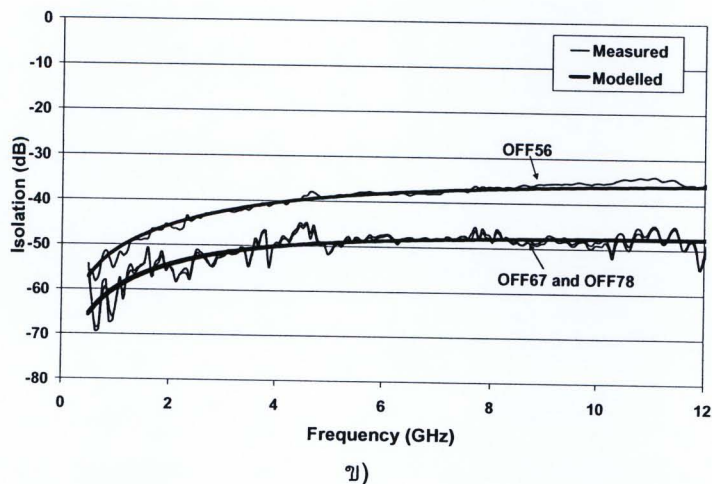
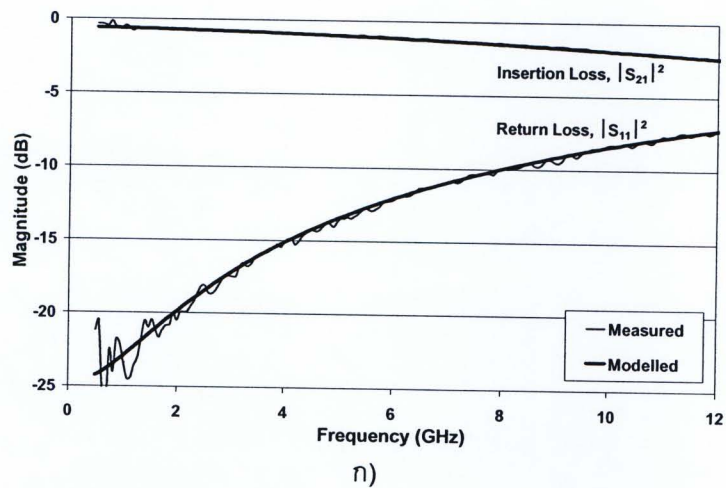


4. วิธีทดลอง

4.1 ข้อมูลทั่วไป

สิ่งประดิษฐ์สายอากาศในโครงการวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วนหลักด้วยกัน คือสายอากาศบนแผ่นฉนวน และสวิตช์แบบหมุน RF MEMS ซึ่งได้มีการประดิษฐ์มาก่อนหน้านี้แล้ว [1] ณ Imperial College London, UK โดยสวิตช์นี้เป็น single-pole-eight-throw (SP8T) ที่ใช้หลักการของ wobble motor ในสวิตช์ประกอบด้วยสเตเตอร์ (stator) และ โรเตอร์ (rotor) ทั้งนี้บนสเตเตอร์จะมีสายส่งสัญญาณขาเข้า 1 เส้น สายส่งสัญญาณขาออก 8 เส้น และขั้วไฟฟ้ากระแสตรง (DC electrodes) 8 อัน สำหรับป้อนแรงดันเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน โดยโรเตอร์ (rotor) วางอยู่บนแกนกลาง (axle) ของสเตเตอร์ที่เชื่อมต่อโดยตรงกับสายสัญญาณขาเข้าที่เป็น coplanar waveguide (CPW) เมื่อป้อนแรงดันไฟตรงที่ขั้วไฟฟ้าของหนึ่งในแปดของสายสัญญาณขาออกที่ต้องการ จะเป็นการดึงโรเตอร์ด้วยแรง electrostatic ลงมาเอียงทำมุมกับสเตเตอร์ เกิดเป็นการสัมผัสระหว่างโรเตอร์กับสายสัญญาณขาออกบนสเตเตอร์ ทำให้มีการเชื่อมต่อกันทางสัญญาณของสายส่งสัญญาณขาเข้ากับสายส่งสัญญาณขาออกที่ต้องการ ทั้งนี้ขนาดของสวิตช์จะถูกกำหนดด้วยขนาดของโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 1 มิลลิเมตรเท่านั้น สวิตช์แบบหมุนนี้มีข้อดีทางด้านความแน่นอนในการทำงาน และสามารถมีอายุการทำงานยาว เนื่องจากมีส่วนที่ต้องเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวคือโรเตอร์ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับสวิตช์ single-pole-multiple-throw แบบที่ใช้โครงสร้างแบบ cantilever หรือแบบ bridge ที่อาศัยการจัดวางสวิตช์หลายๆตัวเข้าด้วยกัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าสวิตช์แบบหมุนใช้พื้นที่น้อยกว่า และมีค่า yield ในการประดิษฐ์สูงกว่า และจากการทดสอบประสิทธิภาพของสวิตช์ตั้งแต่ DC ถึง 12 GHz แสดงในรูปที่ 1 ก) และ ข) พบว่าค่า insertion loss ต่ำสุดหรือ Maximum Available Gain (G_{Max}) ขณะ ON-state ซึ่งมีค่าประมาณ -2.5 dB ที่ความถี่ 12 GHz และค่า isolation ระหว่างสายสัญญาณขาเข้ากับสายสัญญาณขาออกต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะ OFF-state มีขนาดเท่ากับ 35 dB ที่ความถี่ 12 GHz.

สำหรับสายอากาศที่จะนำมาเชื่อมต่อกับสวิตช์ RF MEMS ได้พิจารณาเลือกใช้สายอากาศแบบ Tapered Slot Antenna (TSA) โดยเลือกใช้หนึ่งในลักษณะของสายอากาศแบบดังกล่าวคือสายอากาศที่เรียกว่า Vivaldi [2-3] ข้อดีของสายอากาศนี้คือการมีความกว้างของลำสัญญาณ (beam width) ที่ปรับแต่งได้ โครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถทำให้มีขนาดเล็กได้ ทั้งนี้ได้มีการนำสายอากาศมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของสายอากาศแบบ MEMS สำหรับเลื่อนเฟสที่ความถี่ 10 GHz [4] และในย่าน Ka-band [5] ซึ่งทั้งสองมีการติดตั้งสิ่งประดิษฐ์ MEMS หลายตัวเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจเกิดปัญหาความน่าเชื่อถือดังที่กล่าวไว้ข้างต้นได้.

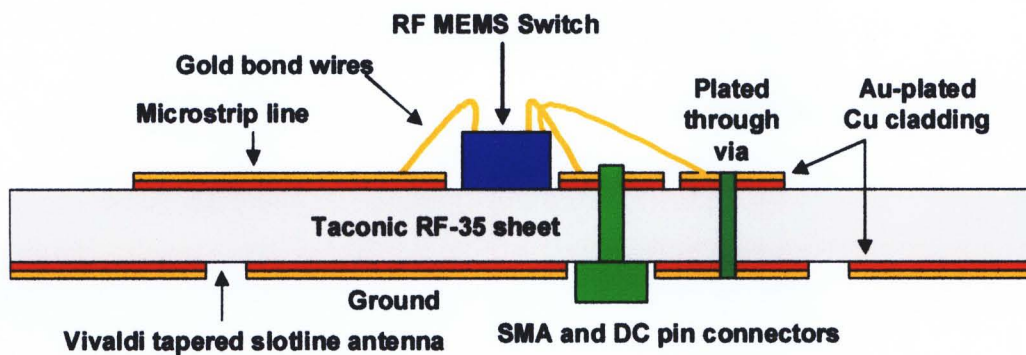


รูปที่ 1 ประสิทธิภาพของสวิตช์แบบหมุน ก) ค่า insertion loss ขณะอยู่ในสถานะ ON และ ข) ค่า isolation ในสถานะ OFF [1]

แบบจำลองโครงสร้างสามมิติของคลื่นความถี่วิทยุของสายอากาศได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพ ย่านความถี่ที่สายอากาศนี้ใช้งานคือ X-band (8-12 GHz) และความถี่กลางคือ 10 GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สวิตช์ทำงานได้ดังในรูปที่ 1 สำหรับการทำงานของสายอากาศสามารถอธิบายได้จากโครงสร้างของสายอากาศในรูปที่ 2 คือสวิตช์สร้างบนชั้นเซเตรดแผ่นควอทซ์ สัญญาณขาเข้าถูกป้อนจาก SMA ติดตั้งอยู่บนแผ่นฉนวน Taconic RF-35 เชื่อมต่อเข้าสู่สวิตช์ด้วยการ bond wire จากนั้นสัญญาณผ่านไปยังโรเตอร์ของสวิตช์และสายสัญญาณขาออกที่ต้องการ โดยที่ปลายของสายสัญญาณขาออกทั้ง 8 จะมีการเชื่อมต่อด้วย bond wires เข้ากับสายสัญญาณ microstrip ที่อยู่ด้านบนของแผ่นฉนวน Taconic RF-35 ที่เคลือบด้วยชั้นสารตัวนำทองแดง/ทอง ส่วนด้านล่างของ microstrip แต่ละเส้น จะเป็นสายสัญญาณ slotline ทำจากชั้นสารทองแดง/ทองเช่นเดียวกัน ทำหน้าที่เป็นส่วนแผ่สัญญาณ

ของสายอากาศ จากการออกแบบขนาดของ microstrip และ slotline ที่เหมาะสม จะทำให้ สัญญาณจาก microstrip ถูกคู่ควบผ่านแผ่น RF-35 ไปยังสายสัญญาณ slotline ซึ่งมีลักษณะ ค่อยๆบานออก ทำให้สัญญาณคู่ควบจากตัวนำของ slotline ด้านหนึ่งไปสู่ตัวนำอีกด้านหนึ่ง ด้วย characteristic impedances ที่สูงขึ้น จนเมื่อถึงจุดสิ้นสุดสายสัญญาณ slotline สัญญาณจะ แผ่รังสี หรือ radiate ออกสู่อากาศในที่สุด

โครงสร้างองค์ประกอบของสายอากาศที่เชื่อมต่อกับสวิตช์แบบหมุนแสดงในรูปที่ 2 ซึ่ง สวิตช์ RF MEMS ถูกสร้างบนแผ่นควอตซ์ ขนาด 3x3 มิลลิเมตร² การเชื่อมต่อของ สายสัญญาณไปยังสายสัญญาณขาเข้าสวิตช์จะผ่านทาง SMA จากด้านล่างของแผ่นฉนวน RF-35 สำหรับการเชื่อมต่อแรงดันไฟตรงสำหรับขับเคลื่อนโรเตอร์ กระทำด้วย pin connectors ใน ลักษณะเดียวกับ SMA นอกจากนี้ยังมีการเชื่อมต่อสายดิน (ground) ของทั้งสายสัญญาณและ แรงดันขับเคลื่อนไฟตรงเข้ากับ slotline ที่ทำหน้าที่เป็นสายดินของ microstrip ด้วยการปลุกชั้น สารตัวนำในลักษณะ plated through via ในแผ่นฉนวน



รูปที่ 2 โครงสร้างองค์ประกอบของสายอากาศ

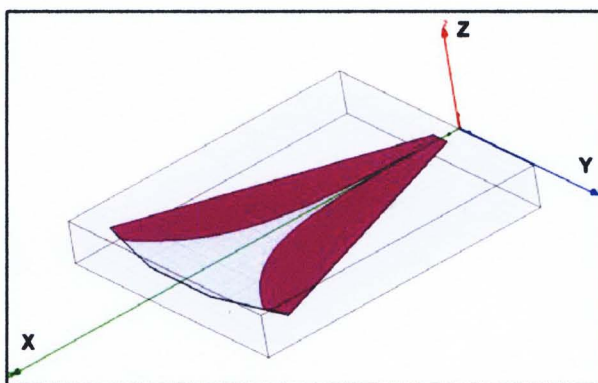
4.2 การออกแบบสายอากาศ

การสร้างแบบจำลองสายอากาศกระทำด้วยโปรแกรมประมวลผลโครงสร้างสามมิติของ คลื่นความถี่วิทยุ ทั้งนี้สายอากาศทั้งหมดแปดถูกสร้างอยู่บนแผ่นฉนวน RF-35 ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 12 นิ้ว ความหนา 250 ไมครอน มีชั้นสารตัวนำทองแดง/ทองหนา 18 ไมครอนเคลือบ อยู่ 2 ด้าน มีค่า dielectric constant เท่ากับ 3.5 ± 0.1 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อ ความถี่เพิ่ม และค่า $\tan \delta$ เท่ากับ 0.0018 คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ค่าความหนาประสิทธิผล (effective thickness) ของแผ่นฉนวน RF-35 เป็นไปตามความหนาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน ที่ความถี่ที่ต้องการ [6] คือ

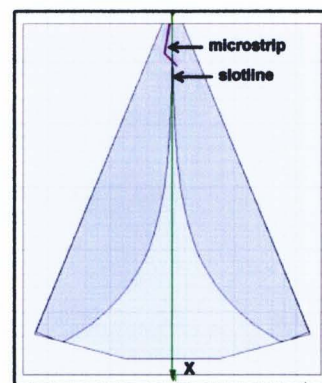
$$0.005 \leq \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1)t}{\lambda_0} \leq 0.03 \quad (1)$$

ขนาดของสายอากาศแต่ละอันถูกกำหนดให้อยู่ในพื้นที่เซกเตอร์ 45 องศาของวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้วตามขนาดของแผ่น RF-35 เนื้อที่ตรงกลางของแผ่นฉนวน RF-35 จะติดตั้งสวิตช์แบบหมุน RF MEMS และสายสัญญาณสำหรับสัญญาณความถี่สูงและแรงดันขับเคลื่อนไฟตรง อย่างไรก็ตามความยาวของสายอากาศแต่ละอันเป็นไปตามความยาวที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดไว้ว่าสายอากาศควรมีความยาว 2-5 เท่าของ λ_0 [7].

แบบจำลองสามมิติของสายอากาศ 1 อันได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพ โดยสายอากาศ Vivaldi ที่อยู่บนแผ่น RF-35 ประกอบด้วย microstrip และ slotline ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งรูปที่ 3 ก) แสดงภาพสามมิติของโครงสร้างของสายอากาศบนชั้นเซกตรด และมีกล่องอากาศล้อมรอบเพื่อกำหนด boundary ของโครงสร้างเป็นแบบ radiation boundary ส่วนรูปที่ 3 ข) เป็นภาพจากมุมมองของ microstrip และ slotline ซึ่งขนาดของส่วนประกอบทั้งสองกำหนดจากโปรแกรม TXline ได้ว่าความกว้างของ microstrip คือ 546 ไมครอน และความยาว guide wavelength หรือ λ_{g-m} เท่ากับ 18.13 มิลลิเมตรและระยะห่างระหว่างตัวนำของ slotline คือ 200 ไมครอน และความยาว guide wavelength หรือ λ_{g-s} เท่ากับ 21.33 มิลลิเมตร



ก)



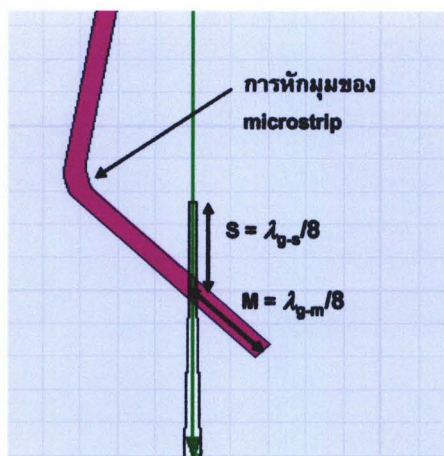
ข)

รูปที่ 3 แบบจำลองสายอากาศสร้างขึ้นเพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพที่ความถี่ 10 GHz

ก) โครงสร้างสามมิติ และ ข) ส่วนประกอบ microstrip และ slotline

การประเมินประสิทธิภาพการส่งสัญญาณทางคลื่นความถี่วิทยุของสายอากาศนั้นได้ดำเนินการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อคุณลักษณะของสายอากาศ ดังรูปที่ 4 อันได้แก่ ความยาวของ microstrip ส่วนที่ยื่นออกจากจุดที่ตัดกับ slotline (ระยะ M), ความยาวของ slotline ส่วนที่ยื่นออกจากจุดที่ตัดกับ microstrip (ระยะ S), การหักมุมของ microstrip และรูปร่างของการกว้างขึ้นหรือบานออกของ slotline นั่นคือ ค่าคงที่ A และ p ในสมการ [8,9]

$$y = Ae^{px} \quad (2)$$



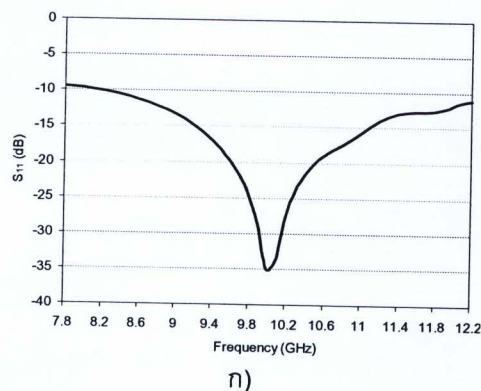
รูปที่ 4 ภาพแสดงบริเวณจุดตัดของ microstrip กับ slotline และความยาวของสายสัญญาณส่วนที่ยื่นออกจากจุดตัด

โดย x และ y เป็นพิกัดของแกน x และ y ตามรูปที่ 3 ที่ใช้ในการวาดแบบ slotline ซึ่งผลของประสิทธิภาพค่า return loss ของสายอากาศที่ได้จากแบบจำลองที่ใช้ศึกษาตัวแปรเหล่านี้ ได้ให้ข้อสรุปว่าสายอากาศจะทำงานที่ความถี่ 10 GHz ตามเป้าหมายได้เมื่อระยะ M ควรยาวเท่ากับ $\lambda_{g-m}/8$ ของ microstrip นั่นคือ 2.26 มิลลิเมตร และระยะ S ควรมีความยาวเท่ากับ $\lambda_{g-s}/8$ หรือ 2.66 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าการหักมุมของ microstrip มีผลต่อการทำงาน จากเดิม microstrip ถูกหักมุมประมาณ 135 องศา เหมือนการนำเอา microstrip 2 ส่วนเชื่อมต่อกันด้วยมุม 135 องศา แต่เมื่อได้ทดลองนำเอา microstrip ส่วนสั้นๆ 4 ส่วนมาเชื่อมต่อกับ microstrip สองส่วนแรกตรงบริเวณการหักมุม ทำให้ประกอบเป็นสายสัญญาณที่ค่อยๆ มีการหักมุมทีละน้อย พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศพัฒนาขึ้น คือมีค่า return loss น้อยลง หรือสายอากาศสามารถแผ่สัญญาณได้มากขึ้น ทั้งนี้การที่สายสัญญาณมีการหักมุม 135 องศาเพียงมุมเดียวจะทำให้เกิดความไม่เหมาะสมกันของอิมพีแดนซ์ หรือ impedance mismatch มากกว่า ทำให้เกิดความสูญเสียจากการสะท้อนกลับที่การหักมุมนี้

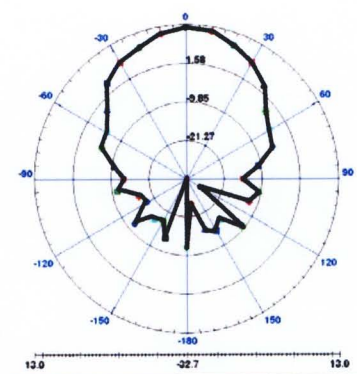
สำหรับค่าคงที่ A และ p ในสมการที่ (2) ของการบานออกของ slotline มีความสัมพันธ์กันและถูกกำกับด้วยขนาดของแผ่นซับสเตรต RF-35 นั่นคือสายอากาศทั้ง 8 ต้องอยู่ภายในพื้นที่วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว และจากการศึกษารูปร่างของการบานออกโดยการแปรเปลี่ยนค่า A พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพ return loss เมื่อ A มีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 3 แต่เมื่อค่า A มีค่ามากขึ้น เช่นเท่ากับ 20 จะทำให้ขนาด return loss สูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าสัญญาณถูกสะท้อนกลับมากกว่าที่จะแผ่รังสีออกไป หรือประสิทธิภาพของสายอากาศต้อลงนั่นเอง ในโครงการวิจัยนี้เลือกใช้ค่า A เท่ากับ 0.5 และเนื่องจากรูปร่างการบานออกที่เป็นผลจากค่าคงที่ p ของสายอากาศแต่ละอันต้องอยู่ภายในพื้นที่ที่จำกัดของเซกเตอร์ 45 องศาของแผ่นซับสเตรต RF-35 ทำให้สมการการบานออกของ slotline คือ

$$y=0.5e^{0.4x} \quad (3)$$

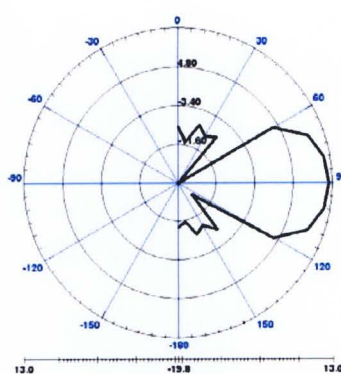
จากการประมวลผลโครงสร้างสามมิติสายอากาศ Vivaldi ตามรูปที่ 4 ที่ความถี่ 10 GHz ซึ่งอยู่ในย่าน X-band (8-12 GHz) โดยในการประมวลผลที่ความถี่ 10 GHz คือการกำหนดให้แบบจำลองสร้าง tetrahedral (รูปทรงคล้ายปิระมิด) ขึ้น ซึ่งมีความยาวแต่ละด้านเท่ากับกึ่งหนึ่งของ λ_0 ที่ความถี่ 10 GHz ทั้งนี้โดยทั่วไปเมื่อต้องการพิจารณาผลที่ความถี่ 10 GHz การใช้ความถี่กลางที่ 5 GHz จะให้ผลที่มีความแม่นยำเพียงพอ อย่างไรก็ตามในโครงการวิจัยนี้ต้องการผลที่มีความแม่นยำสูง เพราะอาจมีความคลาดเคลื่อนได้มากเมื่อวัดประสิทธิภาพจากสิ่งประดิษฐ์จริง จึงได้เลือกใช้ความถี่กลางที่ 10 GHz ซึ่งหมายถึงการสร้าง tetrahedral ที่มีขนาดเล็กลง ทำให้ใช้เวลาและหน่วยความจำในการประมวลผลมากขึ้น ทั้งนี้ผลประสิทธิภาพของสายอากาศเดี่ยวได้แก่ค่า return loss, radiation pattern สำหรับ E-plane และ H-plane แสดงในรูปที่ 5 ก) ข) และ ค) ตามลำดับ โดยในรูป 5 ก) เป็นการแสดง return loss ในหน่วย dB และรูป 5 ข) และ ค) เป็นการแสดงค่า Gain (dB) ใน E-plane และ H-plane ซึ่งได้มาจากการสร้างทรงกลมของการแผ่รังสี (radiation sphere) ขึ้นล้อมรอบโครงสร้างสามมิติของสายอากาศ ตามแกน X-Y-Z ที่กำหนดในรูปที่ 3 โดยให้ θ มีค่าตั้งแต่ 0-180 องศา กวาดมุมจากบนลงล่างในระนาบ X-Z และ ϕ มีค่าตั้งแต่ 0-360 องศา กวาดบนระนาบ X-Y ซึ่ง radiation pattern ใน E-plane คือการแปรเปลี่ยน ϕ จาก 0 ถึง 360 องศา เมื่อกำหนดให้ θ คงที่อยู่ที่ 90 องศา นั่นคือการหมุนรอบแกน Z ไปตามแกน X ($\phi=0$) จนครบรอบบนระนาบ X-Y และ H-plane ได้มาจากการแปรเปลี่ยน θ จาก 0 ถึง 180 องศา เมื่อ $\phi=0$ หรือคือการกวาดขึ้น 90 องศา และลง 90 องศาจากแกน X ในระนาบ X-Z นอกจากนี้ยังได้สรุปค่าประสิทธิภาพต่างๆ ที่คำนวณได้จากโครงสร้างสามมิติของแบบจำลองสายอากาศได้ดังในตารางที่ 1



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองสายอากาศเดี่ยว Vivaldi ก) return loss



ข)



ค)

รูปที่ 5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองสายอากาศเดี่ยว Vivaldi

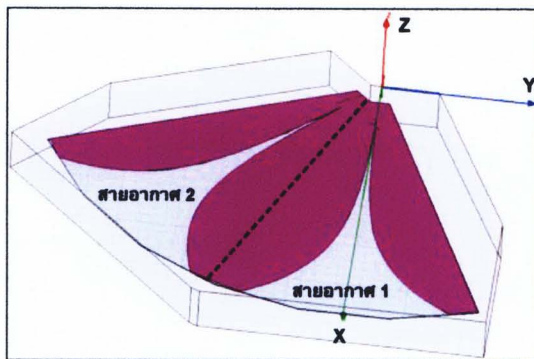
ข) radiation pattern บน E-plane และ ค) radiation pattern บน H-plane

ตารางที่ 1 สรุปประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองโครงสร้างสายอากาศเดี่ยวที่ออกแบบ

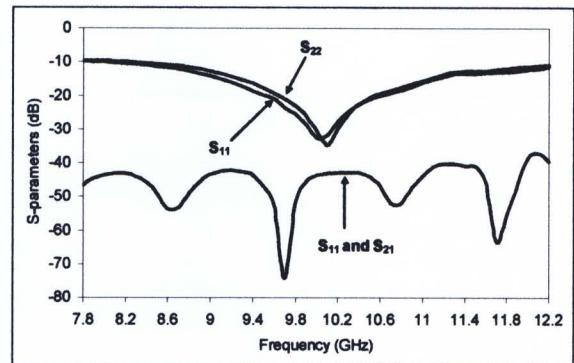
Peak Directivity (dB)	18.306
Peak Gain (dB)	16.294
Efficiency	0.89011
minimum S_{11} (dB)	-34.68 at 10 GHz
E-plane -3 dB beamwidth (degrees)	19.64°
H-plane -3 dB beamwidth (degrees)	22.31°

ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปของการออกแบบสายอากาศ Vivaldi เดี่ยว ที่เหมาะสมในการใช้งาน ที่ 10 GHz ในย่าน X-band ได้ว่ามีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี เพราะมีค่า return loss น้อยมากถึงเกือบ 35 dB และมีความกว้าง -3 dB ของลำสัญญาณ (-3 dB beamwidth) ในระดับ 20 องศาบนระนาบ X-Y ซึ่งในทางปฏิบัติสายอากาศทั้ง 8 ถูกสร้างบนชั้นเสตครตเดียวกัน แต่ละอันมีเนื้อที่เซคเตอร์ 45 องศา การมี -3 dB beamwidth ที่แคบกว่า 45 องศาหมายความว่าสายอากาศที่อยู่ติดกันจะไม่กระทบการทำงานซึ่งกันและกัน อย่างไรก็ตามข้อสรุปนี้สามารถตรวจสอบได้ด้วยการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ 2 สายอยู่ติดกัน เพื่อใช้พิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศแต่ละสาย เปรียบเทียบกับการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศเดี่ยว และยังสามารถใช้พิจารณาการคู่ควบ (coupling) ระหว่างกัน ซึ่งเมื่อใช้แบบจำลองสายอากาศ 2 สายในรูปที่ 6 ก) ในการประมวลผลพบว่าผลประสิทธิภาพที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ข) นั่นคือค่า return loss ต่ำสุดที่ ประมาณ 35 dB ใกล้เคียงกับสายอากาศเดี่ยว และค่าคู่ควบระหว่างสายอากาศทั้งสองหรือ S_{12} และ S_{21} อยู่ในระดับที่น้อยกว่า -40 dB ซึ่งหมายความว่าสายอากาศทั้งสองมีการคู่ควบซึ่งกันและกันน้อยมาก พลังงานของสัญญาณส่วน

ใหญ่ถูกแผ่รังสีออกไปจากสายอากาศเพียงอันเดียว และเมื่อพิจารณาค่า Peak Directivity และ Peak Gain พบว่ามีค่าเท่ากับ 17.599 dB และ 16.194 dB ตามลำดับ สำหรับ beamwidth ของสายอากาศมีค่า เท่ากับ 18.67 องศา บน E-plane และ 21.86 องศาบน H-plane ซึ่งทั้งหมดนี้มีความใกล้เคียงกับผลจากแบบจำลองสายอากาศเดี่ยว (ตารางที่ 1) จึงหมายความว่าสายอากาศที่ออกแบบมีความเหมาะสมดี และไม่จำเป็นต้องมีการคั่นกลางระหว่างสายอากาศ เพราะโครงสร้างของสายอากาศแต่ละอันส่งผลกระทบทหรือรบกวนการทำงานของสายอากาศใกล้เคียงในระดับที่น้อยมาก



ก)

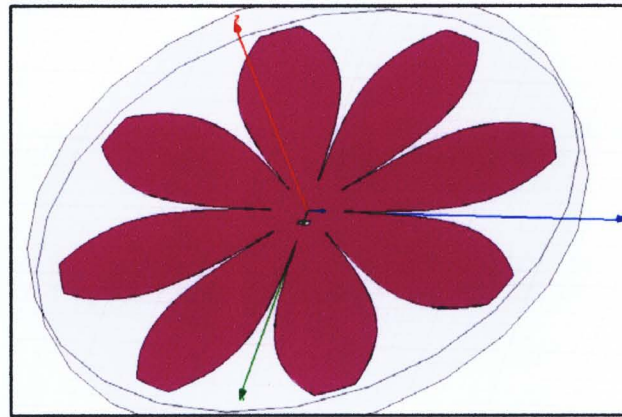


ข)

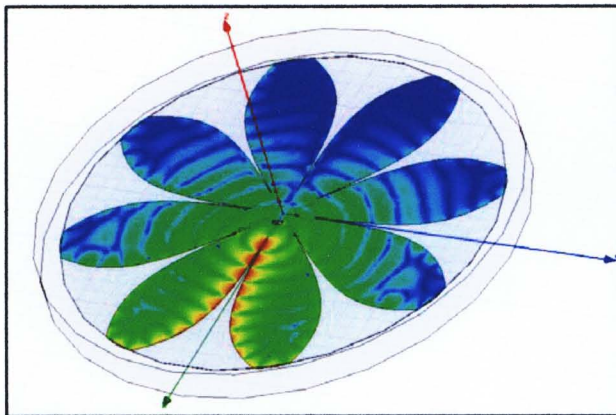
รูปที่ 6 โครงสร้างสามมิติของสายอากาศ 2 อันติดกัน

ก) แบบจำลองที่ใช้ประมวลผล และ ข) ผลของค่า S-parameters ที่ได้จากแบบจำลอง

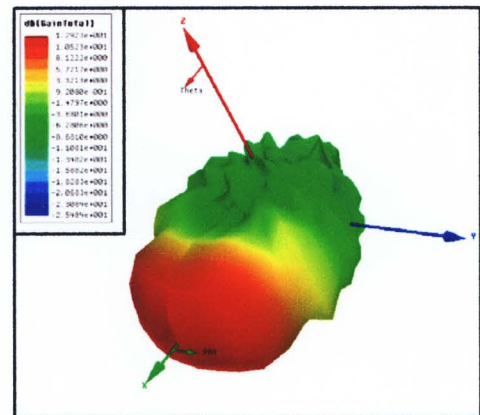
นอกจากนี้ยังได้มีการประมวลผลโครงสร้างสายอากาศทั้งหมด 8 สาย เพื่อตรวจสอบการคู่ควบ (coupling) ระหว่างกันอีกด้วย ซึ่งโครงสร้างสายอากาศทั้งหมดแสดงในรูปที่ 7 ก) โดยผลของการประมวลผลด้วยแบบจำลองแสดงในรูปที่ 7 ข) และ ค) ซึ่งในรูป 7 ข) เป็นการแสดงขนาด (เชิงเส้น) ของการแผ่รังสีใน E-plane หรือระนาบ X-Y ส่วนรูป 7 ค) แสดงการแผ่รังสีใน 3 มิติ ซึ่งมีสายอากาศ 1 อันที่แผ่รังสีมากกว่าสายอากาศอื่นๆ อยู่ประมาณเกือบ 20 dB สอดคล้องกับผลจากสายอากาศเดี่ยว.



ก)



ข)

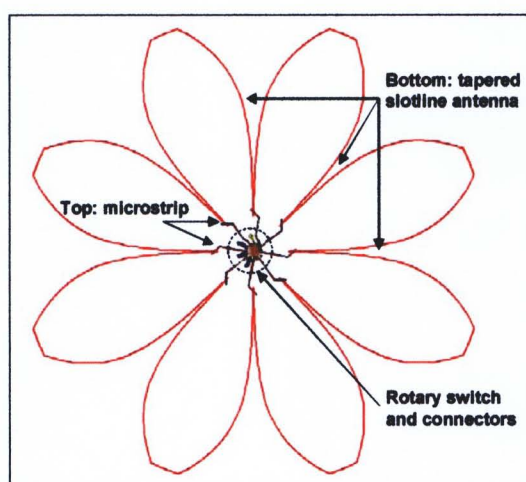


ค)

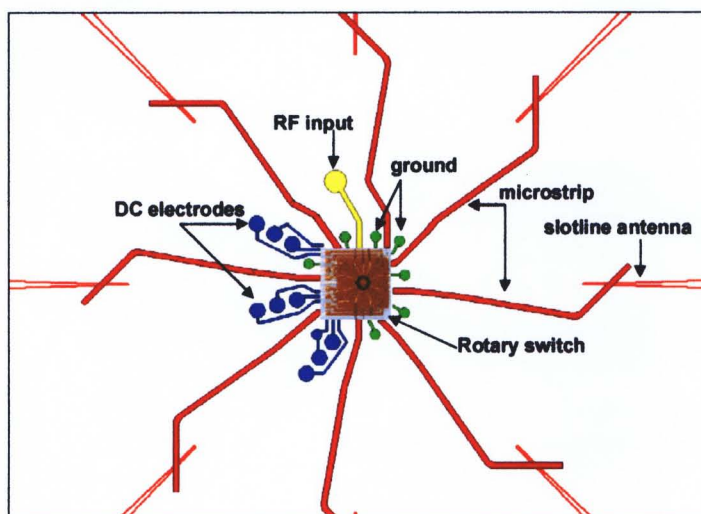
รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศทั้งแปดอัน ก) แบบจำลองที่ใช้ประมวลผล
ข) ผลการแผ่รังสีบน E-plane และ ค) ผลการแผ่รังสีใน 3 มิติ

ผลจากแบบจำลองโครงสร้างสามมิติของสายอากาศทั้งแปดที่อยู่ติดกันแสดงให้เห็นว่า ไม่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมตัวแปรทางกายภาพใดๆในการป้องกันการคู่ควบ (coupling) ระหว่างสายอากาศ จึงได้ดำเนินโครงการวิจัยต่อไปในขั้นตอนต่อไป คือการถ่ายแบบสายอากาศที่ได้ประมวลประสิทธิภาพที่ความถี่สูงจากโครงสร้างสามมิติลงบนต้นแบบที่จะใช้ในการสร้างสายของตัวนำบนแผ่นฉนวน RF-35 ตามที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการวางตำแหน่งองค์ประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการป้อนสัญญาณเข้า (input signal feed line) และการขับเคลื่อนสวิตช์แบบหมุนรอบเพลาก็ด้วย ซึ่งการดำเนินโครงการได้ออกแบบการสร้างต้นแบบในการพิมพ์ลายตัวนำบนแผ่นฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงลายต้นแบบทั้งชั้นบนและชั้นล่างของแผ่นซับสเตรต RF-35 ในภาพเดียวกันเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นตำแหน่งของส่วนประกอบต่างๆในภาพรวม อย่างไรก็ตามรายละเอียดของลายต้นแบบบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นซับสเตรต RF-35 ได้ถูกแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์แบบหมุนประดิษฐ์ด้วย

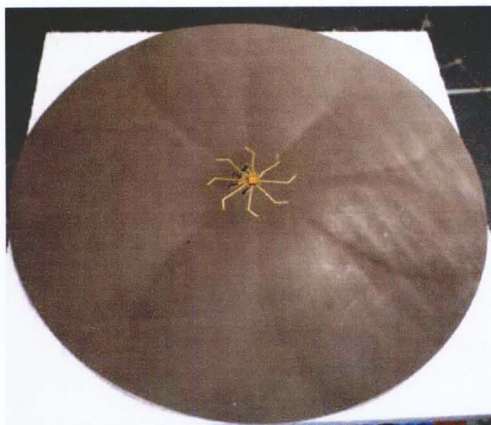
เทคโนโลยี MEMS อยู่ตรงกลาง, ขั้วสำหรับ SMA ซึ่งเชื่อมต่อไปยังสายสัญญาณขาเข้าบน สวิตช์ด้วย wire bonding ที่ทำจากเส้นทองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมโครเมตร, สายสัญญาณ microstrip ทั้งแปดเส้นและสายดินที่เชื่อมต่อกับสายสัญญาณขาออก CPW ของ สวิตช์ด้วย wire bonding เช่นเดียวกัน นอกจากนี้บนชั้นบนของแผ่นซับสเตรต RF-35 ยังมีการ บัดกรีขั้วสำหรับ pin connector เพื่อใช้ในการกระตุ้นโรเตอร์ด้วยสัญญาณไฟตรงและสายดินทั้ง ของสัญญาณไฟตรง (DC ground) และสัญญาณความถี่สูง (RF ground) ซึ่งสายดินเหล่านี้จะถูก เชื่อมผ่านชั้นตัวนำ plated through hole ต่อไปยังด้านล่างของแผ่น RF-35 เพื่อเป็นสายดิน สำหรับ microstrip และเป็นสายอากาศ tapered slot ทั้งหมดนี้แสดงในรูปที่ 10



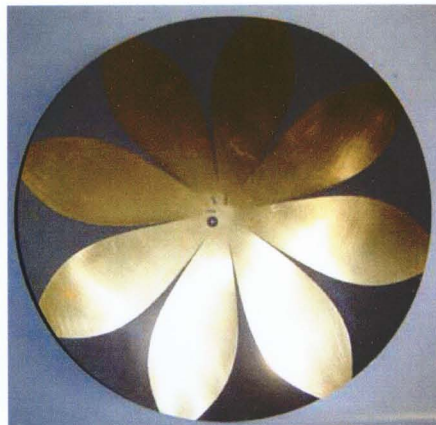
รูปที่ 8 รูปต้นแบบลายตัวนำด้านล่างของแผ่น RF-35ที่ใช้ในการประดิษฐ์สายอากาศ



รูปที่ 9 รายละเอียดบริเวณตรงกลางของลายตัวนำต้นแบบด้านล่างของแผ่น RF-35



ก)

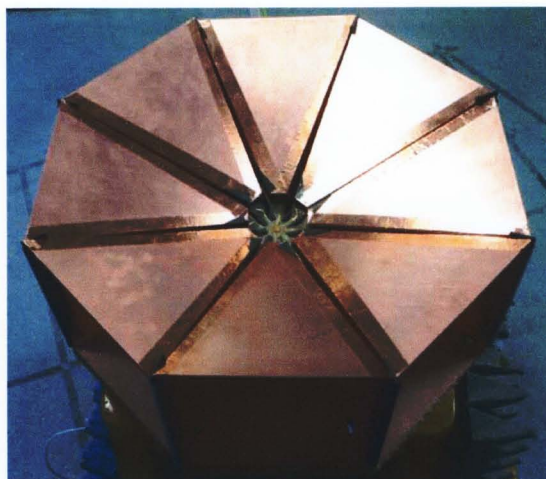


ข)

รูปที่ 10 สายอากาศบนแผ่น RF-35 ที่ประดิษฐ์ขึ้น ก) ด้านบน และ ข) ด้านล่าง

นอกจากนี้ยังได้มีการสร้าง horn antenna สำหรับสายอากาศแต่ละอัน โดย horn แต่ละอันทำจากแผ่นฉนวน FR-4 จำนวน 4 แผ่นประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็น housing สำหรับสายอากาศ หรือที่เรียกว่า sectorized horn antenna array โดย horn antenna แต่ละอันมี gain เท่ากับ 20 dB ซึ่งออกแบบได้จากพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10] มีพื้นที่ $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ ที่ปลายด้านใน และพื้นที่ $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ที่ปลายด้านนอก ซึ่ง horn antenna นี้มีความยาวเท่ากับ 17.85 cm ซึ่งยาวเกินกว่าสายอากาศ Vivaldi บนแผ่น RF-35 เล็กน้อย นอกจากนี้ยังได้ทำช่องเสียบตรงกลางเพื่อสอดแผ่นสายอากาศ RF-35 ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10 เข้าไปใน horn antenna แต่ละอันให้เข้าไปชิดกับสวิตช์ที่บริเวณตรงกลางของแผ่น RF-35 ให้มากที่สุด หรือคือการให้สายอากาศ Vivaldi ถูกครอบคลุมด้วย horn antenna ให้มากที่สุด หลังจากการประกอบสายอากาศแล้วได้ sectorized horn antenna array ดังแสดงในรูปที่ 11 นอกจากนี้ยังมีการติดแผ่นดูดซับสัญญาณความถี่ไมโครเวฟหรือ Microwave Absorber เพื่อป้องกันการคู่ควบระหว่างสายอากาศ ซึ่งอาจมีผลข้างเคียงต่อการแผ่รังสีของสายอากาศในการทำให้สัญญาณบางส่วนถูกดูดกลืนด้วย Microwave Absorber นี้

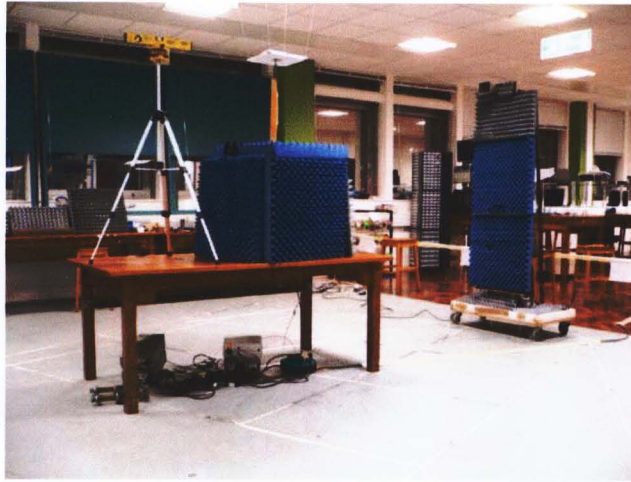




รูปที่ 11 สายอากาศที่ประกอบเป็น Sectorized horn antenna array

4.3 วิธีการวัดประสิทธิภาพ

หลังเสร็จสิ้นการประดิษฐ์และประกอบสายอากาศแล้ว ลำดับต่อไปคือการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ การวัด return loss และการวัดรูปแบบการแผ่รังสี หรือ radiation pattern ทั้งนี้การวัด return loss กระทำด้วยการใช้เครื่องมือ Vector Network Analyzer ที่ความถี่ 6-14 GHz โดยวัดจาก input port ของสวิตช์ขณะที่สวิตช์ทำงานที่ตำแหน่งหนึ่งๆ จนครบทั้ง 8 ตำแหน่ง สำหรับการวัดรูปแบบการแผ่รังสีนั้นแสดงในรูปที่ 12 กระทำโดยการติดตั้งสายอากาศ Sectorized horn antenna array ที่ประดิษฐ์ขึ้นบนโต๊ะตรงกลางห้อง โดยสายอากาศนี้เป็นภาคส่ง นั่นคือ input port ของสวิตช์จะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณแบบ square-wave-modulated ความถี่ 10 GHz ส่วนทางด้านภาครับจะเป็น horn antenna อังอิง ที่มี gain เท่ากับ 20 dB ต่อเข้ากับ Schottky diode square law detector และเครื่องขยายสัญญาณ โดยสายอากาศภาครับและส่งอยู่บนระดับความสูงเดียวกัน อุปกรณ์ทางภาครับทั้งสามถูกติดตั้งบนรถเข็นที่เคลื่อนย้ายไปรอบสายอากาศ Sectorized horn antenna array ครั้งละ 1-2 องศา จนครบรอบ 360 องศา เพื่อวัดสัญญาณที่สายอากาศภาคส่งส่งออกมา ณ ตำแหน่งต่างๆ ทำให้ได้ผลการวัดรูปแบบการแผ่รังสีในระนาบ E-plane



รูปที่ 12 การจัดเตรียมการวัดรูปแบบการแผ่รังสี หรือ radiation pattern โดยมี Sectorized horn antenna array ติดตั้งบนโต๊ะตรงกลาง และมีอุปกรณ์ภาครับเคลื่อนที่ไปรอบๆ