้ค่า 50Ω โดยกำหนดค่า $W_f = 6.37$ และ $g = 0.5$ มม. ทำการออกแบบสายอากาศ และปรับเปลี่ยนค่าโดยใช้โปรแกรม IE3D ในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า R_i ในช่วงความถี่ 1.5-6.5 GHz ทั้ง 4 ค่าได้แก่ 12, 13, 14 และ 15 มม. โดยถ้าเพิ่มขนาดของ R_i มากขึ้น ค่าความถี่ของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับด้านสูงของสายอากาศจะมากขึ้นตามลำดับ ส่วนค่าแบนด์วิดท์ที่ได้แต่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ในการปรับค่า $R_i = 14$ มม. มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศต่ำที่สุด ส่วนในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่า s ในช่วงความถี่ 1.5 GHz ถึง 6.5 GHz ทั้ง 4 ค่าได้แก่ 1, 2, 3 และ 4 มม. ในการปรับค่า $s = 3$ มม. มีค่าแบนด์วิดท์ ของสายอากาศมากที่สุดคือ 113.24% ส่วนผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ ของสายอากาศในช่วงความถี่ 1-7 GHz โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ ข่ายงาน Agilent รุ่น 8719ES ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนผลการวัดค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) ของสายอากาศที่ความถี่ 2.2 และ 5.8 GHz แสดงผลในรูปที่ 10 จากผลการจำลองการทำงานและงานวัด ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพคือ $R_i = 14$ มม. และ $s = 3$ มม. โดยมีค่า ดังนี้ $R_o = 35$ มม. $R_i = 25$ มม. $L = 12$ มม. $W_f = 6.37$ มม. และค่า $g = 0.5$ มม. แบนด์วิดท์ที่ได้จากการจำลองการทำงานประมาณ 113.24 % และเมื่อนำค่าที่ได้จากการออกแบบไปสร้างเป็นสายอากาศจริงดังแสดงในรูปที่ 10 ค่าแบนด์วิดท์ที่ได้จากการวัดประมาณ 109.5%



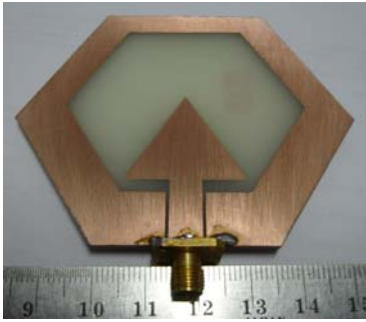
รูปที่ 7 ผลการจำลองค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า R_i



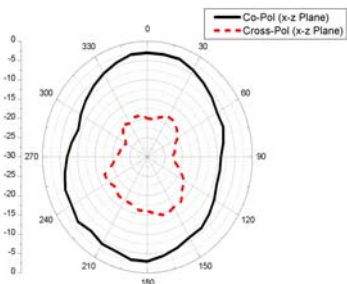
รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า s



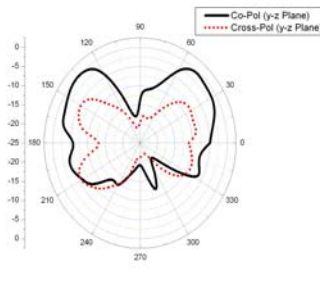
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ วัดที่ความถี่ 1-7 GHz มีค่าแบนด์วิดท์ประมาณ 109.5 %



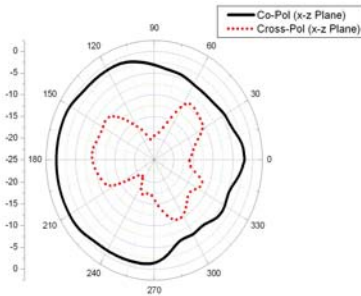
รูปที่ 10 ชิ้นงานวิจัย



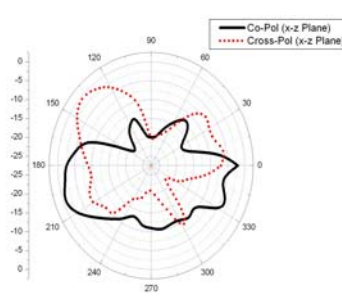
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 11 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ

สายอากาศในระนาบ

(ก) y-z ที่ความถี่ 2.2 GHz (ข) y-z ที่ความถี่ 5.8GHz

(ค) x-z ที่ความถี่ 2.2 GHz (ง) x-z ที่ความถี่ 5.8GHz

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอและออกแบบสายอากาศแบบร่องหกเหลี่ยมด้านเท่าขนาดเล็ก โดยใช้หลักการป้อนสัญญาณบนโครงสร้างสายนำสัญญาณระนาบร่วม จากผลการวิจัยพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์ที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับสูงกว่า 10 dB ที่ความถี่ 1.85-6.39 GHz หรือ ประมาณ 109.5 % งานวิจัยนี้

สายอากาศมีขนาดเล็ก และมีแบนด์วิดท์มากกว่างานวิจัยอื่น ซึ่งนับเป็นงานวิจัยในย่านระบบสื่อสารไร้สาย ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบ และสร้างสายอากาศระบบสื่อสารไร้สายที่ต้องการใช้งานในย่าน GSM 1800,1900 และ WLAN และอุปกรณ์ไมโครเวฟอื่น ๆ ในรูปของวงจรรวมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.เวช วิเวก และรศ.ดร.ประยุทธิ อัครเอกผาดลินที่ได้ให้คำแนะนำเสมอมาตลอดการทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Agrawall, N.P., Kumar, G., Ray, K.P. 1998 Wideband planar monopole antennas. *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, AP-46, 249-251.
- [2] Marchais, C., Ray, G.L., Sharaiha, A. 2006 Stripline slot antenna for UWB communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5, 319-322.
- [3] Hammoud, P.P., Colomel, F. 1993 Matching the input impedance of a broadband disc monopole. *Electronics Letters*, 29, 406-407.
- [4] Sze, J.Y., Wong, K.-L. 2001 Bandwidth enhancement of a microstrip-Line Fed Printed Wide slot antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, 49(7), 1020-1024.
- [5] Chen, H.D. 2003 Broadband CPW-fed square slot antennas with a widened tuning stub. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(8), 1982-1986.
- [6] Ren, Y.-J., Chang, K. 2006 An Annual Ring Antenna for UWB Communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 5, 274-276.