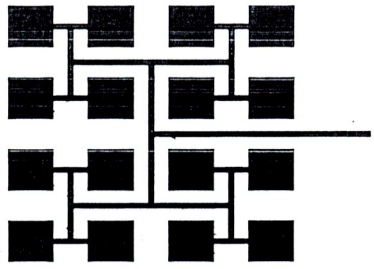
บทที่ 3
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

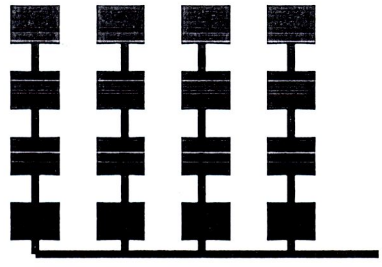
ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป โดยจะกล่าวถึงคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน การคำนวณหาการประวิงเฟสและเฟสสะท้อน การออกแบบแผ่นสะท้อน และสายอากาศร่องแบบเรียว

3.2 คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน

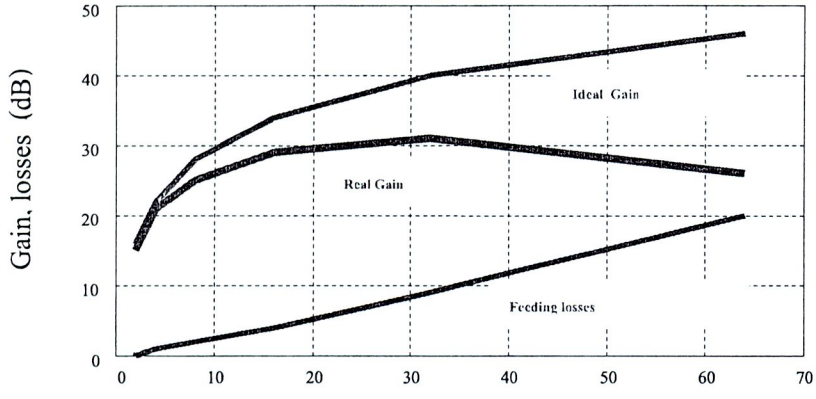
สายอากาศสำหรับใช้งานในระบบการสื่อสารควรมีคุณสมบัติดังนี้ คือให้อัตราขยายสูง มีการสูญเสียต่ำ ขนาดเล็กกะทัดรัด สร้างได้ง่าย และราคาต่ำ โดยสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปถือเป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสม แต่สายอากาศดังกล่าวมีระบบป้อนสัญญาณ (Feed) ที่ซับซ้อน เกิดการสูญเสียภายในตัวป้อน และยังมีความกว้างแถบ (Bandwidth) แคบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 นอกจากสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปแล้ว สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกก็เป็นสายอากาศอีกชนิดที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ตัวสะท้อน (Reflector) และตัวป้อนสัญญาณซึ่งมักใช้เป็นแบบสายอากาศปากแตร (Horn Antenna) สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกโดยทั่วไปจะมีการป้อนสัญญาณดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีสภาพเจาะจงทิศทางสูง เหมาะสำหรับเป็นสายอากาศเพื่อใช้ในสถานีภาคพื้นดินสำหรับติดต่อกับดาวเทียม หรือการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น แต่เนื่องจากสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกมีขนาดใหญ่และมีผิวโค้ง ดังนั้นจึงมีการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสติปที่มีลักษณะราบเรียบ แต่สามารถให้คุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวสะท้อนพาราโบลิก นอกจากนั้นสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสติปยังมีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย และเคลื่อนย้ายสะดวกด้วย รูปที่ 3.3 แสดงสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป



ก. ระบบป้อนแบบขนาน

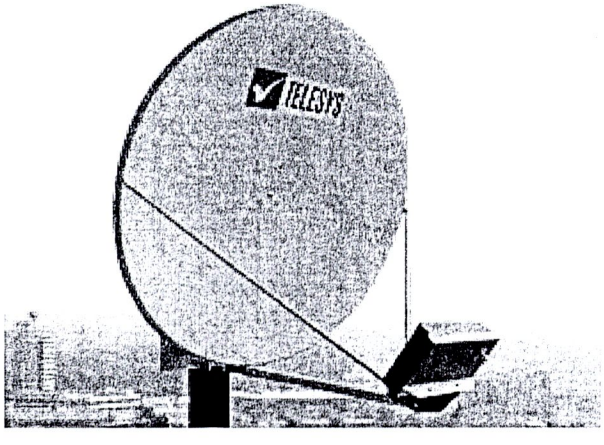


ข. ระบบป้อนแบบอนุกรม

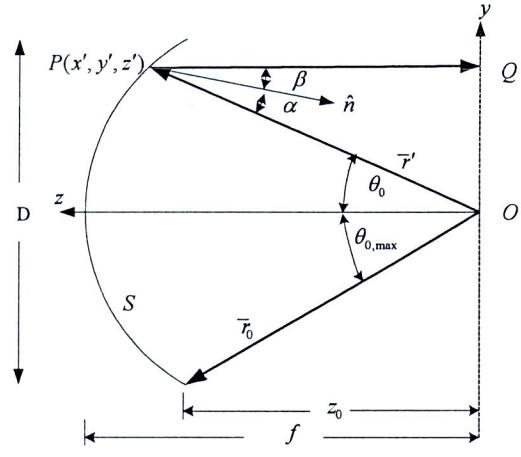


ค. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแถวลำดับกับการสูญเสีย

รูปที่ 3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป

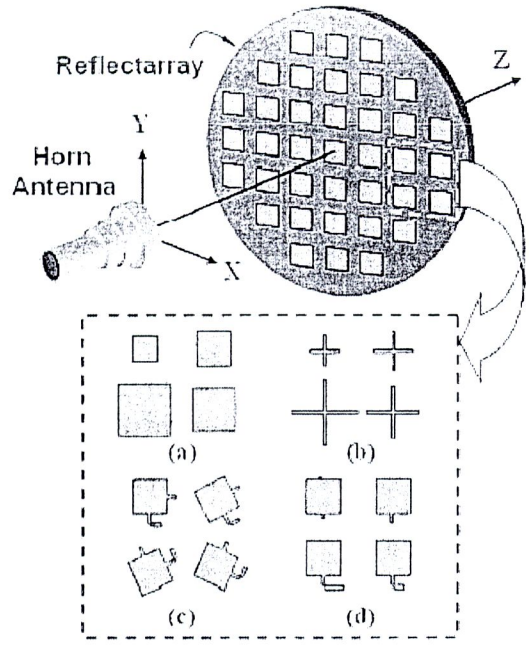


ก.



ข.

รูปที่ 3.2 สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก



รูปที่ 3.3 สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

3.2.1 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก

รูปที่ 3.2 แสดงการแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อน โดยคลื่นเดินทางจากจุดป้อนสัญญาณไปยังตัวสะท้อนพาราโบลิก และสะท้อนกลับไปยังสนามระยะไกล เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$OP + PQ = 2f = \text{ค่าคงที่} \tag{3.1}$$

และหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta_{0,\max}$ กับ f/D ได้

$$\begin{aligned} \theta_{0,\max} &= \tan^{-1}\left(\frac{D/2}{z_0}\right) \\ &= 2\tan^{-1}\left(\frac{D}{4f}\right) \end{aligned} \tag{3.2}$$

เมื่อ f คือ ระยะโฟกัส

$\theta_{0,\max}$ คือ ขนาดมุมสูงสุดที่คลื่นเดินทางออกจากจุดป้อนสัญญาณไปยังตัวสะท้อน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสะท้อนพาราโบลิก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3.2.2 หลักการสะท้อนคลื่นของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

จากสมการ (3.1) สรุปได้ว่า สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อนทำให้คลื่นเดินทางไปยังบริเวณสนามระยะไกลมีเฟสเท่ากัน ไม่ว่าคลื่นจะตกกระทบที่ตำแหน่งใดของตัวสะท้อนก็ตาม แต่ถ้าแทนที่สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิกด้วยสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสติป ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 จะทำให้คลื่นเกิดการประวิงเฟส (Phase Delay) ในสนามระยะไกล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการจัดเฟสแผ่นสะท้อนในสายอากาศแถวลำดับสะท้อน เพื่อชดเชยเฟสดังกล่าว จึงทำให้สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับตัวสะท้อนพาราโบลิก

โดยทั่วไป สายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปใช้หลักการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปหรือแผ่นสะท้อนไดโพลให้มีการประวิงเฟส (Phase Delay) เสมือนตามลักษณะผิวโค้งของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก เราสามารถคำนวณหาการประวิงเฟสเนื่องจากคลื่นเดินทางจากตัวป้อนสัญญาณไปยังสายอากาศแถวลำดับสะท้อน แล้วสะท้อนกลับไปยังระยะสนามระยะไกลได้ดังนี้

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} r = k_0 r \tag{3.3}$$

เมื่อ r คือระยะทางที่คลื่นเดินทาง และ λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศว่าง สำหรับการประวิงเฟสสามารถคำนวณหาได้จากผลต่างระหว่างระยะการแผ่กระจายคลื่นของแผ่นสะท้อนใดๆ กับแผ่นสะท้อนอ้างอิง โดยที่ m และ n คือแผ่นสะท้อนใดๆ ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

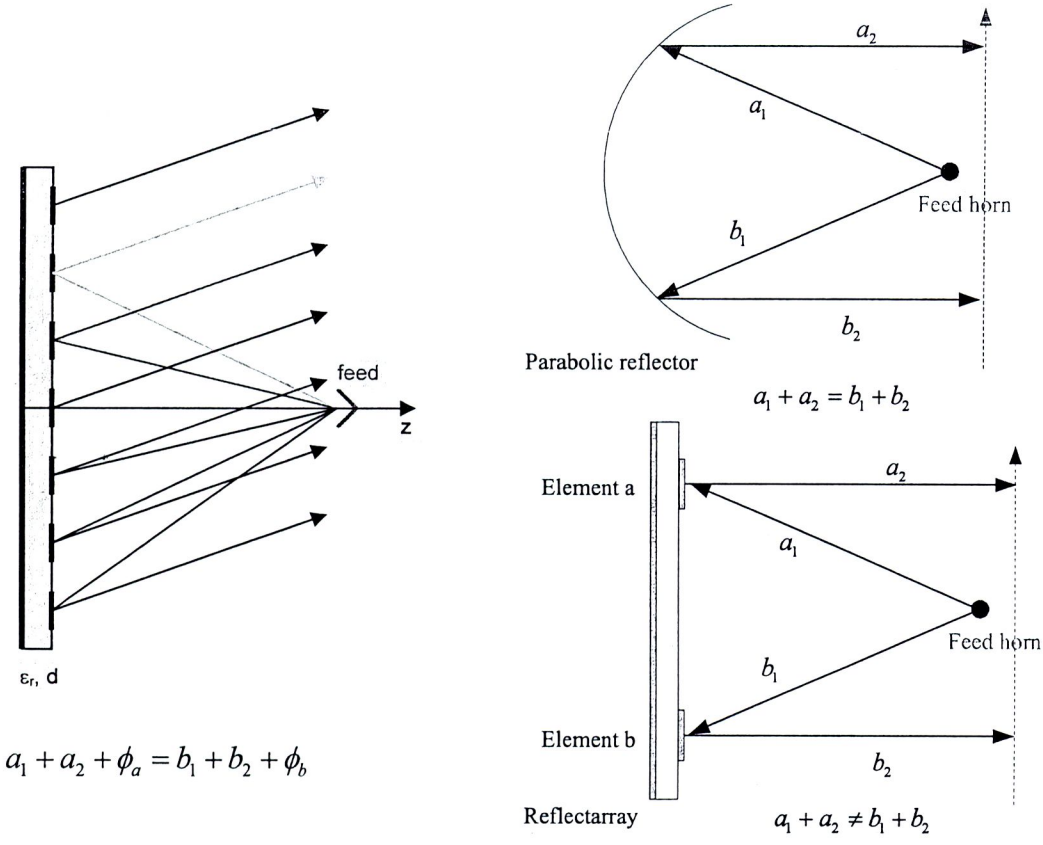
$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_{mn} - \phi_f \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0}\left(r_{mn} - r_f\right) \\ &= k_0 \Delta s \end{aligned} \tag{3.4}$$

ดังนั้นเฟสสะท้อนของแผ่นสะท้อนใดๆ ψ_{mn} คือ

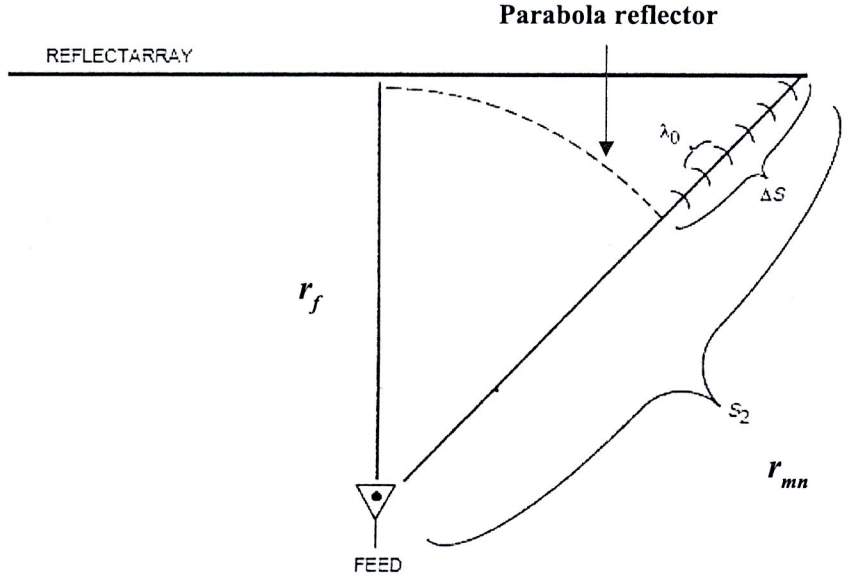
$$\psi_{mn} = \Delta\phi \pm 2\pi N \tag{3.5}$$

เมื่อ $N = 0,1,2,3,...$

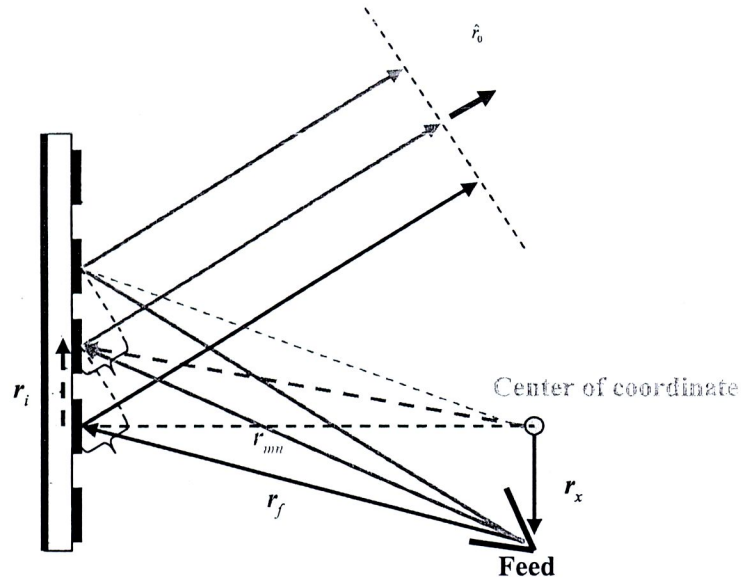
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุด
วันที่ 31 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 250341
เลขเรียกหนังสือ



รูปที่ 3.4 การแผ่กระจายคลื่นในสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลิก
และสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป



รูปที่ 3.5 การประวิงเฟสในสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป



รูปที่ 3.6 การประวิงเฟสเนื่องจากการเลื่อนตัวป้อนสัญญาณและหน้าคลื่น

ถ้าหน้าคลื่น (Wavefront) และตัวป้อนสัญญาณปรับเลื่อนออกจากจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดของสายอากาศแถวลำดับสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เราสามารถหาเฟสสะท้อนได้จาก

$$k_0\left[r_{mn}+\bar{r}_i\cdot\hat{r}_0\right]-\psi_{mn}=2\pi N \tag{3.6}$$

โดยที่

$$\bar{r}_i\cdot\hat{r}_0=md_x\sin\theta\cos\phi+nd_y\sin\theta\sin\phi \tag{3.7}$$

เมื่อ d_x และ d_y คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ และหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta_{0,\max}$ กับ f/D ได้

$$\theta_{0,\max}=\tan^{-1}\left(\frac{D}{2f}\right) \tag{3.8}$$

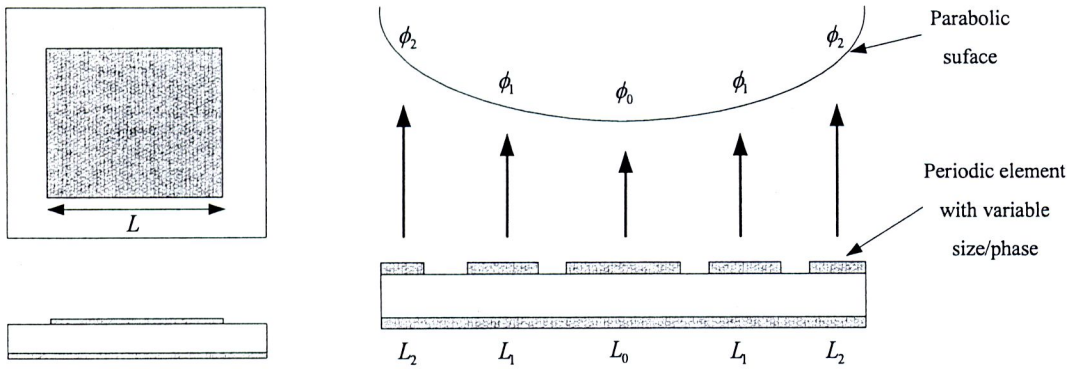
3.3 เทคนิคการออกแบบแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริป

เทคนิคการหาเฟสสะท้อนโดยการออกแบบแผ่นสะท้อนไมโครสตริปด้วยเทคนิคการจัดเฟสที่นิยมนำมาใช้มี 3 วิธีคือ

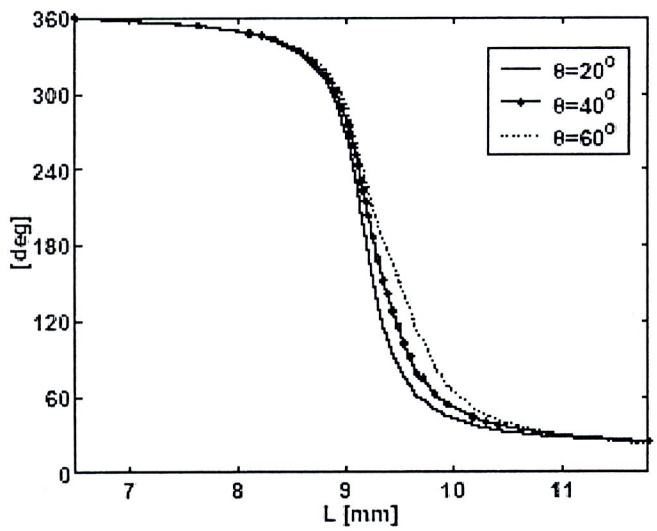
1. การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน
2. การปรับความยาวของสตับ
3. การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

3.3.1 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน

การปรับขนาดของแผ่นสะท้อนใช้หลักการปรับความยาวของแผ่นสะท้อนในด้านที่มีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อความถี่ปฏิบัติการของแผ่นสะท้อนเปลี่ยนจะส่งผลให้การประวิงเฟสในแผ่นสะท้อนเปลี่ยนแปลงด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เฟสสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเราสามารถปรับความยาวของแผ่นสะท้อนได้ไม่เกิน ±5% จากความยาว ณ ความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น ทำให้เฟสสะท้อนไม่ครบ 360° ดังนั้นจึงควรออกแบบการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนร่วมกับเทคนิคอื่น รูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 แสดงการจัดเฟสด้วยการปรับขนาดของแผ่นสะท้อน และความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นสะท้อนกับเฟสสะท้อน ตามลำดับ ซึ่งการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นสะท้อนกับเฟสสะท้อนนี้จะกล่าวถึงในหัวต่อไป



รูปที่ 3.7 การปรับขนาดของแผ่นสะท้อน



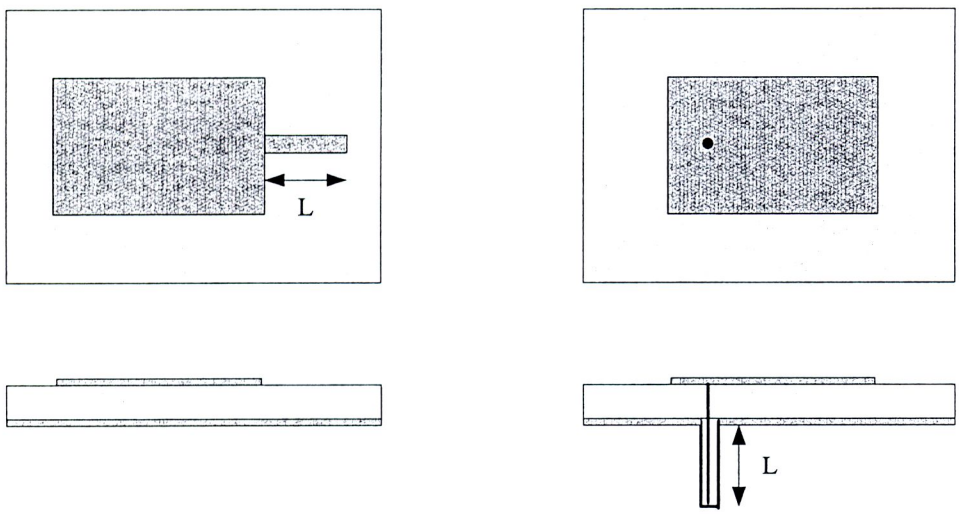
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแผ่นสะท้อนกับเฟสสะท้อน

3.3.2 การปรับความยาวของสตับ

การจัดเฟสด้วยการปรับความยาวของสตับ แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยการปรับความยาวของสตับจะให้ผลของการประวิงเฟสเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.9) เมื่อความยาวของสตับเปลี่ยน จะส่งผลให้การประวิงเฟสของแผ่นสะท้อนเปลี่ยน แต่สายอากาศแถวลำดับสะท้อนที่มีการจัดเฟสวิธีนี้จะมีการสูญเสียเนื่องจากตัวสตับ โดยสตับที่นำมาใช้มี 3 แบบคือ

1. สตับไมโครสตริปที่ต่อกับด้านข้างของแผ่นสะท้อน (Edge of Patch)
2. สตับไมโครสตริปที่ต่อแบบการเชื่อมร่วมอะเพอร์เจอร์ (Aperture Coupled Patch)
3. สตับโคแอกเชียล

$$\psi_{mn} = 2 \times Electrical\ length \tag{3.9}$$



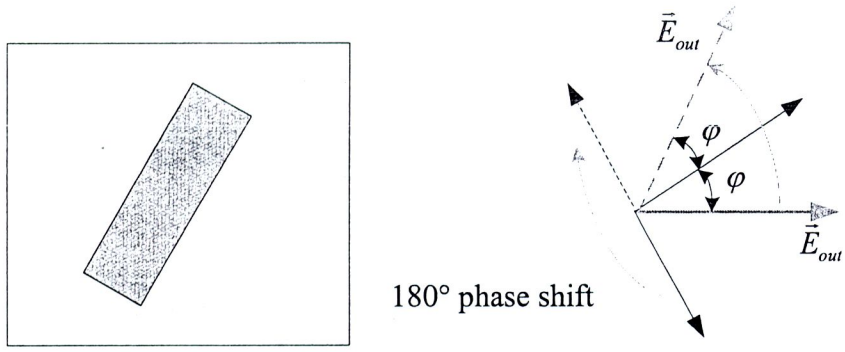
ก. สตับแบบไมโครสตริป ข. สตับแบบโคแอกเชียล

รูปที่ 3.9 การปรับความยาวของสตับ

3.4.3 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

การจัดเฟสด้วยการปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมุมของแผ่นสะท้อนสามารถปรับได้ 180° และการประวิงเฟสจะมีค่าเป็นสองเท่าของมุมของแผ่นสะท้อน ดังสมการ (3.10) หลักการจัดเฟสวิธีนี้เหมาะสำหรับสายอากาศแถวลำดับที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลม

$$\psi_{mn} = 2 \times Rotation\ of\ \ patch \tag{3.10}$$

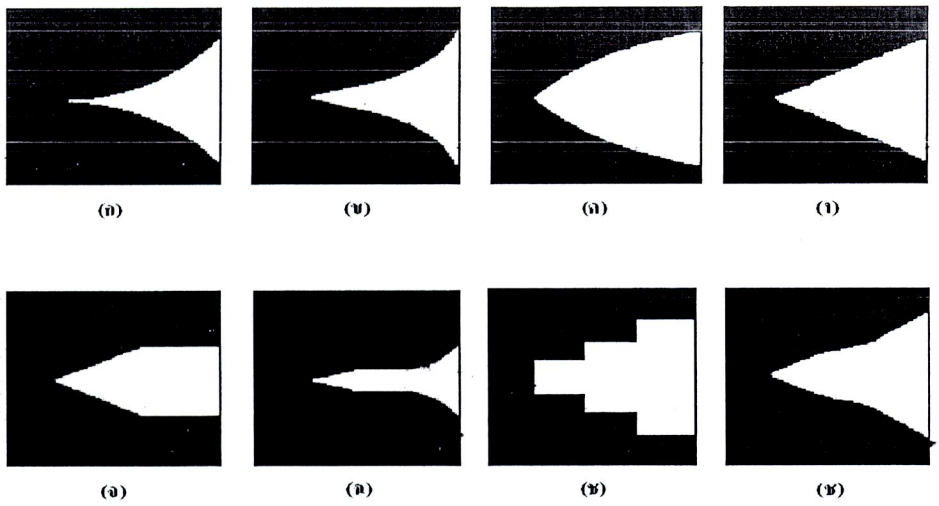


รูปที่ 3.10 การปรับมุมการวางของแผ่นสะท้อน

นอกจากการจัดเฟสแผ่นสะท้อนทั้ง 3 วิธีนี้ ยังมีการจัดเฟสแบบอื่น ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เช่น การปรับร่องแผ่นสะท้อน และการใช้วาแร็กเตอร์ไดโอด เป็นต้น

3.4 ตัวป้อนสัญญาณ

สำหรับงานวิจัยนี้เน้นการคิดค้นและพัฒนาวิธีการออกแบบตัวป้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปลำคลื่นกว้าง [19] เพื่อใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายที่มีพื้นที่ครอบคลุมห้องขนาดใหญ่ โดยเลือกสายอากาศเส้นร่องแบบเรียวเป็นตัวป้อนกำลังงาน ซึ่งสายอากาศเส้นร่องแบบเรียวเป็นสายอากาศไมโครสตริปชนิดหนึ่งที่มีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น มีโครงสร้างที่ง่าย น้ำหนักเบา ออกแบบ สร้างและติดตั้งเพื่อใช้งานได้ง่าย และสามารถใช้งานร่วมกับ MICs (Microwave Integrated Circuits) ได้ เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นร่องแบบเรียว จึงเหมาะสำหรับการใช้งานซึ่งต้องการความถี่ปฏิบัติการที่มีความกว้างแถบที่กว้าง สายอากาศเส้นร่องแบบเรียว มีหลายรูปแบบ แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งลักษณะของร่องแบบเรียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบเส้นโค้ง และแบบเส้นตรง และสามารถแบ่งย่อยได้อีก 8 ประเภทคือ เส้นโค้งแบบเอกโพแนนเชียล (Exponential Tapered Slot Antenna or Vivaldi antenna) เส้นโค้งสัมผัส (Tangential Tapered Slot Antenna) เส้นโค้งพาราโบลิค (Parabolic Tapered Slot Antenna) เส้นตรง (Linear Tapered Slot Antenna) เส้นตรงต่อเนื่อง (Linear-constant Tapered Slot Antenna) เส้นโค้งแบบเอกโพแนนเชียลต่อเนื่อง (Exponential-constant Tapered Slot Antenna) ขั้นบันไดต่อเนื่อง (Step-constant Tapered Slot Antenna) และเส้นตรงไม่ต่อเนื่อง (Broken-linear Tapered Slot Antenna) โดยสายอากาศเส้นร่องแบบเรียวมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่ามีลำคลื่นแผ่กระจายออกมาที่บริเวณความกว้างของร่องเท่านั้น



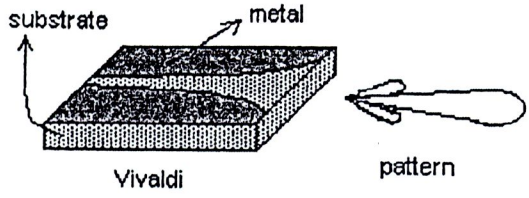
รูปที่ 3.11 สายอากาศร่องแบบเรียวรูปแบบต่าง ๆ

(ก) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียล (ข) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งสัมผัส

(ค) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งพาราโบลิก (ง) ร่องเรียวแบบเส้นตรง

(จ) ร่องเรียวแบบเส้นตรงคงที่ (ฉ) ร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลคงที่

(ช) ร่องเรียวแบบขั้นบันไดคงที่ (ซ) ร่องเรียวแบบเส้นตรงไม่ต่อเนื่อง

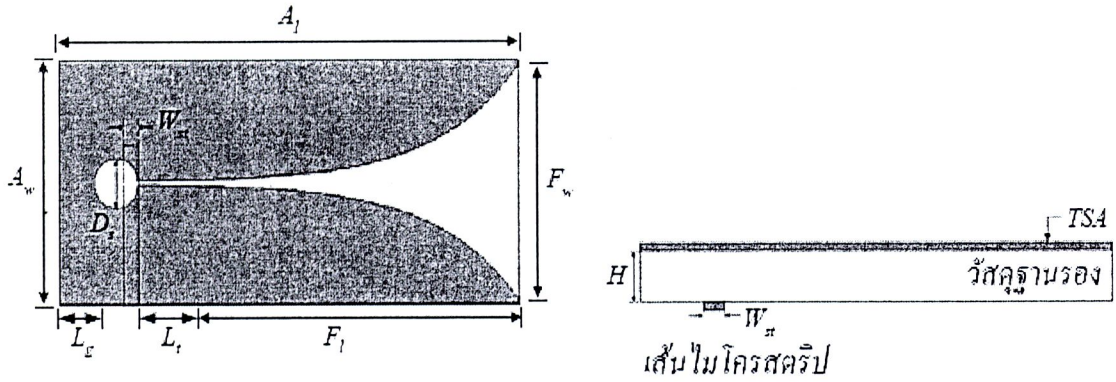


รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศเส้นร่องแบบเรียว

3.4.1 โครงสร้างของสายอากาศร่องแบบเรียว

สายอากาศร่องแบบเรียวนั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบดังได้กล่าวในข้างต้น โดยทุกรูปแบบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมือนกัน จะแตกต่างกันก็เพียงแต่พื้นที่ของการแผ่พลังงานเท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลในการออกแบบสายอากาศร่องแบบเรียวรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีเพียงสายอากาศร่องแบบเรียวที่เป็นร่องเรียวแบบเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียลและร่องเรียวแบบเส้นตรงเท่านั้นที่ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง[25] งานวิจัยนี้ได้นำสายอากาศร่องแบบเรียวที่มีรูปร่างของร่องเรียวแบบโค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียลหรือสายอากาศวิวอลดิ สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างลำคลื่นกับมุมการเปิดที่ชัดเจนและแบบรูปของอิลิเมนต์จะมีจุดศูนย์ (null) น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับร่องเรียวแบบเส้นตรง [24] รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างของสายอากาศ

ร่องแบบเรียว ซึ่งร่องเรียวที่เป็นโค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียลถูกสร้างบนแผ่นโลหะและมีวัสดุฐานรองคั่นกลางระหว่างร่องรียวและเส้นป้อนไมโครสตริป ซึ่งวัสดุฐานรองดังกล่าวมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ε_r และมีความหนา H



(ก)ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

รูปที่ 3.13 โครงสร้างสายอากาศร่องแบบเรียว

(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านบน

3.4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศร่องแบบเรียว

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.13 สามารถหาได้จาก [24] เมื่อ

A_l คือ ความยาวของสายอากาศ (antenna length) ควรมีค่ามากกว่าความยาวคลื่น

A_w คือ ความกว้างของสายอากาศ (antenna width) ควรมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด

F_l คือ ความยาวของร่อง (flared slotline length) ควรมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด

F_w คือ ความกว้างของร่อง (flared slotline width) ควรมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำสุด

D_s คือ เส้นผ่าศูนย์กลางวงกลมของสตับ (diameter of circular slot stub) ควรมีค่าเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นของร่อง

L_t คือ ความยาวของส่วนที่เป็นเส้นตรงของร่อง (length of uniform section of slotline)

L_g คือ ความยาวชดเชยด้านหลังสตับ (backwall offset)

W_{st} คือ ความกว้างของเส้นไมโครสตริป (microstrip line width)

H คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง (substrate height)

เราสามารถคำนวณหาสมการความโค้งเอกซ์โพเนนเชียลได้จากสมการ

$$y = c_1 e^{RZ} + c_2 \tag{3.11}$$

โดยที่

$$c_1 = \frac{y_1 - y_2}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}$$

และ

$$c_2 = \frac{y_1 e^{Rz_2} - y_2 e^{Rz_1}}{e^{Rz_2} - e^{Rz_1}}$$

เมื่อ

$P_1(y_1 - z_1)$ คือ จุด $(y_1 - z_1)$ จุดแรกที่เริ่มโค้งเอกซ์โพเนนเชียล

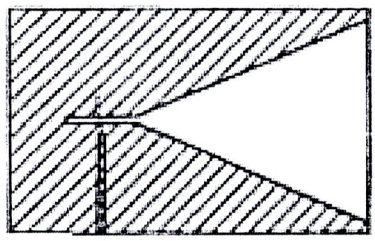
$P_2(y_2 - z_2)$ คือ จุด $(y_2 - z_2)$ จุดสุดท้ายของเส้นโค้งเอกซ์โพเนนเชียล

3.4.3 วิธีการป้อนกำลังงาน

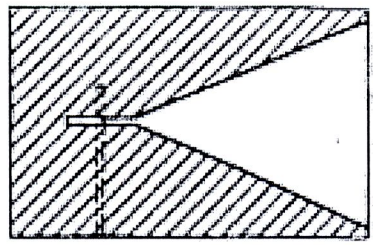
โดยส่วนมากแล้วสายอากาศร่องแบบเรียวจะมีลักษณะของร่อง (slotline) ที่มีการแผ่ออก ทำให้การป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียวต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างร่องและการส่งผ่านไปยังตัวกลาง (transmission media) ดังนั้นร่องของสายอากาศจะต้องเชื่อมต่อกับจุดป้อนกำลังงานของสายอากาศ สำหรับวิธีในการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศร่องแบบเรียวนั้นมีด้วยกัน 7 วิธี ได้แก่ (1) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นแกนร่วม (coaxial line feed) (2) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip line feed) (3) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบเดียวกัน (conventional coplanar waveguide feed หรือ CPW feed) (4) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบกราวด์เดียวกัน (ground conventional coplanar waveguide feed หรือ GCPW feed) (5) การป้อนกำลังงานด้วยท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบกราวด์เดียวกันโดยมีตัวนำด้านหลังที่มีขอบเขต (conductorbackedfinite ground-plane coplanar waveguide feed หรือ FCPW feed) สามารถทำการเชื่อมต่อได้ 2 แบบคือ ให้กำลังงานเชื่อมต่อจากสตริปไปยังร่องของสายอากาศ (strip-to-slot) หรือแบบสตริปศูนย์กลาง (center-strip) และให้กำลังงานเชื่อมต่อจากร่องไปยังร่องของสายอากาศ (slot-toslot)หรือแบบร่อง (notch) (6) การป้อนกำลังงานด้วยไมโครสตริปไปยังจุดเชื่อมไมโครสตริป(microstrip-to-coupled microstrip feed) และ (7) การป้อนกำลังงานด้วยเส้นสตริป (stripline feed) แสดงดังรูปที่ 3.14

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ทั้งการออกแบบและการแมตช์สายอากาศ รูปที่ 3.15 แสดงการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปไปยังร่อง

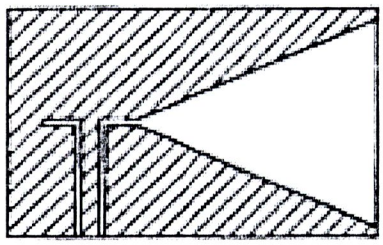
ของสายอากาศ โดยที่ λ_s คือ ความยาวคลื่นของร่อง (slot wavelength) และ λ_m คือ ความยาวคลื่นของไมโครสตริป (microstrip wavelength)



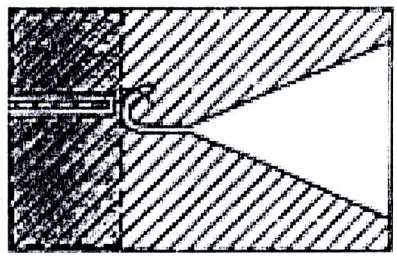
(ก) เส้นแกนร่วม



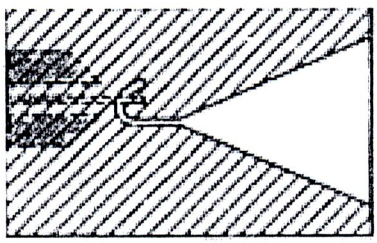
(ข) เส้นไมโครสตริป



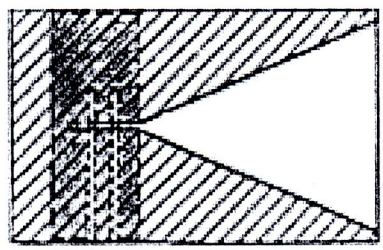
(ค) CPW



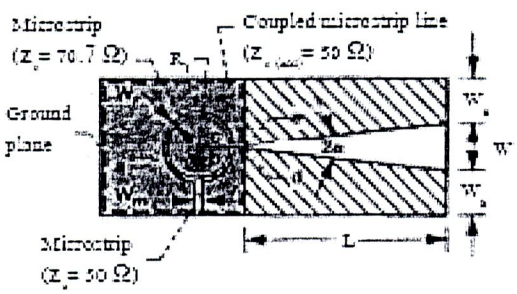
(ง) GCPW



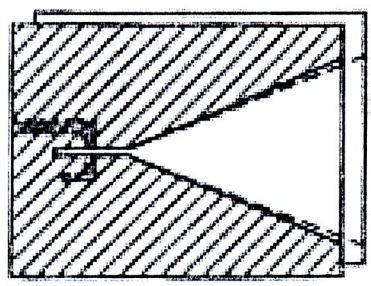
(จ) FCPW/center-strip



(ฉ) FCPW/notch

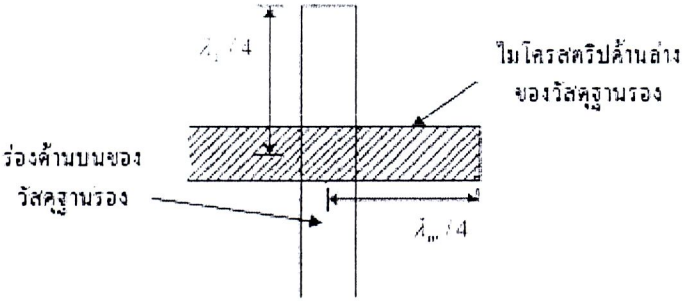


(ช) ไมโครสตริปไปยังจุดเชื่อม



(ซ) เส้นสตริป

รูปที่ -3.14 เทคนิคการป้อนกำลังงานให้สายอากาศร่องแบบเรียว



รูปที่ 3.15 การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3.5 สรุป

การออกแบบสายอากาศร่องแบบเรียวสำหรับทำหน้าที่เป็นตัวป้อนของสายอากาศแถวลำดับสะท้อนไมโครสตริปจะวิเคราะห์จากสมการ (3.11) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป