

บทที่ 3

สายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างต้นแบบสำหรับ ระบบสื่อสารไร้สายอัลตราไวด์แบนด์

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาที่สำคัญในบทนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างต้นแบบ สำหรับเครื่องส่งของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ พบว่าเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ สายอากาศแบบแบนด์กว้าง โดยการออกแบบสายอากาศต้นแบบนี้มีการจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบและแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ จากนั้นนำผลเฉลยที่ได้ไปทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้โดยมีการพิจารณาจากการทดลองวัดค่าคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ได้แก่ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (input reflection coefficient : S11) วัดค่าอัตราขยาย ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio : SWR) แบบรูปการแพร่กระจายพลังงานของสายอากาศ ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศต้นแบบนี้ รวมถึงการประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ต่อไป

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์ต้นแบบ สำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

3.2.1 พื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

ปัจจุบันเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์เป็นระบบการสื่อสารที่มีราคาถูก และใช้พลังงานในระดับต่ำ อีกทั้งยังมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงมาก และไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารไร้สายรูปแบบใดก็ตามจำเป็นต้องมีสายอากาศเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ซึ่งสายอากาศนั้นมีให้เลือกหลากหลายรูปแบบสำหรับการ

ประยุกต์ใช้งานในแต่ละประเภท แต่สายอากาศที่ใช้สำหรับระบบการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์นั้น จะต้องเป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิธกว้าง โดยจากข้อกำหนดของ FCC ได้กำหนดสเปกตรัมความถี่ของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ไว้ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz (Ghavami, Michael, and Kohno, 2007) ซึ่งสายอากาศที่นิยมนำมาใช้ในส่วนมากเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปแพตช์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางสำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์นี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ เช่น มีแบนด์วิธแคบ มีอัตราการขยายค่อนข้างต่ำ และมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานไม่ดีเมื่อมีการปรับปรุงสายอากาศให้เป็นสายอากาศแบบแบนด์กว้าง

โดยจากปัญหาที่สำคัญของสายอากาศที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ คือ แบนด์วิธหรือความกว้างแถบของสายอากาศ เนื่องจากสายอากาศจะต้องมีแบนด์วิธที่กว้างมาก แต่จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสำหรับสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์ ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่ท้าทายอย่างยิ่งของนักวิจัยที่จะนำสายอากาศแบบนี้มาประยุกต์ใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำเสนอเทคนิคใหม่ ๆ มาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะการเพิ่มแบนด์วิธให้กับสายอากาศหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการเพิ่มองค์ประกอบปรสิต (parasitic element) ในชั้นเดียวกันในโครงสร้างแบบระนาบร่วม (coplanar geometry) ซึ่งเป็นองค์ประกอบปรสิตไดโพลที่มีความยาวที่แตกต่างกันถูกนำมาวางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศแพตช์หลักที่ทำหน้าที่แผ่กระจายพลังงาน องค์ประกอบจะถูกกระตุ้นโดยการคับปลิงจากแพตช์หลัก ตำแหน่งองค์ประกอบปรสิตจะถูกนำมาวางในลักษณะสมมาตรทั้งสองด้าน โดยมีแพตช์หลักวางอยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง ซึ่งเทคนิคนี้สามารถเพิ่มแบนด์วิธได้เพียง 10-20% เท่านั้น และมีข้อเสียคือสายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นดังนั้นราคาของสายอากาศจึงแพงขึ้น การสร้างสายอากาศทำได้ยากขึ้น หรือการเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศไมโครสตริปด้วยการใช้สายอากาศสองตัวหรือมากกว่า ให้มีการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศที่นำมาวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยสามารถเลือกขนาดของสายอากาศในแต่ละชั้นให้มีขนาดที่แตกต่างกันได้ รวมถึงการเพิ่มความหนาของวัสดุฐานรอง แต่เทคนิควิธีที่นิยมนำมาใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศแบนด์กว้างมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเพิ่มชั้นหรือนำแพตช์หลายแพตช์ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ต่างกันมาวางซ้อนกัน ซึ่งเทคนิควิธีนี้มีข้อเสียคือ ทำให้สายอากาศมีความสูงเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างซับซ้อน ต้นทุนในการผลิตสูง ส่วนอีกวิธี คือ การเจาะร่องบนแพตช์เพื่อให้แพตช์มีความถี่เรโซแนนซ์หลายความถี่ แต่เทคนิควิธีนี้มีข้อเสียคือ การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศทำได้ค่อนข้างยาก และวิธีการสุดท้ายคือ การออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเข้าไป ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนมากนัก และการออกแบบสายอากาศของนักวิจัยในการวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้เทคนิควิธีนี้

เช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มความกว้างแถบให้กับสายอากาศแบบไมโครสตริปแพตช์นั้นส่วนใหญ่ยังคงให้ความสนใจในแนวคิดแบบที่เป็นแพตช์ชั้นเดียวเป็นหลัก แต่ข้อเสียของการออกแบบด้วยวิธีนี้ คือ สายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานไม่ดี

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและออกแบบสายอากาศเพื่อทำการลดข้อจำกัดเหล่านั้น ซึ่งนำไปสู่การออกแบบพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างรูปแบบต่าง ๆ เพื่อรองรับระบบการสื่อสารของเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ เช่น สายอากาศแบบหุกระต่าย (Abdelnasser, Atef, and Charles, 2005) สายอากาศแบบวงรี แบบร่อง (Nikolay and Yehuda, 2006) และแบบแถวลำดับ (Abdelnasser, 2007) ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบสายอากาศโดยยึดแนวคิดที่เป็นแพตช์ชั้นเดียว แต่จะใช้วิธีการออกแบบสายอากาศรูปแบบต่าง ๆ ที่มีแบนด์วิดท์กว้างอยู่แล้วให้กว้างยิ่งขึ้น เพื่อครอบคลุมย่านความถี่ของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ซึ่งสายอากาศที่ได้เป็นสายอากาศรูปแบบใหม่โดยมีการประยุกต์ใช้สายอากาศแบบโคโพล ร่วมกับสายอากาศแบบหุกระต่าย สายอากาศดังกล่าวถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ทำให้สายอากาศที่ได้นั้นมีขนาดเล็ก และมีต้นทุนต่ำ ซึ่งการออกแบบสายอากาศดังกล่าวใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ IE3D โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ และจะใช้การพิจารณาที่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศเป็นสำคัญโดยให้มีความต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านการใช้งาน 3.1–10.6 GHz

3.2.2 ความเป็นมาของการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์

หลังจากที่มีการนำเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์มาใช้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงได้เกิดกระแสความสนใจของการพัฒนาและออกแบบสายอากาศอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารที่เป็นลักษณะแถบความถี่แคบนั้นได้มีการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ในก่อนหน้าแล้ว ซึ่งในอนาคตเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์นี้จะดึงดูดความสนใจและสร้างความท้าทายให้แก่วิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดงานวิจัยใหม่ ๆ ขึ้น ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสที่ดีของนักวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ โดยความท้าทายที่สำคัญที่สุดของการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ คือการให้ได้มาซึ่งสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก โดยมีแบนด์วิดท์ 7.5 GHz แต่ยังคงประสิทธิภาพของการแผ่กระจายพลังงานที่ดีอยู่ ซึ่งนับเป็นการกำหนดรูปแบบและคุณลักษณะของสายอากาศที่เหนือกว่าสายอากาศแบบแบนด์กว้างแบบเดิม ๆ ที่เคยมีมาก่อนหน้านี้ เนื่องจากสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์นั้นมีความต้องการให้ได้มาซึ่งแบนด์วิดท์ที่มากกว่า 100% ของความถี่กลาง และมีการแมตช์อิมพีแดนซ์อย่างสมบูรณ์ตลอดย่านความถี่ใช้งานเช่น มีค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับที่จุดเชื่อมต่อของสายอากาศต้องมีย่านน้อยกว่า 10% และนอกจากนี้แล้วจะต้องมี

เฟสที่เป็นเชิงเส้น มีการประวิงกลุ่ม (group delay) เกือบจะคงที่ มีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง และยิ่งไปกว่านั้นจะต้องมีการผิบนของพัลส์น้อยที่สุดสำหรับการรับส่ง สัญญาณพัลส์ออกไปสู่ช่องทางการสื่อสาร ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นความต้องการเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ เนื่องจากเทคโนโลยีนี้มีการส่งพลังงานในระดับที่ต่ำมาก การสูญเสียพลังงานเนื่องจากไดอิเล็กตริกและสื่อ นำไฟฟ้าจะต้องมีน้อยที่สุด และโดยทางกายภาพแล้วจะต้องสามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรรวมอื่น ๆ ได้ เช่น จะต้องเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก ติดตั้งง่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวก เป็นต้น

3.2.3 การศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปอัลตราไวด์แบนด์ต้นแบบ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D

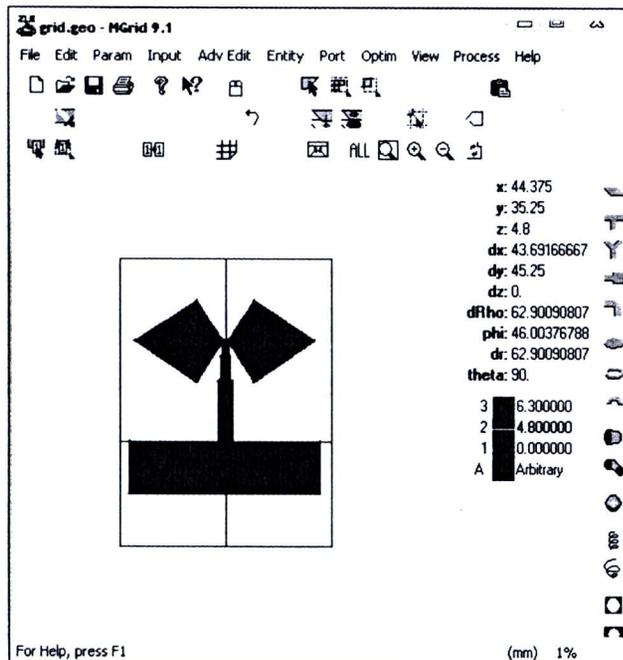
โปรแกรม IE3D เป็น โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และหาคำตอบด้วยการใช้สมการอินทิกรัลในอากาศแบบสามมิติ ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูป IE3D เป็น โปรแกรมที่ให้ความถูกต้องเที่ยงตรงของการจำลองแบบ ขึ้นอยู่กับขนาดของกริดเซลล์ ถ้าขนาดของกริดเซลล์เล็กจะให้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แต่จะใช้หน่วยความจำในการจำลองผลมากและใช้เวลานานมากขึ้นด้วย จากการออกแบบสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้าง ซึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นก็ใช้เทคนิควิธีที่หลากหลายในการออกแบบ ทั้งการเพิ่มความหนาของวัสดุฐานรอง การเจาะร่อง การออกแบบสายอากาศให้มีรูปแบบต่าง ๆ หรือมีการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเข้าไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแบบไดโพล กับสายอากาศแบบหุกระต่าย ร่วมกับการออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพิ่มเข้าไป เพื่อให้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1–10.6 GHz โดยมีการปรับแต่งสายอากาศประกอบด้วยออกแบบการแมตซ์อิมพีแดนซ์สายส่ง สัญญาณรวมอยู่กับตัวสายอากาศบนวัสดุฐานรองชั้นเดียวกัน ซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศได้แก่ ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศ ในที่นี้เราจะเลือกใช้ความถี่กลางที่ 6.85 GHz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) โดยการออกแบบสายอากาศได้เลือกใช้แผ่น PCB ชนิด FR-4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) เท่ากับ 4.5 ค่าสูญเสียแทนเจนต์ δ เท่ากับ 0.02 และความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ความถี่ใช้งานกำหนดไว้ที่ความถี่กลาง ซึ่งการออกแบบสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสายส่งความยาว $\lambda/4$ ของความถี่กลาง โดยเริ่มต้นออกแบบสายอากาศที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนด้วยการใช้หลักการของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น $\lambda/2$ โดยสามารถคำนวณหาความยาวของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้วยสายส่งความยาว $\lambda/4$ ที่อิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้ดังสมการที่ (3.3) Equation Section 3

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (3.1)$$

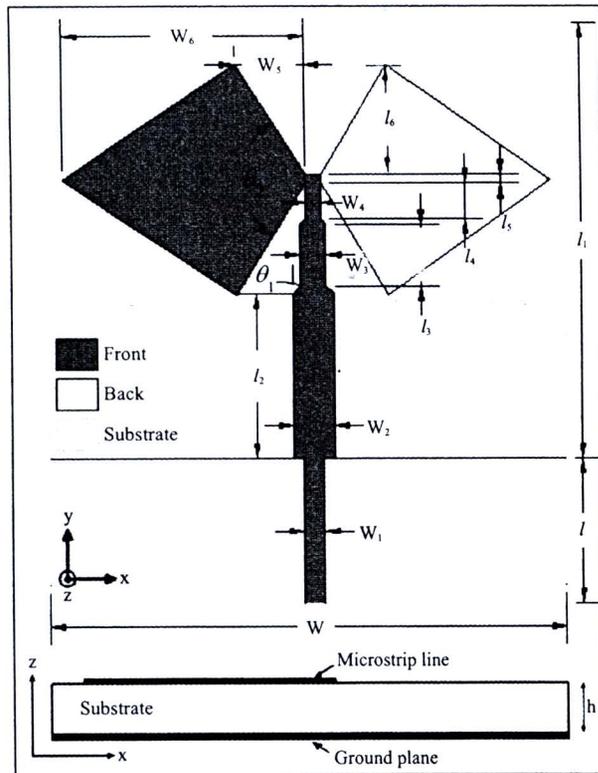
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (3.2)$$

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเริ่มต้นที่ $w = 36.5$ มิลลิเมตร $w_1 = 2$ มิลลิเมตร $w_2 = 3$ มิลลิเมตร $w_3 = 2.5$ มิลลิเมตร $w_4 = 1.5$ มิลลิเมตร $w_5 = 5$ มิลลิเมตร $w_6 = 11$ มิลลิเมตร $l = 9$ มิลลิเมตร $l_1 = 30$ มิลลิเมตร $l_2 = 10.5$ มิลลิเมตร $l_3 = 5$ มิลลิเมตร $l_4 = 2$ มิลลิเมตร $l_5 = 1.5$ มิลลิเมตร $l_6 = 7.85$ มิลลิเมตร $\theta_1 = 45^\circ$ และ $\theta_2 = 116^\circ$ โดยมีการจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 เนื่องจากเป็นวัสดุฐานรองที่สามารถใช้ได้ในช่วงความถี่สูง และหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด โดยสายอากาศที่ได้นั้นเป็นสายอากาศรูปแบบใหม่ที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.2



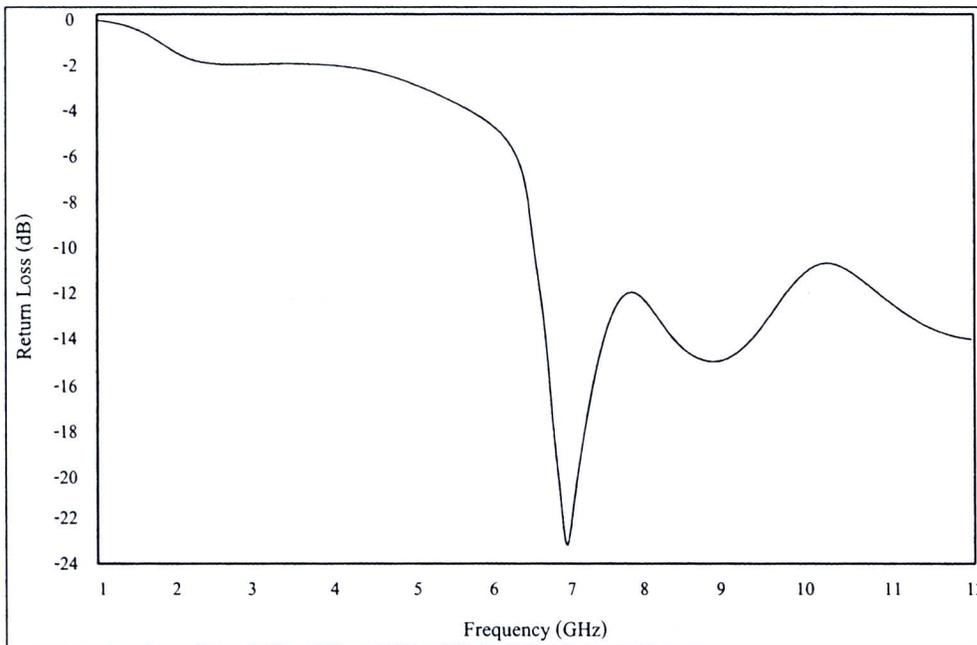
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่จำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

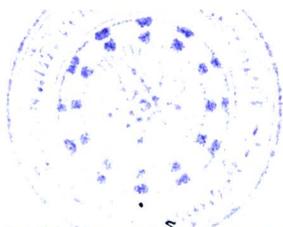
3.3 ผลการจำลองแบบ

จากผลการจำลองแบบด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศนั้น ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในช่วงที่ต่ำกว่า -10 dB แล้วพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์ไม่กว้างพอที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสายอากาศกับสายนำสัญญาณยังมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ด้านต่ำไม่ดีมากนัก และมีความถี่กลางที่สูงกว่า 6.85 GHz มาก โดยหลังจากที่ทำการพิจารณาผลของการจำลองแบบด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากรูปที่ 3.3 แล้ว ขั้นตอนแรกจะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศตามลำดับความสำคัญต่อไป

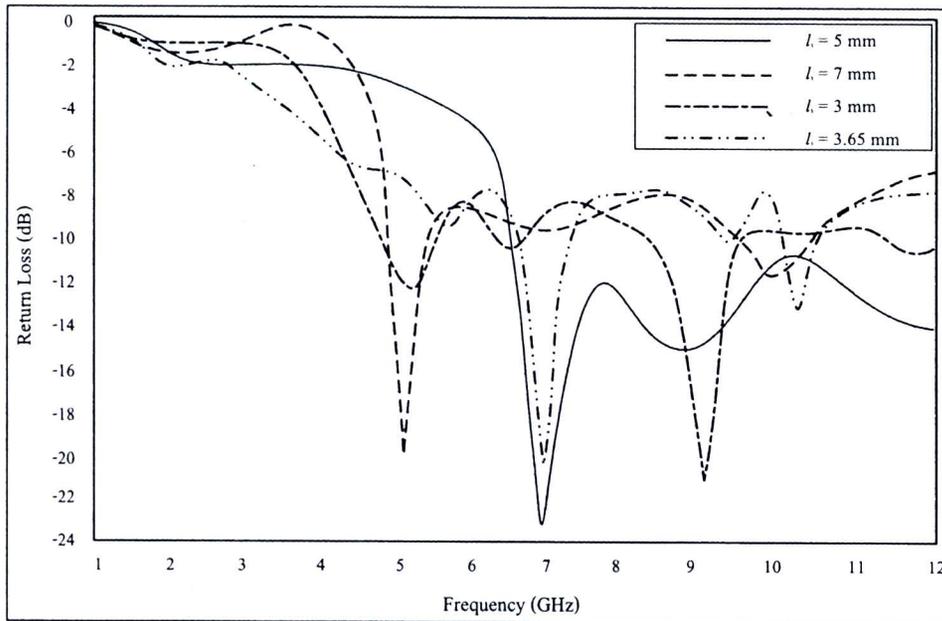


รูปที่ 3.3 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

ซึ่งพบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ความยาวของ l_3 นั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมากที่สุด ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนของการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยเทคนิคของสายส่งความยาว $\lambda/4$ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงเริ่มทำการปรับความยาวของ l_3 ก่อนเป็นอันดับแรก โดยเริ่มทำการปรับความยาวพารามิเตอร์ l_3 เป็น 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะคงที่ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ไว้แล้วทำการพิจารณาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ l_3 เป็น 3 มิลลิเมตร และจากผลที่ได้พบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้นประกอบกับความถี่กลางมีการเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งผลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดี จากนั้นทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของ l_3 เป็น 5 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศให้ผลของความกว้างแบนด์วิดท์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในทางที่แยกลง ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ l_3 ในช่วง 2 มิลลิเมตร ถึง 4 มิลลิเมตร อย่งละเอียด โดยจากการจำลองแบบพบว่าผลที่ได้ทั้งในส่วนของความกว้างแบนด์วิดท์ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีแนวโน้มดีขึ้น และสุดท้ายได้ความยาวของสายส่ง l_3 เท่ากับ 3.65 มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่าแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุดสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของ l_3 นี้ แต่เมื่อพิจารณาค่าความถี่กลางของสายอากาศแล้วยังมีความถี่ที่สูงกว่า 6.85 GHz มากพอสมควร ซึ่งจะต้องทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่คิดว่าจะส่งผลกับ



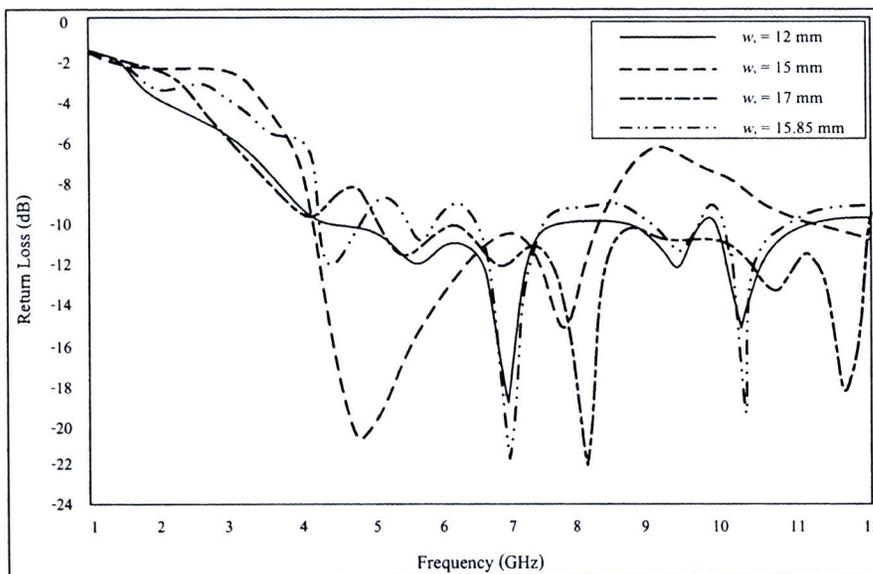
คุณลักษณะของสายอากาศ โดยจากการปรับค่าพารามิเตอร์ความยาวของสายส่ง l_3 เท่ากับ 3.65 มิลลิเมตร สามารถแสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด l_3

จากการพิจารณาการปรับค่าพารามิเตอร์ของ l_3 แล้ว ผลที่ได้นั้นยังไม่ตรงตามข้อกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ดังนั้นลำดับต่อไปจะได้ทำการปรับพารามิเตอร์ในส่วนของความกว้าง w_6 เนื่องจากขนาดของพารามิเตอร์ w_6 นี้จะส่งผลกระทบต่อความถี่กลางของสายอากาศมากที่สุด โดยเริ่มทำการปรับความกว้างของพารามิเตอร์ w_6 จากค่าเริ่มต้นเป็น 12 มิลลิเมตร ซึ่งจะคงที่ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ไว้ และพารามิเตอร์ของ l_3 จะคงค่าที่ดีที่สุดไว้ นั่นคือ 3.65 มิลลิเมตร โดยหลังจากการทดลองปรับขนาดของ w_6 เป็น 12 มิลลิเมตร แล้วพบว่าผลที่ได้สายอากาศมีแบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากที่ความถี่ด้านต่ำมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้น ประกอบกับค่าความถี่กลางของสายอากาศลดลงด้วย ซึ่งจากการสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของ w_6 แล้วพบว่า เมื่อความกว้างของ w_6 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความถี่กลางของสายอากาศลดลง แต่การแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะดีหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของขนาดพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วย จากนั้นทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของ w_6 เป็น 15 มิลลิเมตร และ 17 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศให้ผลของความถี่แบนด์วิดท์ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในทางที่

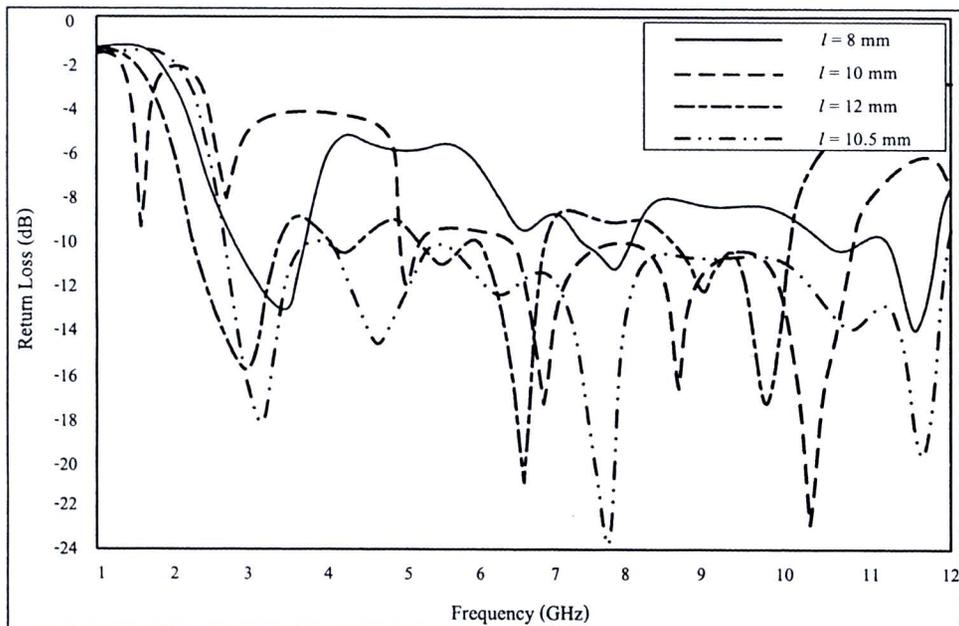
ดีขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ w_6 ในช่วง 15 มิลลิเมตร ถึง 17 มิลลิเมตร อย่างละเอียด โดยจากการจำลองแบบพบว่าผลที่ได้ทั้งความกว้างแบนด์วิดท์ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีแนวโน้มดีขึ้น และสุดท้ายได้ความกว้างของ w_6 เท่ากับ 15.85 มิลลิเมตร ซึ่งได้ค่าแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด และสัมพันธ์กับค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุดสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของ w_6 นี้ โดยจากการปรับค่าพารามิเตอร์ความกว้างของ w_6 เท่ากับ 3.65 มิลลิเมตร สามารถแสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจากผลการจำลองแบบจะเห็นว่าสายอากาศมีความถี่กลางอยู่ที่ประมาณ 7 GHz และจากการปรับขนาดพารามิเตอร์ของทั้ง l_3 และ w_6 แล้วถึงแม้ว่าผลที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ แต่ผลที่ได้นั้นไม่ถือว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพมากพอที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ได้



รูปที่ 3.5 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด w_6

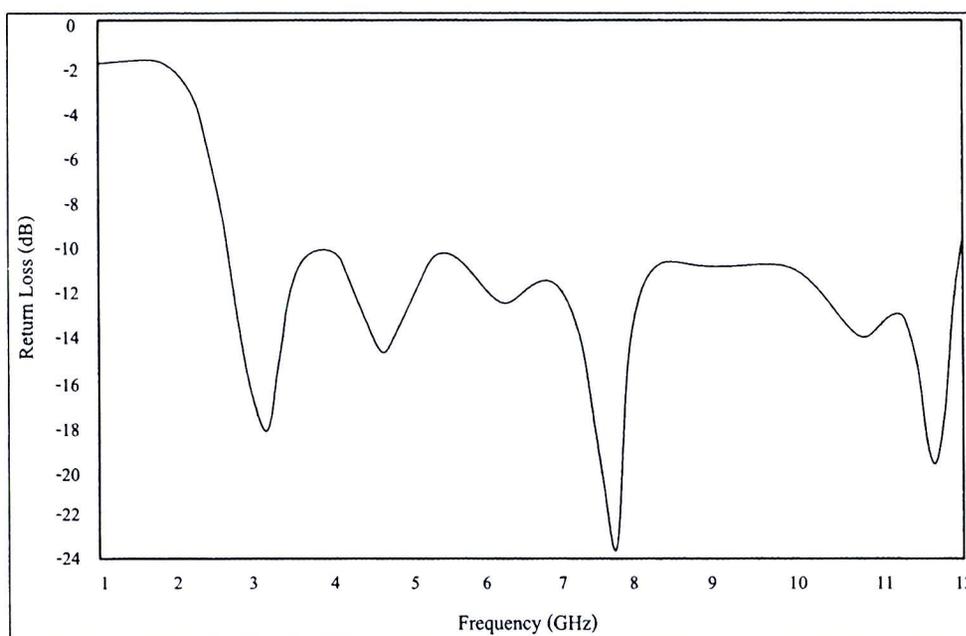
โดยจะต้องทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่คิดว่าจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการออกแบบในลำดับต่อมานั้นคือ ค่าพารามิเตอร์ขนาดความยาวสายส่ง / ของสายอากาศ ซึ่งในส่วนของพารามิเตอร์ l_3 นี้เมื่อปรับแล้วจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแมตช์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และส่งผลต่อค่าความถี่กลางบ้างเล็กน้อย เนื่องจากจะทำให้ความยาวของพารามิเตอร์ l_3 และขนาดของระนาบกรวดเปลี่ยนแปลงด้วย โดยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าขนาด

ของพารามิเตอร์ l แล้วขนาดของวัสดุฐานรองของสายอากาศจะต้องมีขนาดความยาวเท่าเดิม นั่นคือค่าของผลรวมระหว่าง l และ l_1 จะต้องมีค่าเท่าเดิม เพื่อไม่ให้เกิดความยุ่งยากและสับสนสำหรับการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ทุกตัว ซึ่งการปรับขนาดของ l นี้จะเหมือนเดียวกับการปรับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ คือ จะต้องคงค่าของพารามิเตอร์ตัวที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนผ่านมาแล้ว เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยเริ่มทำการปรับความยาวของพารามิเตอร์ l จากค่าเริ่มต้นเป็น 8 มิลลิเมตร และพบว่าผลที่ได้ในสายอากาศมีค่าความถี่กลางลดลง แต่การแมตซ์อิมพีแดนซ์แย่งกว่าเดิม ซึ่งจากการสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของ l แล้วพบว่า เมื่อความยาวของพารามิเตอร์ l มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแมตซ์อิมพีแดนซ์มากกว่าค่าความถี่กลางของสายอากาศ เนื่องจากส่วนของความยาว l_2 มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงตัวปรับแบบสายท่อนสั้น (stub) นั้นเอง และเหตุผลที่ต้องทำการปรับที่ขนาดของพารามิเตอร์ l แทนการปรับที่ l_2 เพื่อเป็นการพิจารณาค่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไปในคราวเดียวกัน จากนั้นทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของ l เป็น 10 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศให้ผลของความกว้างแบนด์วิดท์ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับดีขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของ l ในช่วง 10 มิลลิเมตร ถึง 12 มิลลิเมตร โดยจากการจำลองแบบพบว่าผลที่ได้ทั้งความกว้างแบนด์วิดท์ และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศมีแนวโน้มดีขึ้น ดังรูปที่ 3.6 และสุดท้ายได้ความยาวของ w_0 เท่ากับ 10.5 มิลลิเมตร



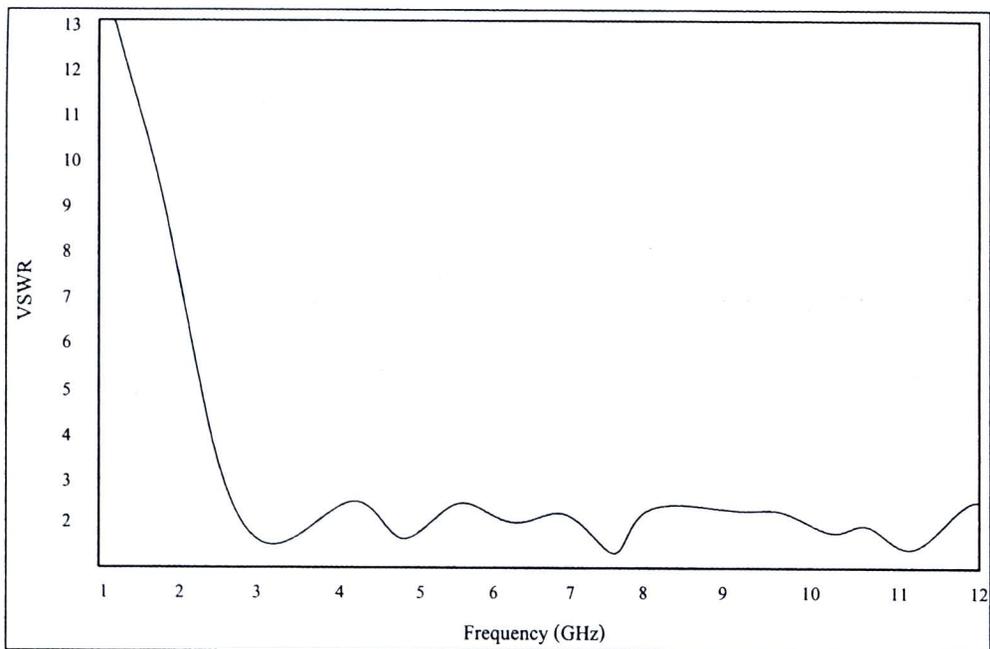
รูปที่ 3.6 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจากการปรับขนาด l

จากขั้นตอนสุดท้ายของการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบ ซึ่งได้ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังนี้ $w = 36.5$ มิลลิเมตร $w_1 = 2$ มิลลิเมตร $w_2 = 3$ มิลลิเมตร $w_3 = 2.5$ มิลลิเมตร $w_4 = 1.5$ มิลลิเมตร $w_5 = 5$ มิลลิเมตร $w_6 = 15.85$ มิลลิเมตร $l = 10.5$ มิลลิเมตร $l_1 = 30$ มิลลิเมตร $l_2 = 10.5$ มิลลิเมตร $l_3 = 3.65$ มิลลิเมตร $l_4 = 2$ มิลลิเมตร $l_5 = 1.5$ มิลลิเมตร $l_6 = 7.85$ มิลลิเมตร $\theta_1 = 45^\circ$ และ $\theta_2 = 116^\circ$ โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้ดังแสดงดังรูปที่ 3.7

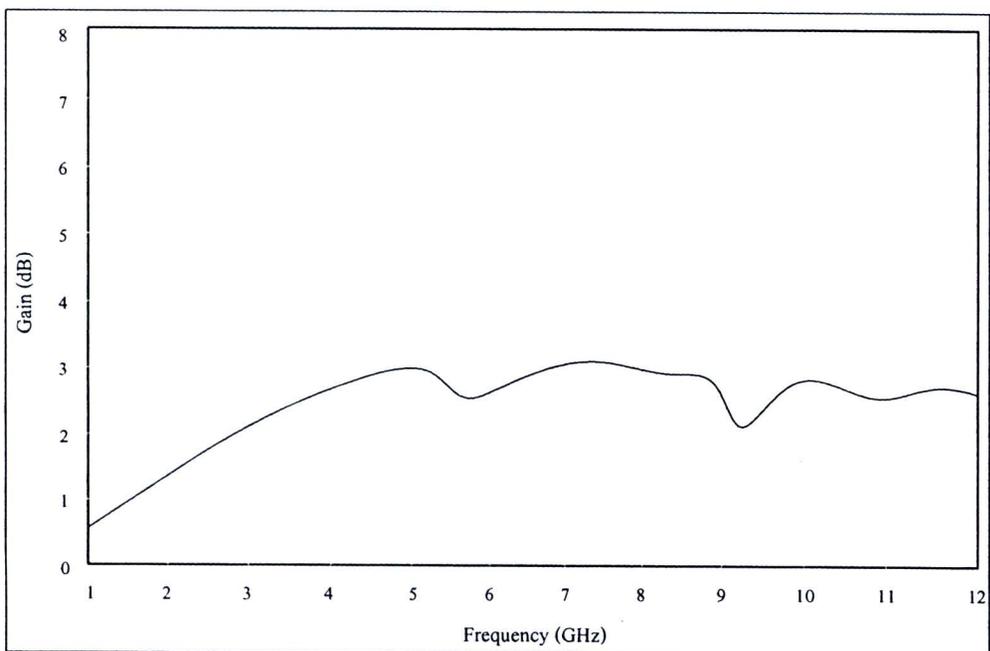


รูปที่ 3.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ปรับขนาดได้อย่างเหมาะสม

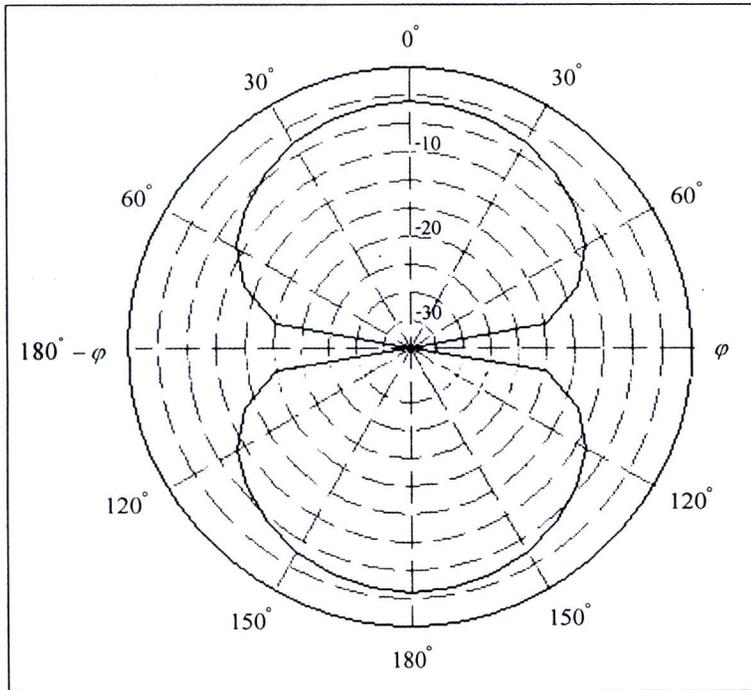
ซึ่งจากผลการจำลองแบบของโปรแกรม IE3D พบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ที่มีความถี่ด้านต่ำอยู่ที่ 2.7 GHz และความถี่ด้านสูงอยู่ที่ 12 GHz นั่นคือสายอากาศมีแบนด์วิดท์มากกว่า 120% หรือคิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 5 : 1 ที่ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน และผลจากการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้สายอากาศมีการแมตซ์ที่ดี ซึ่งสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2 ตลอดย่านความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และอัตรการขยายแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยมีอัตรการขยายเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 dB และสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานจากการจำลองผลในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) แสดงได้ดังรูปที่ 3.11



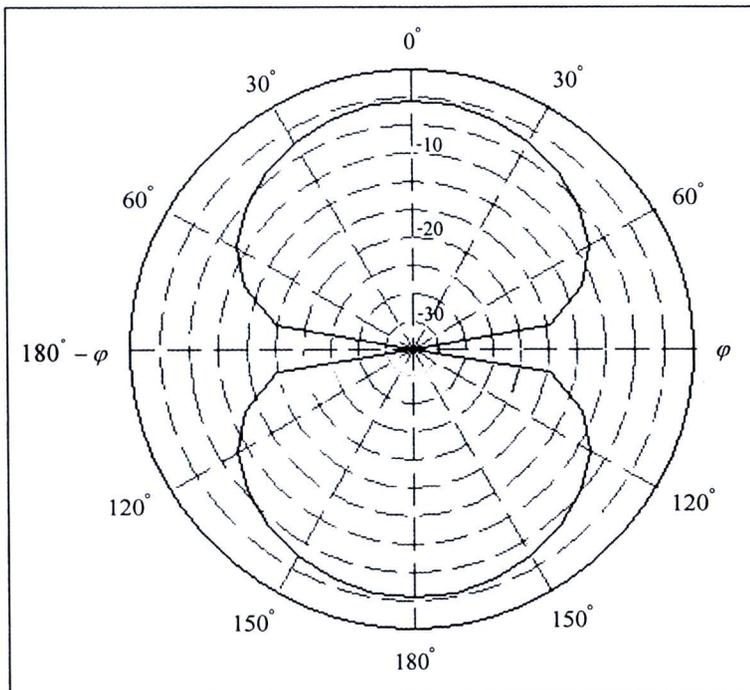
รูปที่ 3.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการจำลองผลของสายอากาศ



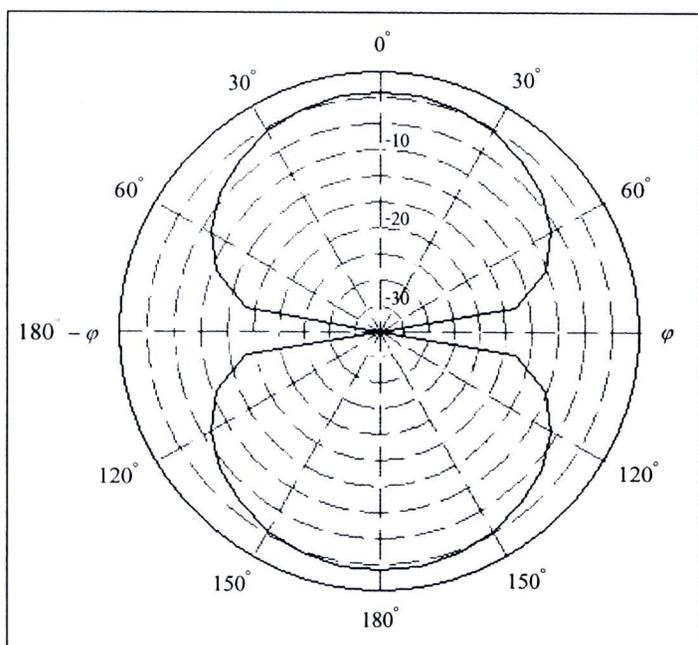
รูปที่ 3.9 อัตราการขยายของสายสายอากาศที่ได้จากการจำลองผล



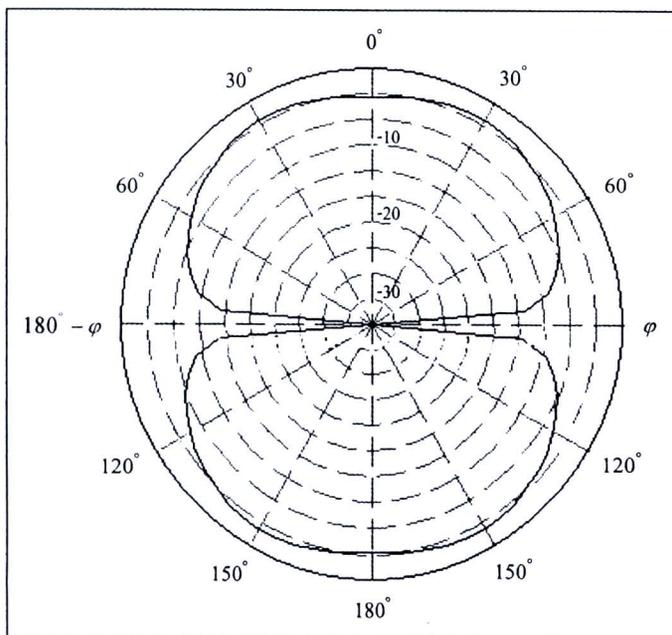
ก. ที่ความถี่ 3.1 GHz



ข. ที่ความถี่ 5.1 GHz

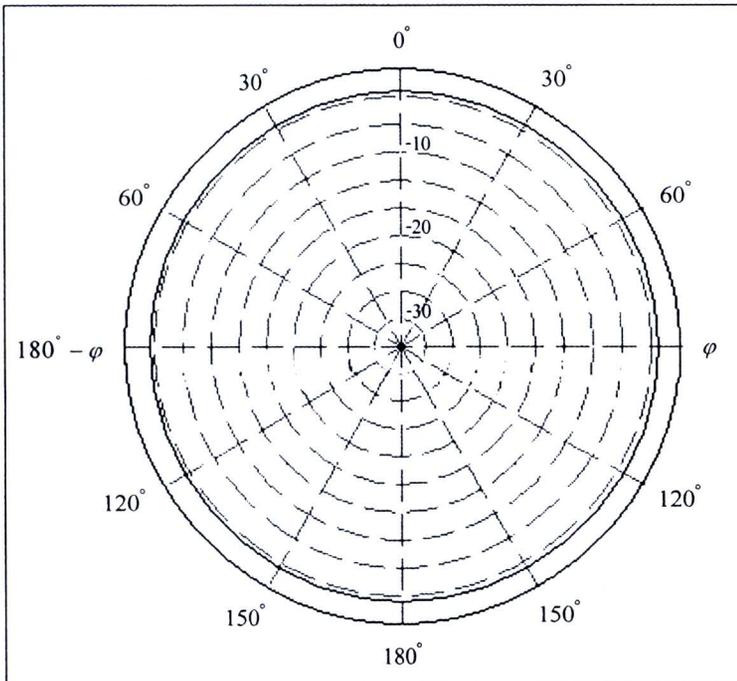


ก. ที่ความถี่ 7.1 GHz

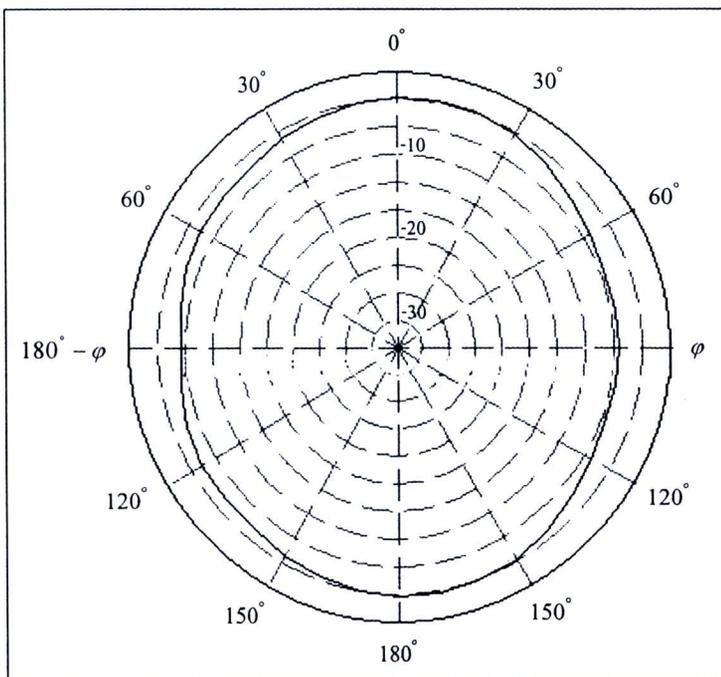


ง. ที่ความถี่ 9.1 GHz

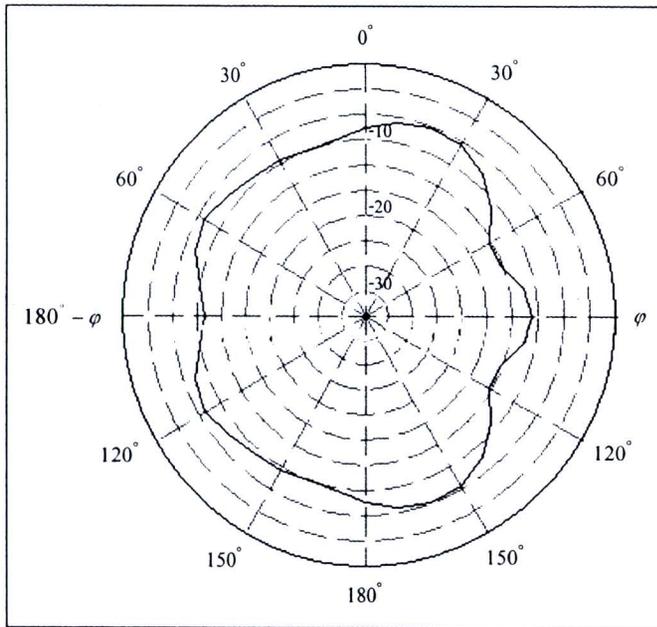
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ



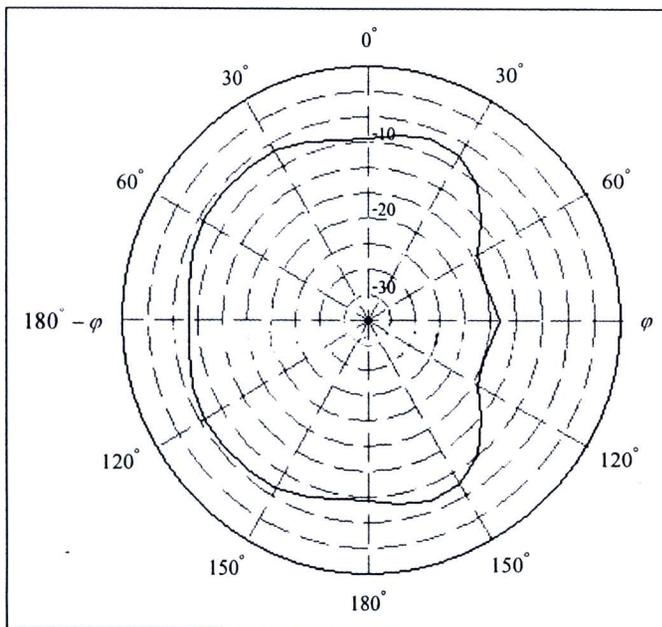
ก. ที่ความถี่ 3.1 GHz



ข. ที่ความถี่ 5.1 GHz



ค. ที่ความถี่ 7.1 GHz



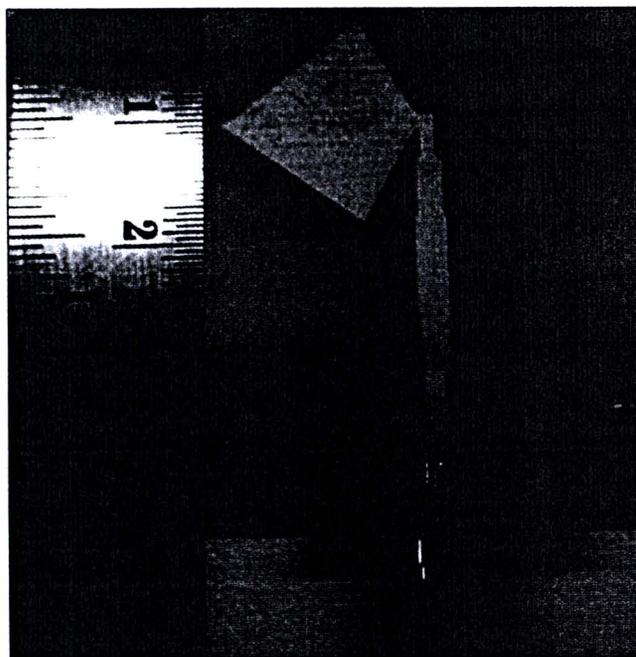
ง. ที่ความถี่ 9.1 GHz

รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่างๆ

สำหรับผลการจำลองแบบสายอากาศในส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงาน พบว่าสายอากาศที่ได้จากการออกแบบในครั้งนี้มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว และจากผลการจำลองแบบนั้นพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ดี แต่แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ได้นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปบ้างในแต่ละความถี่ เนื่องจากสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นเป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก และยากต่อการควบคุมเสถียรภาพของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศให้เหมือนกันในทุกความถี่ได้

3.4 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

จากการออกแบบสายอากาศและจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ โดยได้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบออกมา และจำเป็นต้องนำขนาดที่ได้จริงจากการจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D มาเพื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ แต่เนื่องจากรูปแบบของไฟล์ภาพที่ได้จากโปรแกรม IE3D นั้นมีนามสกุลของแฟ้มข้อมูลคือ GEO และไม่สามารถพิมพ์ออกมาเป็นขนาดจริงหรือใช้ร่วมกับเครื่องมือช่วยที่มีการโปรแกรม เพื่อทำการกำหนดเส้นทางวิ่งของการกัดหรือเซาะร่องของแผ่นวงจรพิมพ์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงไฟล์หรือนำไฟล์ออกจากโปรแกรม IE3D ก่อน โดยวิธีการนำไฟล์ออกมานั้นจะต้องทำผ่านทางโปรแกรม auto CAD ที่มีนามสกุลของแฟ้มข้อมูลเป็น DXF เนื่องจากโปรแกรม auto CAD นี้สามารถที่จะพิมพ์ขนาดจริงออกมาได้ เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือช่วยสำหรับการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ หรือการทำไครฟิล์ม (dry film) ซึ่งผลจากการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ด้วยโปรแกรม IE3D ทำให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างครอบคลุมย่านความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ โดยการสร้างสายอากาศต้นแบบจริงนั้นได้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 แบบสองหน้าเป็นวัสดุฐานรองที่สามารถใช้ได้ภายในย่านความถี่สูง ซึ่งสายอากาศที่ได้นั้นมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ออกแบบง่ายไม่ซับซ้อน วัสดุที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศนี้สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก โดยโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ แสดงดัง รูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศต้นแบบ

เมื่อทำการสร้างสายอากาศต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะต้องทดลองวัดค่าความสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ ค่าอัตราขยาย ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง รวมถึงแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กต่อไป

3.5 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ

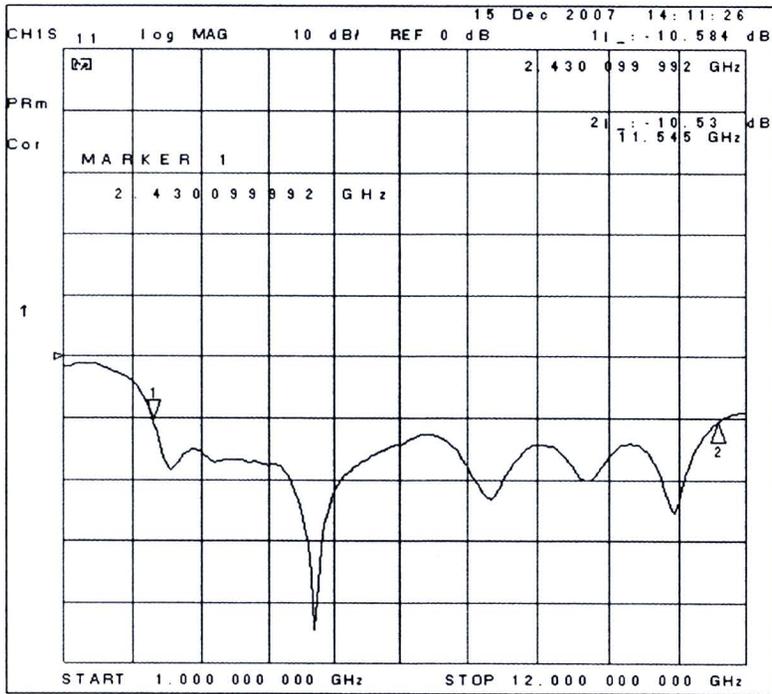
สำหรับการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณา คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ เนื่องจากสามารถใช้เพื่อพิจารณาถึงการแมตซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ โดยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับนั้นสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (Negative infinity : dB) ซึ่งถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าสายอากาศไม่แมตซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่าสายอากาศมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด (รังสรรค์ และ ชวงค์, ม.ป.ป) หรือพิจารณาการแมตซ์อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้จากค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งนั้นสามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ ซึ่งถ้าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ นั่นคือพลังงานอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่กระจายคลื่นออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา แต่ถ้าสายอากาศมีอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับอนันต์หมายความว่า สายอากาศนั้นเกิดการไม่แมตซ์อย่างยิ่ง ทำให้

พลังงานที่ส่งออกไปจากสายอากาศเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งอาจทำให้เครื่องรับส่งเสียหายได้ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศจะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตซ์ที่ดี โดยจากการวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศในการวิจัยฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศให้มีค่าน้อยกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ใช้งาน และอัตราส่วนคลื่นนิ่งให้มีค่าเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสายอากาศมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่มีค่าน้อยกว่า -10 dB ที่ตลอดย่านความถี่ 2.43 GHz ถึง 11.54 GHz ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่า 2 สำหรับช่วงความถี่ 2.43 GHz ถึง 11.54 GHz แสดงได้ในรูปที่ 3.14 โดยสามารถหาความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

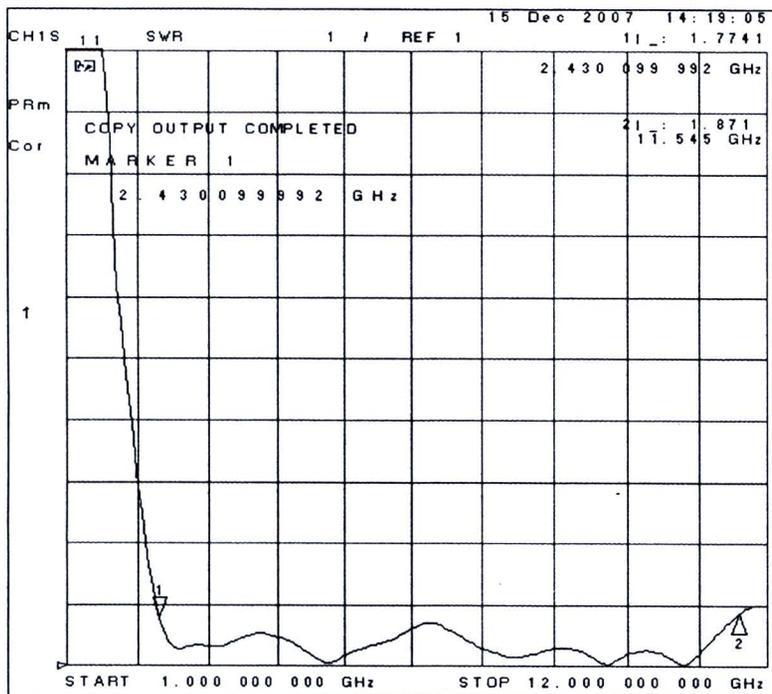
$$\% \text{ ความกว้างแถบของสัญญาณ} = \frac{f_{high} - f_{low}}{f_c} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\% \text{ ความกว้างแถบ} = \left(2 \frac{f_{high} - f_{low}}{f_{high} + f_{low}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ f_{high} คือค่าความถี่สูงสุด f_{low} คือค่าความถี่ต่ำสุด และ f_c คือค่าความถี่กลางของสายอากาศ



รูปที่ 3.13 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

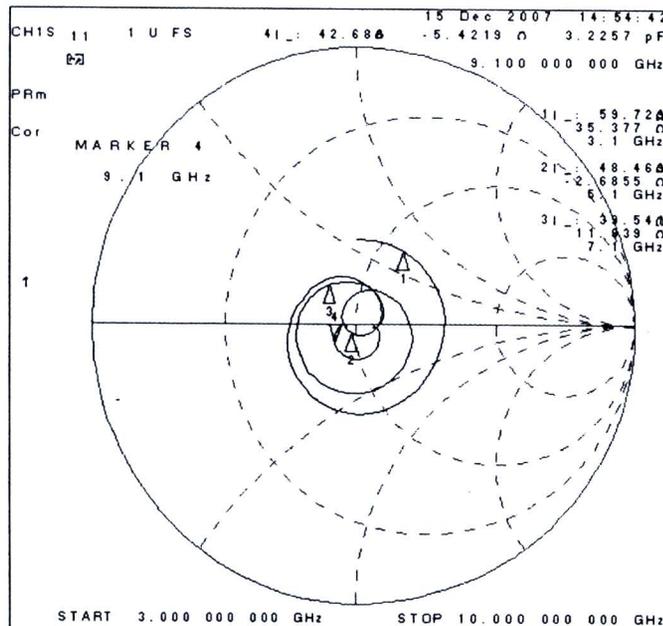


รูปที่ 3.14 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

โดยจากรูปที่ 3.13 พบว่าสายอากาศต้นแบบมีความกว้างแถบประมาณ 130.42% หรือคิดเป็นอัตราส่วนของความถี่สูงสุดต่อความถี่ต่ำสุดได้ประมาณ 5 : 1 ที่ค่าความถี่กลาง 7 GHz

3.6 ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบ สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ โดยทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ ซึ่งทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นจะเลือกแสดงผลให้เห็นใน 4 ความถี่เท่านั้น เนื่องจากเป็นความถี่ที่จะนำไปวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน และจากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้นแบบพบว่าสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 3.1 GHz เท่ากับ $59.72 + j35.37 \Omega$ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 5.1 GHz มีค่าเท่ากับ $48.46 + j2.68 \Omega$ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 7.1 GHz มีค่าเท่ากับ $39.54 + j11.01 \Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 9.1 GHz มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $42.68 - j5.42 \Omega$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 โดยจากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง 40 Ω ถึง 60 Ω ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 50 Ω เนื่องจากการแสดงว่าสายอากาศต้นแบบที่ทำการออกแบบนั้น มีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีตลอดช่วงความถี่ใช้งาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.15 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศในช่วงความถี่ต่าง ๆ

3.7 ผลการทดลองวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

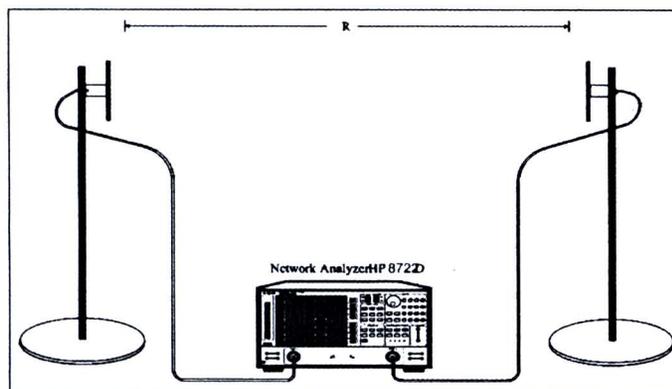
สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศในการวิจัยฉบับนี้นั้น ได้ใช้เทคนิควิธีการวัดด้วยสายอากาศสองตัว (two-antenna method) โดยสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะและคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ซึ่งมีสายอากาศตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ สามารถนำสมการพื้นฐานของ Friis (Friis transmission equation) มาทำการคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (3.6)$$

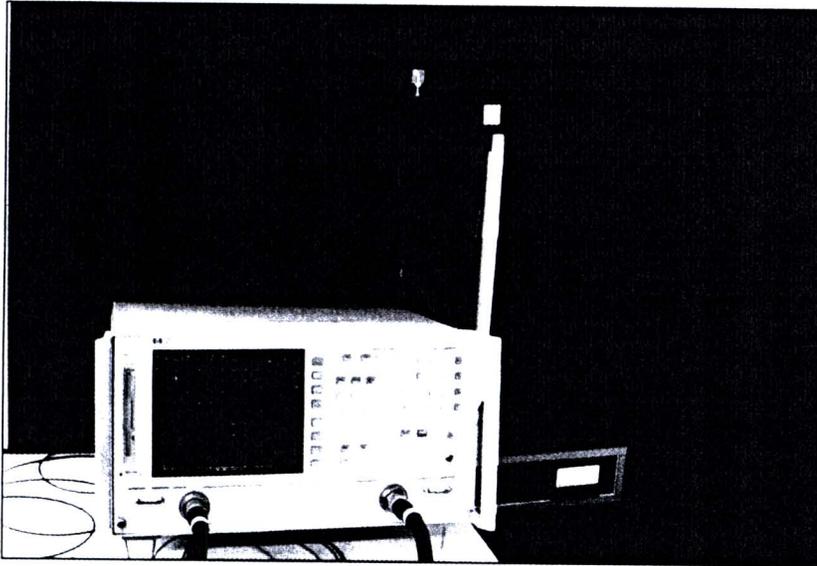
เมื่อ P_t คือพลังงานอินพุตที่ป้อนให้สายอากาศส่ง G_t คืออัตราขยายของสายอากาศส่ง P_r คือพลังงานเอาต์พุตของสายอากาศรับ G_r คืออัตราขยายของสายอากาศรับ และ r คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เมื่อสายอากาศส่งและสายอากาศรับเป็นสายอากาศรูปแบบเดียวกัน ดังนั้น $G_t = G_r = G$ เมื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายในหน่วย dB ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (3.7)$$

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์วัดพลังงานที่รับได้ แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 และ รูปที่ 3.17

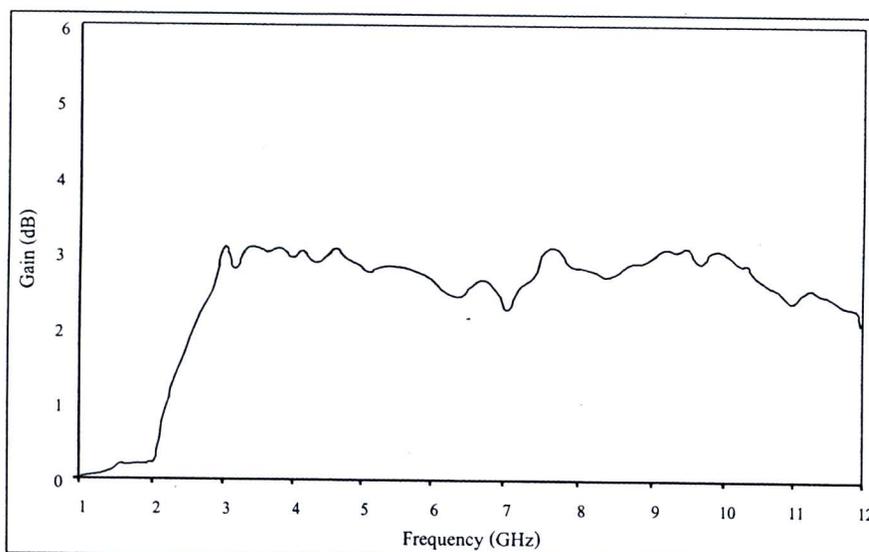


รูปที่ 3.16 การเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 3.17 การวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

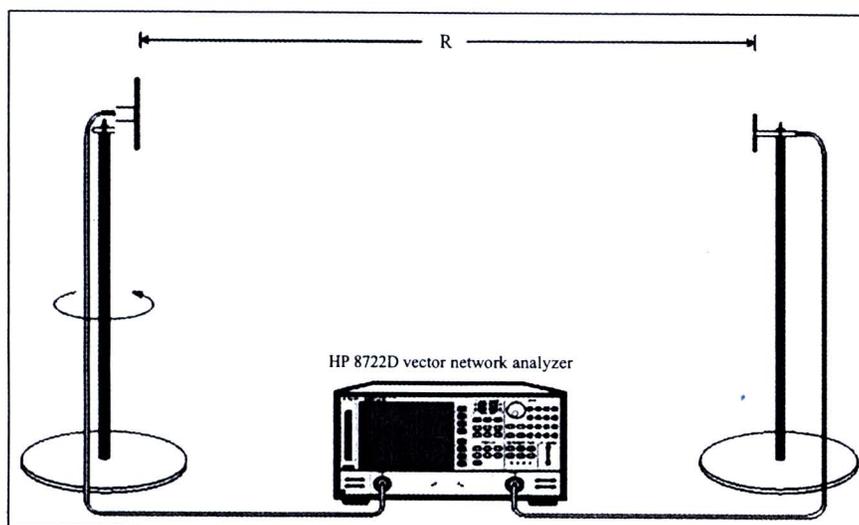
โดยในการทดลองนั้นพลังงานอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศตัวส่งเท่ากับ -10 dB ตลอดย่านความถี่ 1 GHz ถึง 12 GHz และนำค่าที่รับได้ของสายอากาศที่คิดเป็นพลังงาน P_r แทนค่าลงในสมการที่ (3.7) แล้วจะได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบจากการวัดทดสอบในแต่ละความถี่ตลอดย่านดังแสดงในรูปที่ 3.18



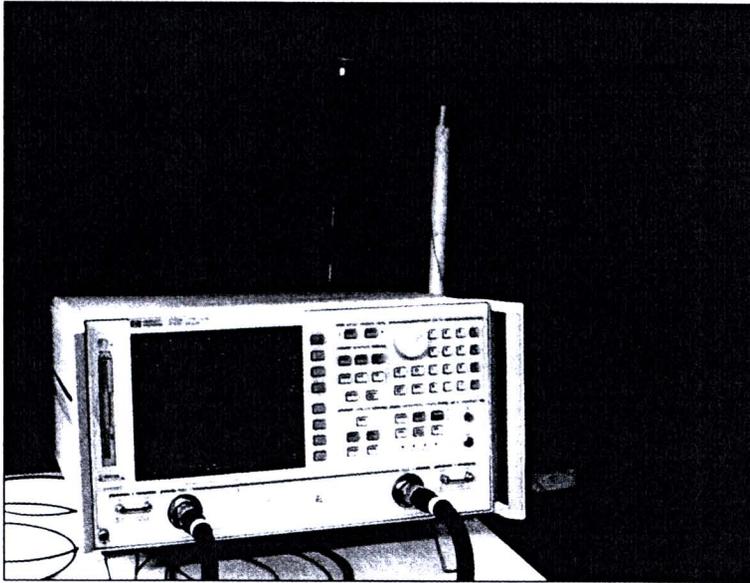
รูปที่ 3.18 ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

3.8 ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศ

สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศนั้น คือ รูปที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอก ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง โดยการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศนั้นจะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far field region) ทั้งในระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) โดยสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ $R \geq 2D^2/\lambda$ โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับที่ทำการทดสอบที่ความถี่ต่ำสุด และ D คือ ขนาดของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และ λ คือความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้คำนวณ โดยใช้ทดสอบอ้างอิงที่ความถี่ต่ำสุด 3.1 GHz ดังนั้นที่สนามระยะไกลจะกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับเท่ากับ 45 เซนติเมตร ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยจะทำการหมุนสายอากาศต้นแบบเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศา จนถึง 360 องศา และสายอากาศที่ต้องการทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศตัวรับ ส่วนสายอากาศตัวส่งเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปไดโพลที่ออกแบบให้มีความถี่เดียวกับความถี่สายอากาศด้านรับที่ต้องการวัดนั่นคือ ที่ความถี่ 3.1 GHz 5.1 GHz 7.1 GHz และ 9.1 GHz โดยสายอากาศรับและสายอากาศส่งนั้นจะต้องมีโพลาริซที่เหมือนกัน และระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นการเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบ โดยที่จะทำการทดสอบในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไร้คลื่นสะท้อน (anechoic chamber) ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบ



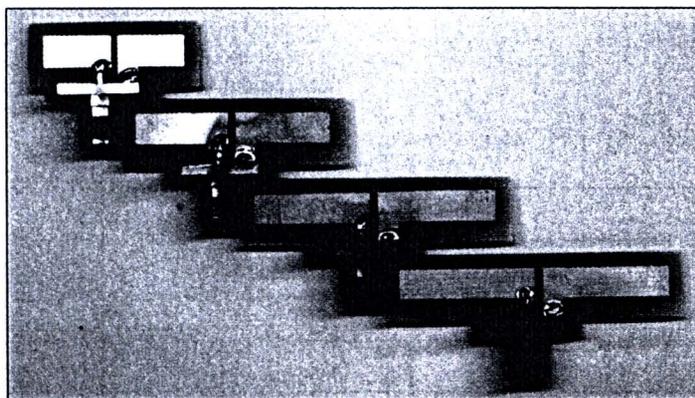
รูปที่ 3.20 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบ

โดยสายอากาศไมโครสตริปไดโพลที่ใช้ส่งสัญญาณให้กับสายอากาศต้นแบบที่ต้องการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในแต่ละความถี่นั้น สามารถคำนวณค่าความยาวและความกว้างของสายอากาศ (Guillermo, 1996; Reinhold and Pavel, 2000) ได้ดังสมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.9)

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (3.8)$$

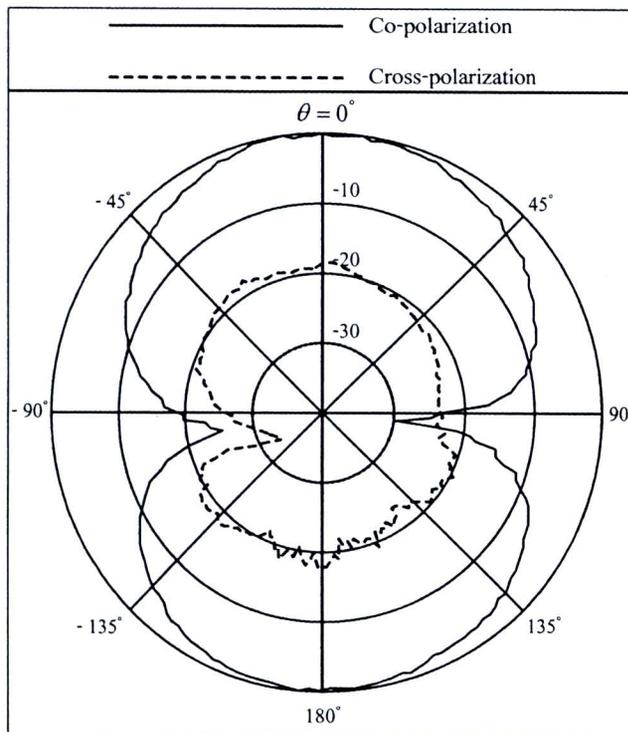
$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.9)$$

เมื่อ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก λ คือความยาวคลื่น w คือความกว้างของไมโครสตริป h คือความหนาของวัสดุฐานรอง c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ (3×10^8 เมตรต่อวินาที) และ f คือความถี่ที่ต้องการใช้งาน โดยเลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 เป็นวัสดุฐานรองเช่นเดียวกับสายอากาศต้นแบบ ดังนั้นจะได้สายอากาศไมโครสตริปไดโพลดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งสายอากาศตัวส่งแบบไมโครสตริปไดโพลนี้ต้องเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียวเช่นเดียวกับสายอากาศแบบไดโพลทั่วไป

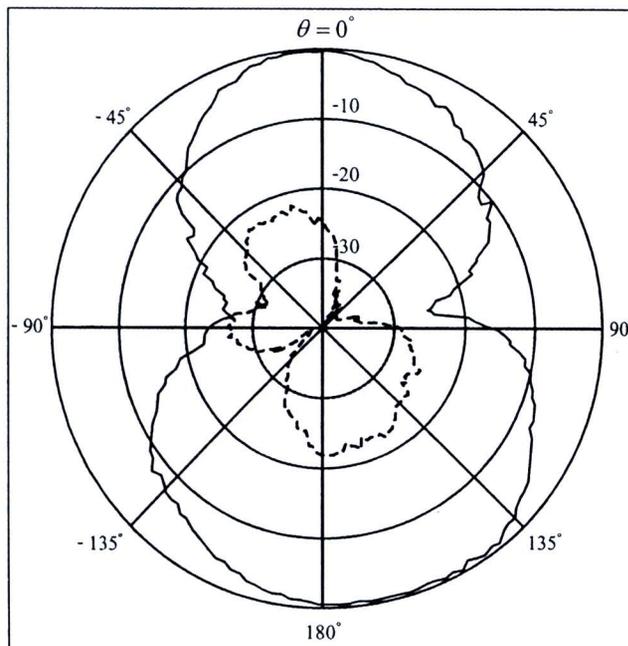


รูปที่ 3.21 สายอากาศตัวส่งแบบไมโครสตริปไดโพล

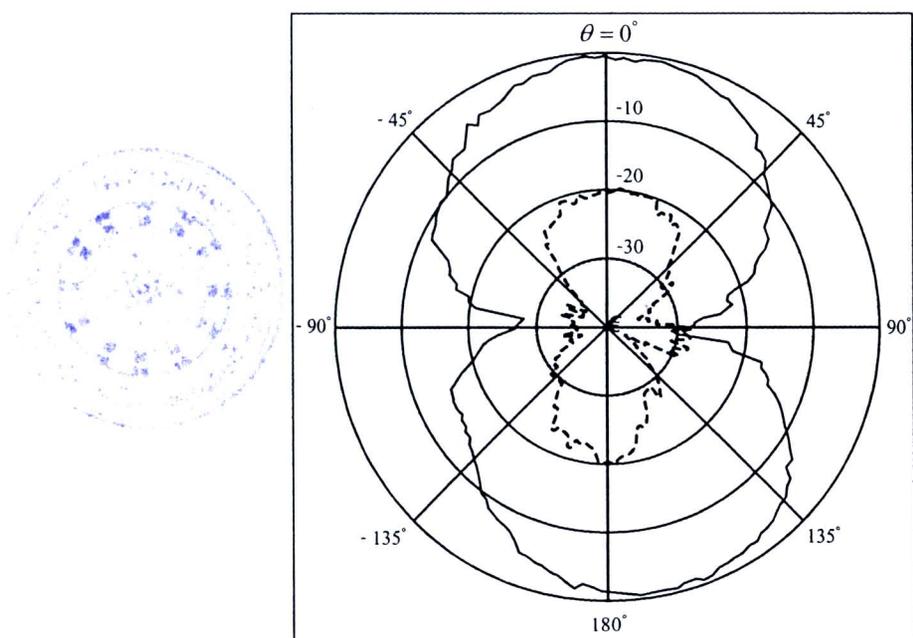
โดยผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าทั้งในรูปแบบของโพลาริเซชันร่วม และในรูปแบบของโพลาริเซชันไขว้ จากความถี่ที่เลือกมาทำการทดสอบทั้งสี่ความถี่ตามค่าที่เลือกมาแสดงในส่วนของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม IE3D เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบซึ่งกันและกันในแต่ละความถี่ โดยจากผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศต้นแบบในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ความถี่ 3.1 GHz 5.1 GHz 7.1 GHz และ 9.1 GHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23



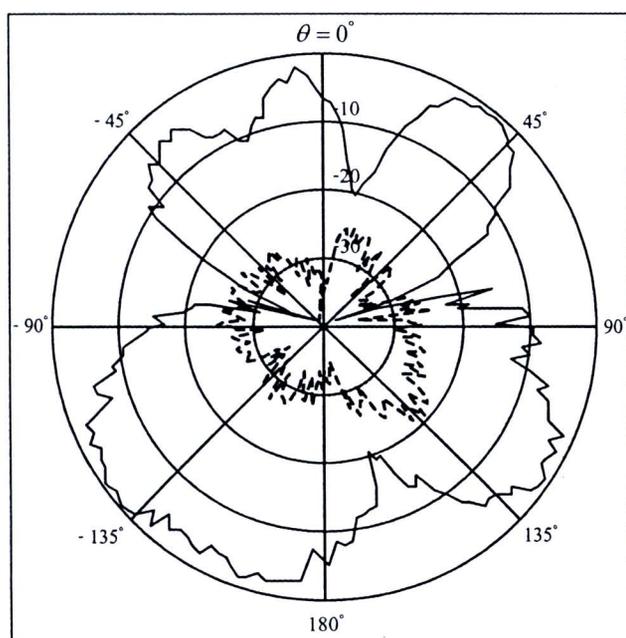
ก. ที่ความถี่ 3.1 GHz



ข. ที่ความถี่ 5.1 GHz

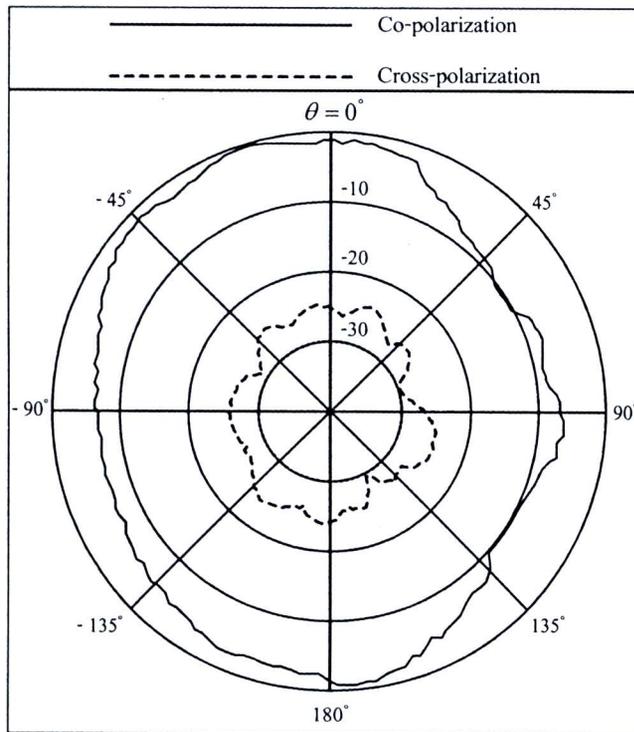


ค. ที่ความถี่ 7.1 GHz

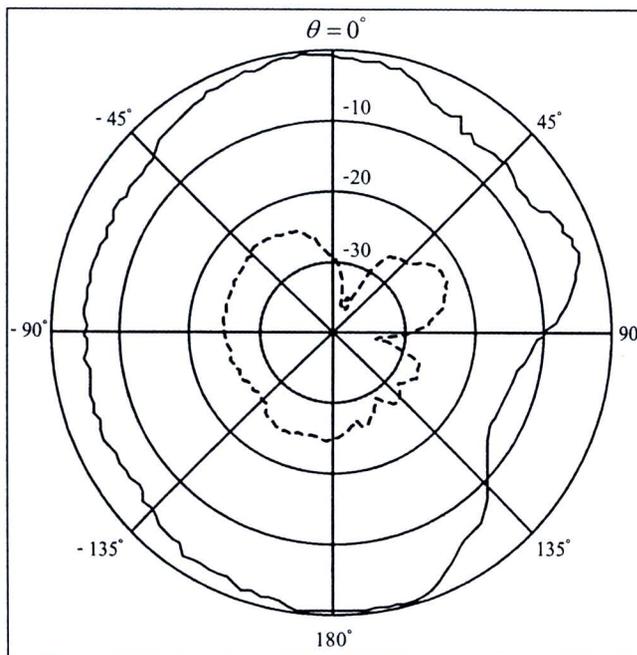


ง. ที่ความถี่ 9.1 GHz

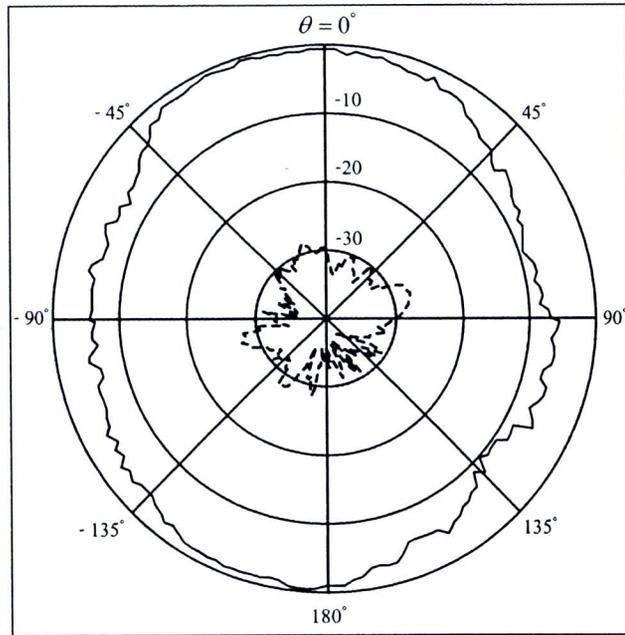
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ



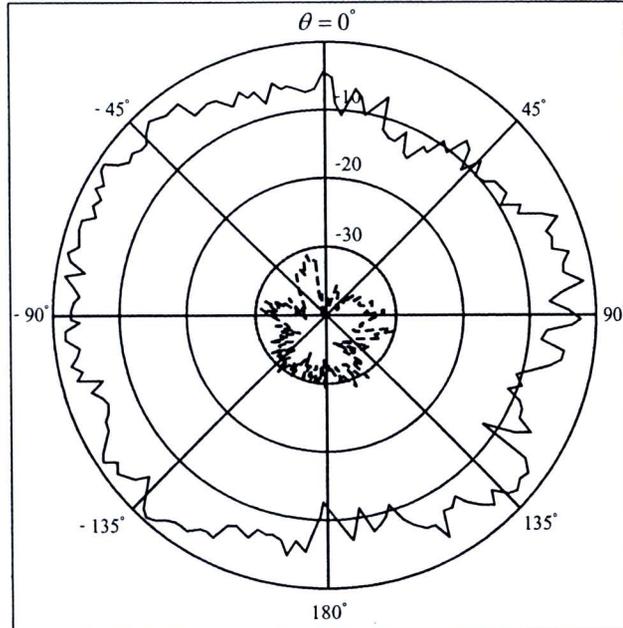
ก. ที่ความถี่ 3.1 GHz



ข. ที่ความถี่ 5.1 GHz



ก. ที่ความถี่ 7.1 GHz



ง. ที่ความถี่ 9.1 GHz

รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ต่างๆ

โดยจากผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็ก ทั้งในรูปแบบของโพลาริเซชันร่วม และโพลาริเซชันไขว้ พบว่าแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในรูปแบบของโพลาริเซชันร่วมนั้น มีพลังงานที่สูงกว่าในรูปแบบโพลาริเซชันไขว้มาก คือมีระดับของสัญญาณแตกต่างกันประมาณ 10 dB ถึง 30 dB และจากผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว

จากคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการวัดและทดสอบในทุก ๆ ค่า นั้น แสดงให้เห็นว่าสายอากาศต้นแบบที่ทำการออกแบบนั้น มีคุณภาพมากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

3.9 สรุป

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ และออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพตช์แบนด์กว้างรูปแบบใหม่ สำหรับการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ โดยการออกแบบสายอากาศดังกล่าวนี้ใช้โปรแกรม IE3D ในการจำลองแบบ เพื่อหาค่าขนาดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับใช้งานกับเทคโนโลยีการสื่อสารอัลตราไวด์แบนด์ ประกอบกับมีการออกแบบตัวป้อนสัญญาณของสายอากาศด้วยการแปลงอิมพีแดนซ์สายส่งความยาว $\lambda/4$ และในการออกแบบสายอากาศนี้ได้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 เป็นวัสดุฐานรอง ซึ่งสามารถใช้ได้ในย่านความถี่สูง โดยจากผลการจำลองแบบของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์กว้างครอบคลุมตลอดย่านความถี่ใช้งานตั้งแต่ 2.5 GHz–12 GHz มีอัตราขยายเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 dB และมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศเป็นแบบรอบตัวในระนาบเดียว และจากผลการจำลองแบบนั้นพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ดี แต่แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ได้นั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันไปบ้างในแต่ละความถี่ เนื่องจากสายอากาศที่ทำการออกแบบนั้นเป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างมาก และยากต่อการควบคุมเสถียรภาพของแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศให้เหมือนกันในทุกความถี่ได้