

## บทที่ 4 การสร้างชุดทดสอบและผลการทดลอง

### 4.1 กล่าวนำ

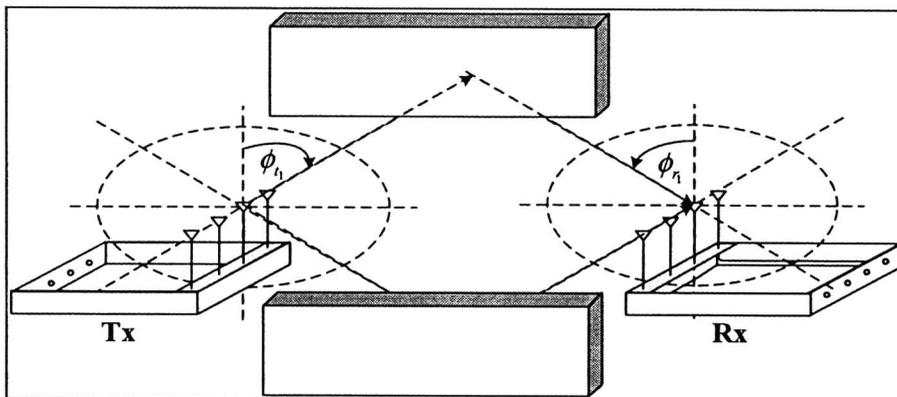
เนื้อหาก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานในการสื่อสารในระบบโมเด็ม โดยกล่าวถึงทฤษฎีความจุช่องสัญญาณ เทคนิคและวิธีการต่างๆ ทั้งการ และวิธีการด้วยกัน 2 วิธีคือวิธีการประมวลผลแอมพลิจูดและการประมวลผลเฟสเชิงมุม จากที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ จะเห็นว่าการประมวลผลเฟสเชิงมุม ระบบสามารถให้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าการประมวลผลแอมพลิจูด และวิธีการประยุกต์ใช้บัทเลอร์ เมทริกซ์ในการประมวลผลเฟสเชิงมุม เพื่อความสะดวกในการเข้าและถอดรหัส เนื่องจากบัทเลอร์ เมทริกซ์ มีความสามารถในการเข้าและถอดรหัสได้เพียงใส่ บัทเลอร์ เมทริกซ์ที่ภาคส่งและภาครับ เพราะมีมุมที่ใช้ในการปรับปรับเฟส ดังนั้นบัทเลอร์ เมทริกซ์ จึงมีความสะดวกและรวดเร็วในการสร้าง และทดสอบ อย่างไรก็ตามผลบัทเลอร์ เมทริกซ์ สามารถใช้ได้กับชุดสายอากาศที่มีภาคส่ง 4 ดัน และ ภาครับ 4 ดันเช่นกัน โดยองค์ประกอบของอุปกรณ์ที่ภาครับและภาคส่งเป็นชนิดเดียวกัน เพื่อให้ช่องสัญญาณเป็นไปตามทฤษฎีและการศึกษาสมรรถนะช่องสัญญาณพิจารณาด้วยการจัดสรรกำลังส่งสัญญาณที่เท่าๆกันในสายอากาศแต่ละดัน ช่องสัญญาณที่วัดได้นั้นสามารถนำมาเพื่อใช้ในการหาความจุช่องสัญญาณในแต่ละวิธี โดยช่องสัญญาณที่ได้จากการประมวลผลเฟสเชิงมุมและโดเมนแอมพลิจูดใช้การวัดที่เวลา และสถานที่เดียวกัน ในจุดเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้ แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือการประมวลผลเฟสเชิงมุมจะมีส่วนของบัทเลอร์ เมทริกซ์ เข้ามาแทรกที่ภาคส่งและภาครับของชุดสายอากาศ การใช้วิธีการของบัทเลอร์ เมทริกซ์ ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถลดความซับซ้อนรวมถึงขนาดและต้นทุนสำหรับระบบการสื่อสารแบบโมเด็มได้ ซึ่งเนื้อหาสำคัญในบทนี้ เป็นการกล่าวถึงการนำวิธีการการประมวลผลเฟสเชิงมุมมาประยุกต์ใช้แทนการประมวลผลแอมพลิจูด สำหรับผลการทดลองได้แสดงอยู่ในรูปของความจุช่องสัญญาณ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองแบบ

## 4.2 การทดสอบระบบไมโมด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่แล้ว ระบบไมโมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความจุช่องสัญญาณได้เมื่อเปลี่ยนวิธีการจากการประมวลผลแถวลำดับมาเป็นการประมวลผลเมนเชิงมุมและเพื่อความสะดวกในการสร้าง และดำเนินการ สามารถนำบทเลอว์ เมทริกซ์ มาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลเชิงมุมได้

### 4.2.1 วิธีการประมวลผลแถวลำดับ

สำหรับวิธีการนี้ เป็นการใช้สายอากาศส่งและสายอากาศรับ ภาคละ 4 ต้น สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งและรับสัญญาณ มีการจำลองมุมที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณ จำลองระยะห่างระหว่างสายอากาศ ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 แสดงทิศทางการส่งและรับข้อมูลของระบบไมโม

จากรูป ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \sum_i a_i^b \mathbf{e}_r(\Omega_{ri}) \mathbf{e}_t(\Omega_{ti})^H \quad (4-1)$$

โดย

$$a_i^b = a_i \sqrt{N_t N_r} \exp\left(\frac{-j2\pi d_i}{\lambda_c}\right) \quad (4-2)$$

$$\mathbf{e}_t(\Omega_{ti}) = \frac{1}{\sqrt{M_t}} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_t\Omega_{ti})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_t - 1)(2\pi\Delta_t\Omega_{ti})] \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\mathbf{e}_r(\Omega_{ri}) = \frac{1}{\sqrt{M_r}} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp[-j(2\pi\Delta_r\Omega_{ri})] \\ \vdots \\ \exp[-j(M_r - 1)(2\pi\Delta_r\Omega_{ri})] \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

โดย

$d_i$  คือ ระยะทางระหว่างภาคส่งๆ ไปยังภาครับในแต่ละทิศการเดินทางของคลื่น

$\mathbf{e}_t(\Omega_{ti})$  และ  $\mathbf{e}_r(\Omega_{ri})$  คือ เวกเตอร์ใช้แทนการกระจายตัวในแต่ละทิศทาง  $\Omega$

$\lambda_c$  คือ ความยาวคลื่นของความถี่กลาง

$\Delta_t$  และ  $\Delta_r$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่นอลล์แมลโลซ์

ดังนั้น ความจุช่องสัญญาณในระบบ โมโมที่ใช้การประมวลผลเมนแวลล่าดับ แสดงได้โดย

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_N M_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \quad (4-5)$$

โดยที่ (4-5) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ เมื่อ  $\mathbf{I}_{M_r}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ ขนาด  $M_r \times M_r$   $\mathbf{H}$  คือ ช่องสัญญาณ ขนาด  $M_r \times M_t$   $\mathbf{H}^H$  คือ การทรานสโพสคอนจูเกตของเมทริกซ์ช่องสัญญาณ  $\mathbf{H}$  และ  $\frac{P_t}{P_N}$  คือ อัตราส่วนสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน

#### 4.2.2 วิธีการประมวลผลเชิงมุม

จากทฤษฎีการประมวลผลเชิงมุม ช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นภาคส่งและภาครับจะมีข้อมูลที่ใช้ในการเข้าและถอดรหัสจากเมตริกซ์ มีเมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด  $M_t \times M_t$  ที่ภาคส่ง  $\mathbf{U}_t$  และเมทริกซ์ยูนิแทรีขนาด  $M_r \times M_r$  ที่ภาครับ  $\mathbf{U}_r$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\mathbf{U}_t = \frac{1}{\sqrt{M_t}} \exp \left( \frac{-j2\pi kl}{M_t} \right) \quad k, l = 0, 1, \dots, M_t - 1 \quad (4-6)$$



และ

$$\mathbf{U}_r = \frac{1}{\sqrt{M_r}} \exp\left(\frac{-j2\pi kl}{M_r}\right) \quad k, l = 0, 1, \dots, M_r - 1 \quad (4-7)$$

เมื่อแปลงจากโดเมนแถวลำดับให้เป็นโดเมนเชิงมุมจะได้

$$\mathbf{H}^a = \mathbf{U}_r^H \mathbf{H} \mathbf{U}_t \quad (4-8)$$

เมื่อใช้ช่องสัญญาณที่มีการประมวลผลเชิงมุม จะได้ความจุช่องสัญญาณดังนี้

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_N M_t} \mathbf{H}^a \mathbf{H}^{aH} \right) \quad (4-9)$$

เมื่อ  $\mathbf{H}^a$  คือ เมทริกซ์ช่องสัญญาณที่ใช้การประมวลผลเชิงมุม ขนาด  $M_r \times M_t$

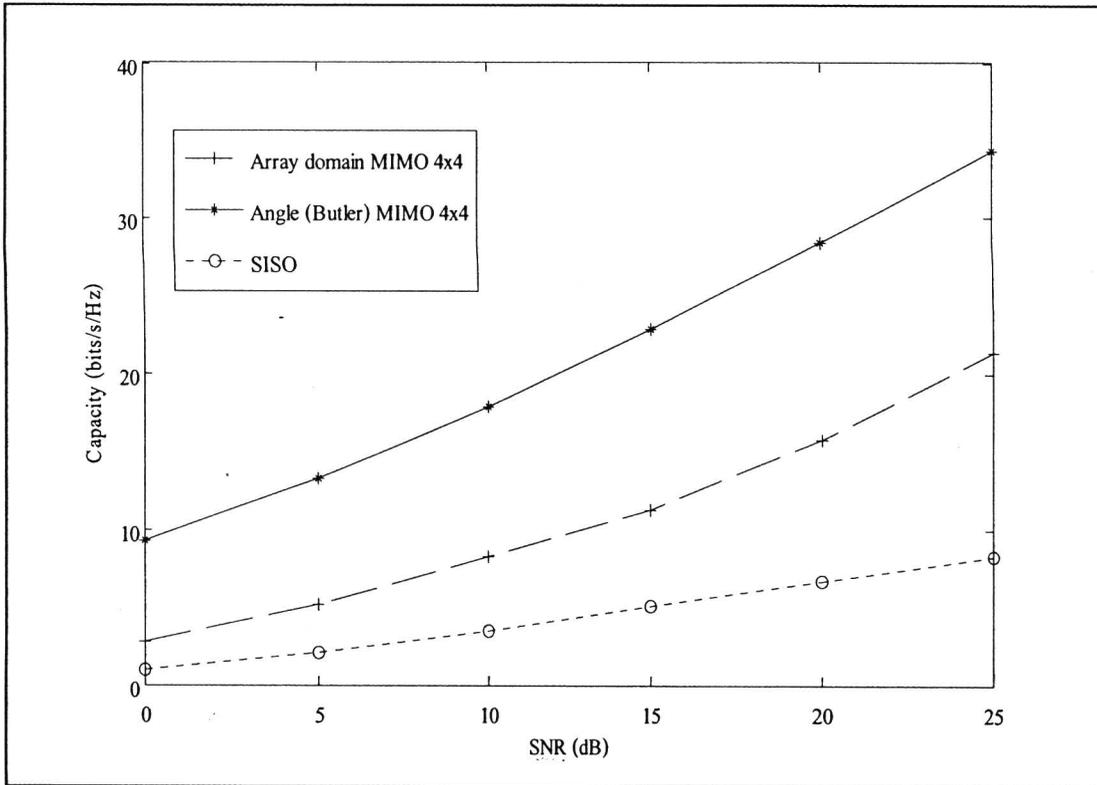
จากการประมวลผลเชิงมุมสามารถทำให้เป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ โดยการนำบัทเลอร์ เมทริกซ์ มาประยุกต์ให้ช่องสัญญาณใหม่ จากการนำช่องสัญญาณที่ได้จาก ประมวลผลแถวลำดับมาคูณเข้ากับเมทริกซ์ยูนิแทรีดังนี้

$$\mathbf{H}^b = \mathbf{B}_r^H \mathbf{H} \mathbf{B}_t \quad (4-10)$$

และจะได้ความจุช่องสัญญาณในระบบโมโมเมื่อประยุกต์ใช้บัทเลอร์ เมทริกซ์

$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{P_N M_t} \mathbf{H}^b \mathbf{H}^{bH} \right) \quad (4-11)$$

เมื่อนำพารามิเตอร์จากสมการ (4-2), (4-3) และ (4-4) มาหาช่องสัญญาณที่เกิดจากการประมวลผลแถวลำดับ จะได้สมการ (4-1) แล้วนำสมการนี้ไปจำลองแบบหาช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นในโปรแกรมเมทแลป แล้วหาความจุช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจากสมการ (4-5) และเปรียบเทียบความจุช่องสัญญาณที่ได้กับความจุช่องสัญญาณที่เกิดจากการประมวลผลเชิงมุม (4-11) เมื่อประยุกต์ใช้บัทเลอร์ เมทริกซ์ และเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้สายอากาศรับและส่งภาคละ 1 ดันจะได้กราฟเปรียบเทียบดังนี้



รูปที่ 4-2 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4-2 จะเห็นว่าระบบโมโมเมื่อใช้สายอากาศส่งและรับภาคละ 4 ต้น ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เมื่อใช้ที่ความถี่ 2.4 GHz และกำหนดให้มุมส่งและมุมรับ มีการกระจายรอบทิศทาง 360 องศา จะได้การประมวลผลเชิงมุมเมื่อประยุกต์ใช้บัทเลอร์เมทริกซ์ให้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าการประมวลผลแถวลำดับ และการใช้สายอากาศส่งและรับภาคละ 1 ต้น (SISO) นั้นจะให้ความจุช่องสัญญาณที่น้อยที่สุด

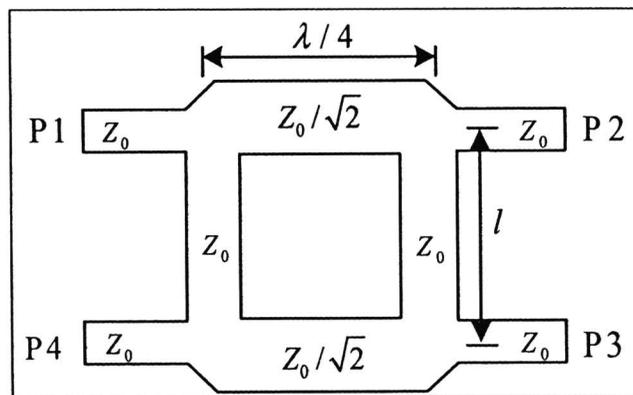
### 4.3 การออกแบบ สร้าง และวัดผลบัพทเลอร์ เมทริกซ์

#### 4.3.1 การออกแบบบัพทเลอร์ เมทริกซ์

วงจรถ่ายรูปลำคลื่นแบบบัพทเลอร์ เมทริกซ์ นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการออกแบบ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (Hybrid coupler 90°) 4 ตัว, ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45°) 2 ตัว

คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°)

คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา จะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมระหว่างพอร์ต P2 และพอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และ P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ตที่ P4 (พอร์ต โคคเคียว)



รูปที่ 4-3 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากรูปได้ดังต่อไปนี้

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left( \frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{เมื่อ } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} & \text{เมื่อ } W/d \geq 1 \end{cases} \quad (4-12)$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{เมื่อ } W/d \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{เมื่อ } W/d > 2 \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (4-14)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4-15)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (4-16)$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (4-17)$$

$$l = \frac{90^\circ (\pi/180^\circ)}{\sqrt{\epsilon_e} k_0} \quad (4-18)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{f} \quad (4-19)$$

กำหนดค่า  $Z_0 = 50\Omega$   $\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = 35.355\Omega$   $\epsilon_r = 4.8$   
 $f = 2.4\text{GHz}$   $d = 1.67 \text{ mm.}$   $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการดังกล่าวจะได้ดังต่อไปนี้

-ที่  $Z_0$        $A=1.584$       นำค่า  $A$  ที่ได้แทนลงในสมการ (4-13) ได้  
 $W/d = 1.792 \leq 2$     เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นจะได้ค่า  $W$  เท่ากับ  
 $W = 2.992 \text{ mm.}$

-ที่  $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$        $A=1.169$   
 $W/d = 3.0799 > 2$     ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่  $W/d < 2$  จึงหาค่า  $B$

$$B = 7.645$$

$$W/d = 3.0807 \quad \text{เป็นไปตามเงื่อนไข } W/d > 2$$

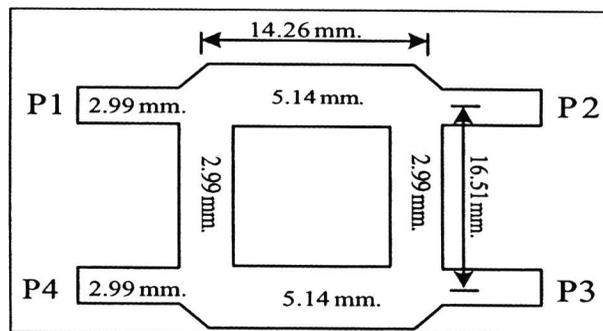
$$\therefore W = 5.144 \text{ mm.}$$

$$\epsilon_r = 3.585 \text{ mm.}$$

$$k_0 = 50.256 \text{ m}^{-1}.$$

$$l = 16.51 \text{ mm.}$$

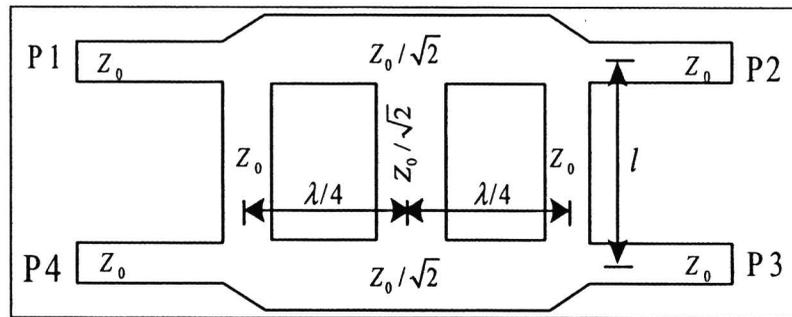
$$\therefore \frac{\lambda}{4} = 14.2635 \text{ mm.}$$



รูปที่ 4-4 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่ออกแบบเสร็จ

ตัวไขว้สัญญาณ (crossover)

ตัวไขว้สัญญาณเป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกัน โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความต้านทานระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็ออกพอร์ต P3 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็ออกพอร์ต P2 ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 4-5 จะเห็นได้ว่าตัวไขว้สัญญาณจะมีรูปร่างคล้ายกับตัวคัปเปอร์ 2 ตัวมาต่อรวมกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาต่อไปนี้

-ที่  $Z_0$                        $A = 1.584$                       นำค่า  $A$  ที่ได้แทนลงในสมการ (4-13) ได้ค่า  $W$  เท่ากับ  
 $W = 2.992 \text{ mm.}$

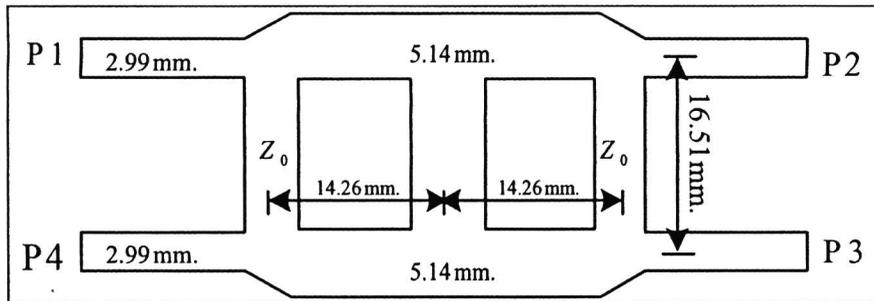
-ที่  $Z_0/\sqrt{2}$                        $A = 1.169$   
 $W/d = 3.0799 > 2$     ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่  $W/d < 2$  จึงหาค่า  $B$

$B = 7.645$   
 $W/d = 3.0807$     เป็นไปตามเงื่อนไข  $W/d > 2$   
 $\therefore W = 5.144 \text{ mm.}$

-ที่  $2Z_0/\sqrt{2}$                        $W = 5.144 \text{ mm.}$   
 $2W = 5.144 \times 2 = 10.288 \text{ mm.}$   
 $\epsilon_e = 3.585$   
 $k_0 = 50.256 \text{ m}^{-1}.$

$$l = 16.51 \text{ mm.}$$

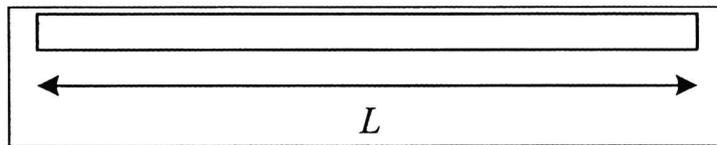
$$\therefore \lambda/4 = 14.2635 \text{ mm.}$$



รูปที่ 4-6 ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบเสร็จ

ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifter 45°)

การคำนวณค่าตัวเลื่อนเฟส 45 องศา จะได้จากผลการคำนวณออกแบบของตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา สามารถทำให้ทราบค่าของ  $\lambda$  เนื่องจากใช้วัสดุในการสร้างและความถี่เดียวกัน



รูปที่ 4-7 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

จากสมการ  $\theta = \frac{360^\circ l}{\lambda}$

โดยเราทราบค่า  $\theta = 45^\circ$

$$\lambda = 57.054 \text{ mm.}$$

ทำการหาค่า  $L$  โดยแทนค่า  $\theta$  และ  $\lambda$  ในสมการ จะได้

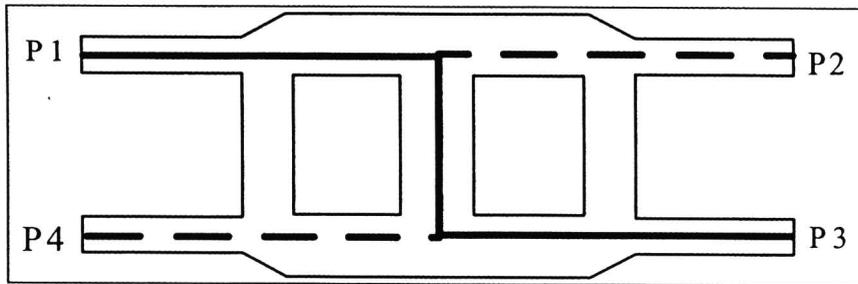
$$L = \frac{\theta \times \lambda}{360^\circ}$$

จะได้

$$L = \frac{45 \times 57.054}{360^\circ}$$

$$L = 7.13 \text{ mm.}$$

โดยการสร้างรวมในวงจรมันจะเป็นการสร้างโดยการนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 ในการสร้างเฟสด้านล่างและนำค่าความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ในการสร้างเฟสด้านบน เพื่อให้มีการเพิ่มเฟสโดยเส้นทางของตัวไขว้สัญญาณดังรูป



รูปที่ 4-8 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

- (ก) เส้นทึบเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับ พอร์ต P3
- (ข) เส้นประเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2

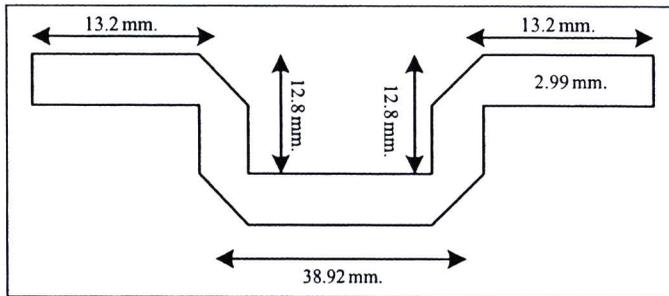
จากรูปที่ 4-8 ความยาวระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 มีค่าเท่ากับ  $13.2 + 12.8 + 38.92 + 12.8 + 13.2 = 90.92$  mm. ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3 มีความยาวเท่ากับ

$$L = 90.92 + 7.13 = 98.05 \text{ mm.} \quad (4-20)$$

และความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 รวมกับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45° ภายในโครงข่าย มีค่าเท่ากับ 98.05 mm. เนื่องจากมีความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคดงอขึ้นโดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45° ภายในโครงข่าย ลบออกจาก ค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45° ภายในโครงข่ายสามารถ

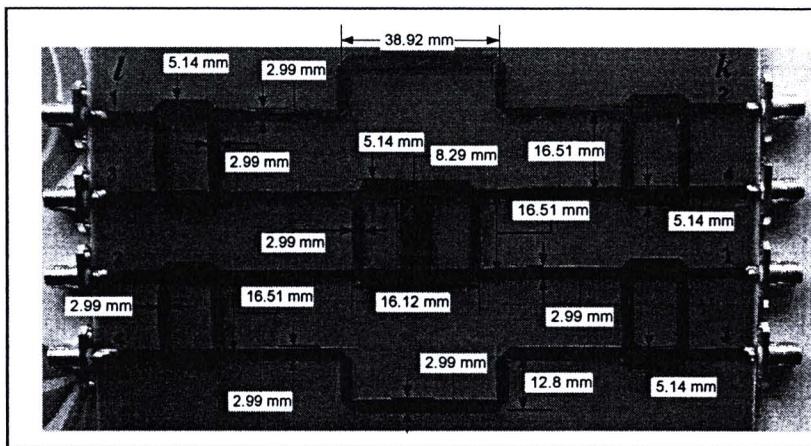
เชื่อมต่อได้แล้ว ค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงาม โดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ ดังรูปที่ 4-9 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้



รูปที่ 4-9 ค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายที่ออกแบบเสร็จ

#### 4.3.2 การสร้างบัทเลอร์ เมทริกซ์

เมื่อได้พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของบัทเลอร์ เมทริกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นี้มาสร้างโครงข่ายก่อบรูปลวดคลื่นบัทเลอร์ เมทริกซ์ โดยใช้แผงลายวงจร (FR4) แล้วทำการเขียนแบบโดยโปรแกรมออโตแคด (AutoCAD) ในการสร้างลายวงจร จากนั้นทำการตัด แล้วนำไปกัดแผงลายวงจร จะได้ โครงข่ายก่อบรูปลวดคลื่นบัทเลอร์ เมทริกซ์ ออกมา ทำเช่นนี้อีก 1 แผ่น เพื่อใช้สำหรับวงจรภาครับและภาคส่ง โดยโครงข่ายก่อบรูปลวดคลื่นบัทเลอร์ เมทริกซ์ ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แสดงได้ดังนี้

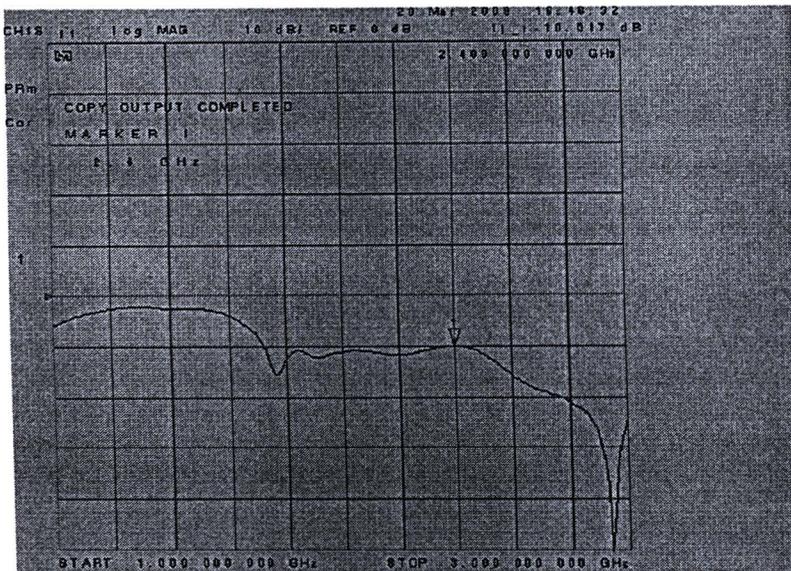


รูปที่ 4-10 โครงข่ายก่อบรูปลวดคลื่นบัทเลอร์ เมทริกซ์ที่สร้างจากการออกแบบ

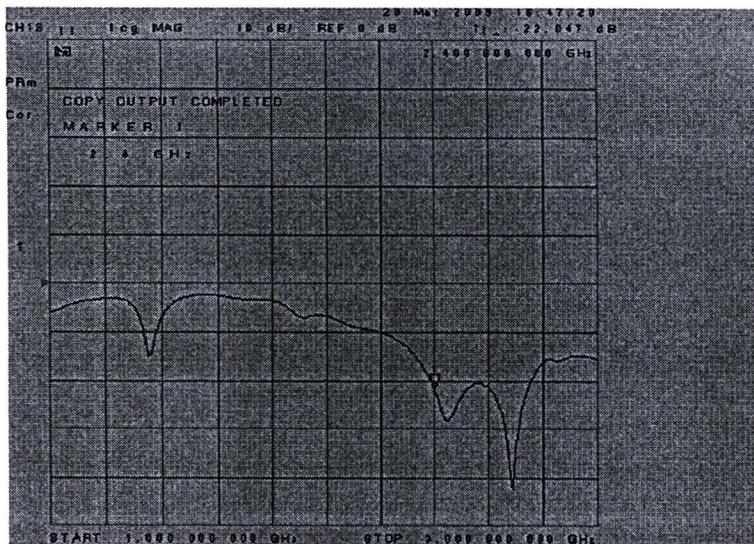
### 4.3.3 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์จากบทเลอร์ เมทริกซ์

ผลการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) วัดที่ความถี่การออกแบบคือ 2.4 GHz ได้ผลการทดสอบดังนี้

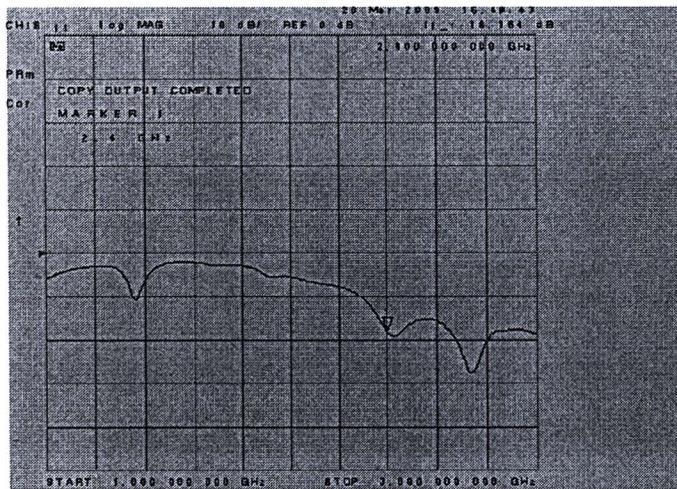
ผลการทดสอบค่าการไหลของพลังงาน ( $S_{11}$ )



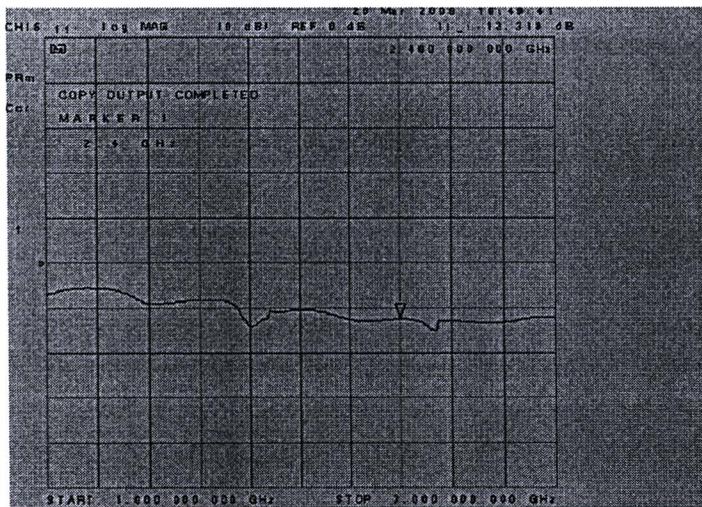
รูปที่ 4-11 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต E1 ( $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ  $-10.017$  dB)



รูปที่ 4-12 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E2 ( $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ  $-22.047$  dB)



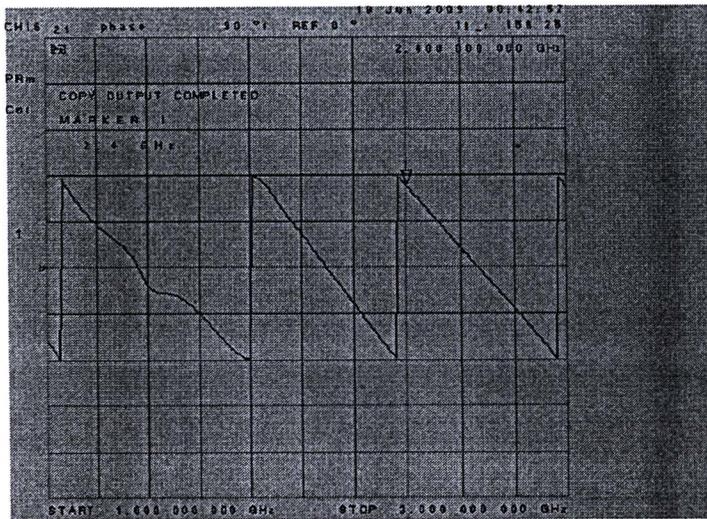
รูปที่ 4-13 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P3 กับพอร์ต E3 ( $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ  $-18.154$  dB)



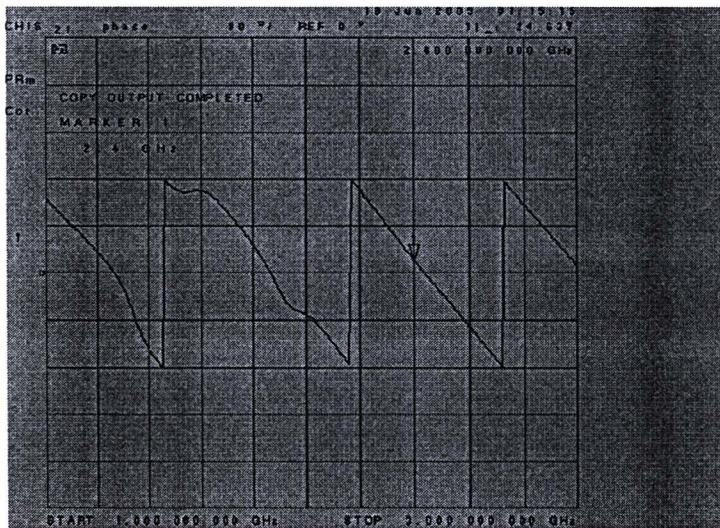
รูปที่ 4-14 วัดค่าพลังงานระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต E4 ( $S_{11}$  มีค่าเท่ากับ  $-12.319$  dB)

จากค่าพลังงานที่ได้พบว่า การไหลของพลังงานนั้นสามารถแพร่กระจายพลังงานออกไปได้เป็นที่ยอมรับ

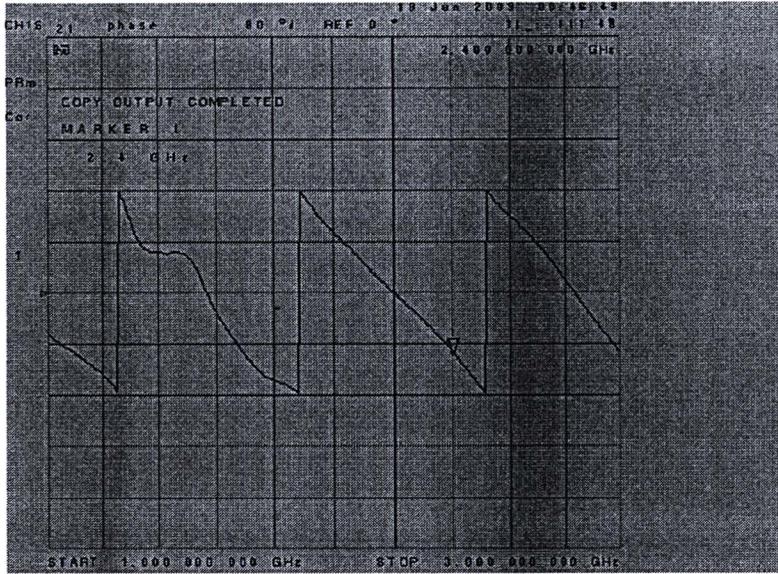
## ผลการทดสอบค่าการเลื่อนเฟส



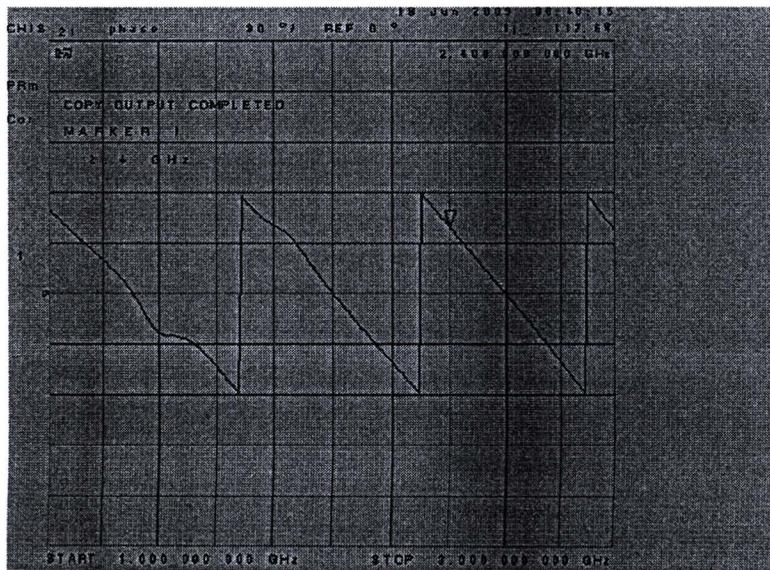
รูปที่ 4-15 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต E1 มีค่าเท่ากับ 158 องศา



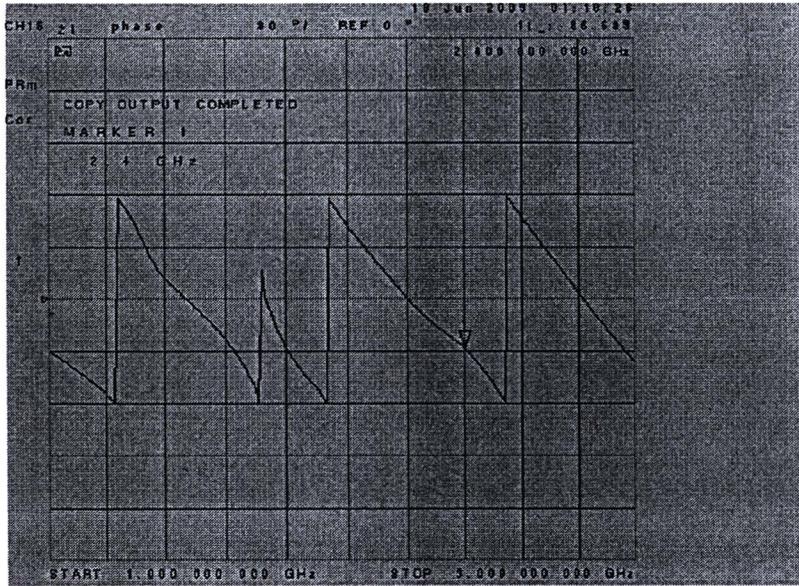
รูปที่ 4-16 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต E 2 มีค่าเท่ากับ 25 องศา



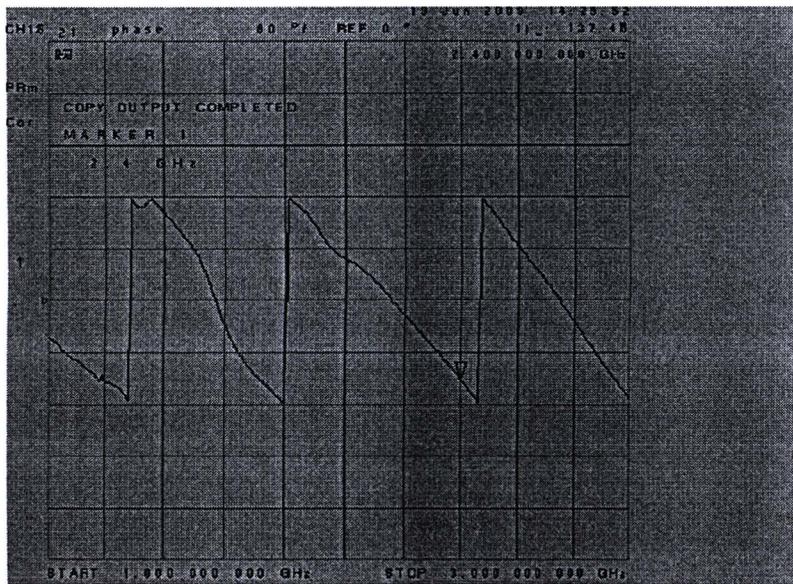
รูปที่ 4-17 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต E3 มีค่าเท่ากับ -122 องศา



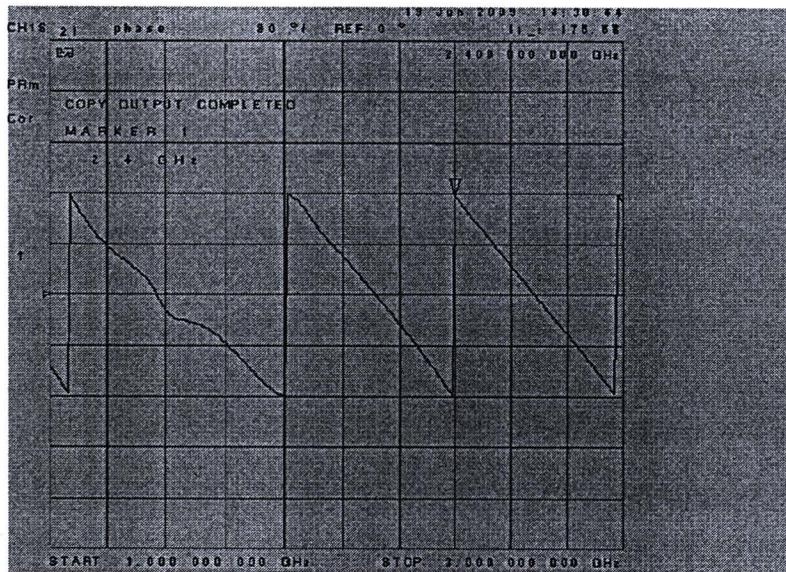
รูปที่ 4-18 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E4 มีค่าเท่ากับ 118 องศา



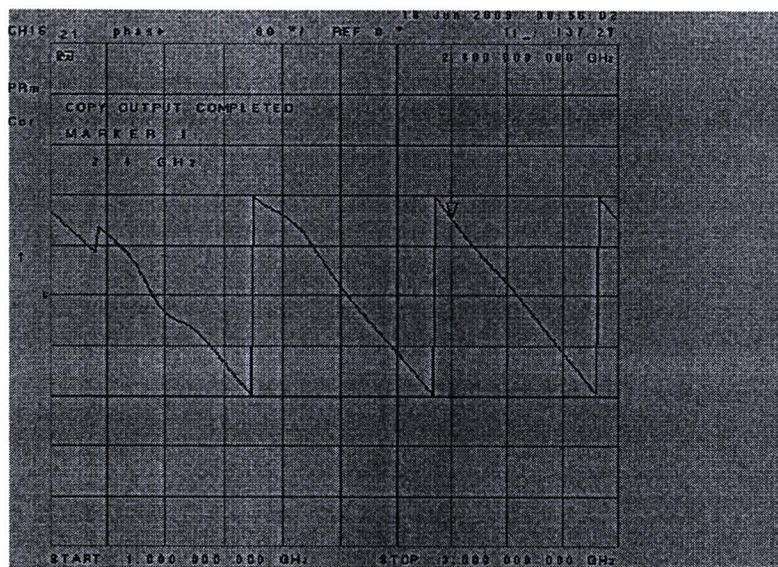
รูปที่ 4-19 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E1 มีค่าเท่ากับ -87 องศา



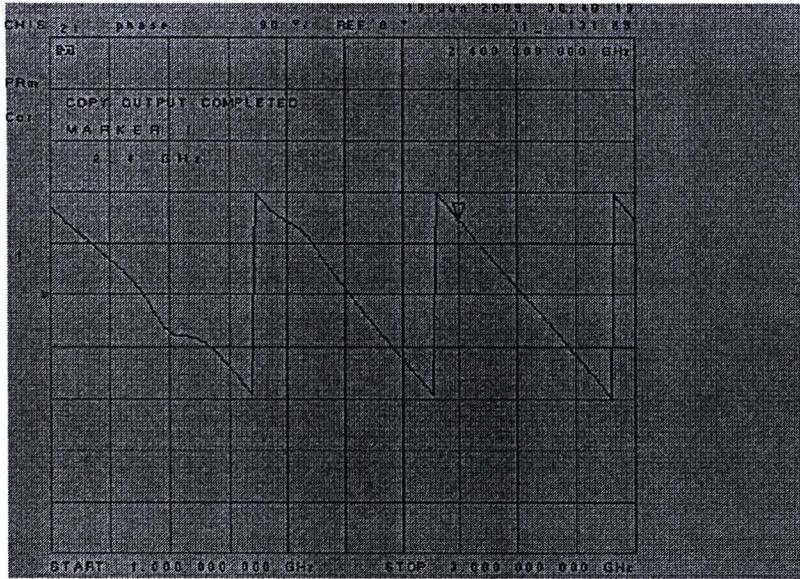
รูปที่ 4-20 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E2 มีค่าเท่ากับ -137 องศา



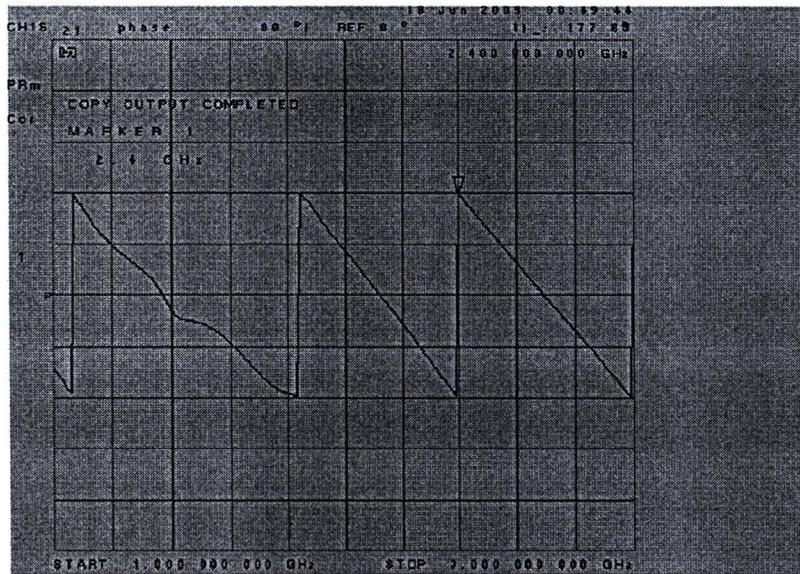
รูปที่ 4-21 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E3 มีค่าเท่ากับ 176 องศา



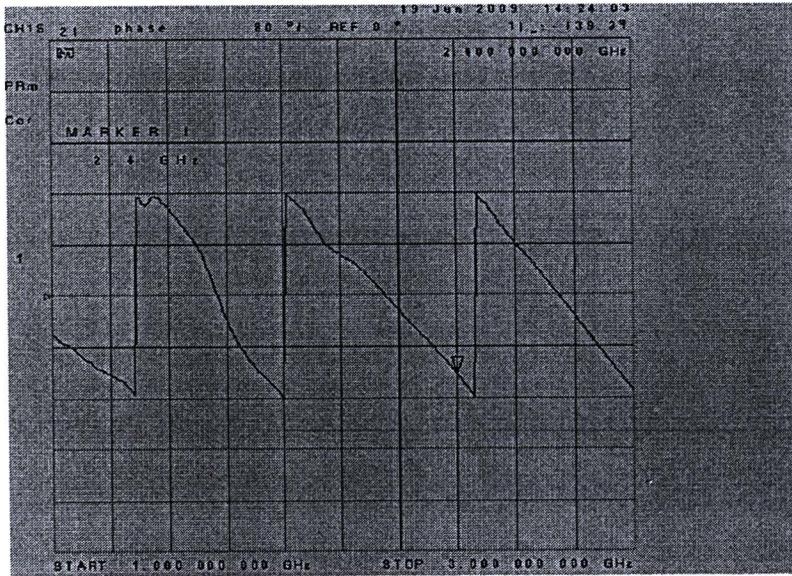
รูปที่ 4-22 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P2 กับพอร์ต E4 มีค่าเท่ากับ 137 องศา



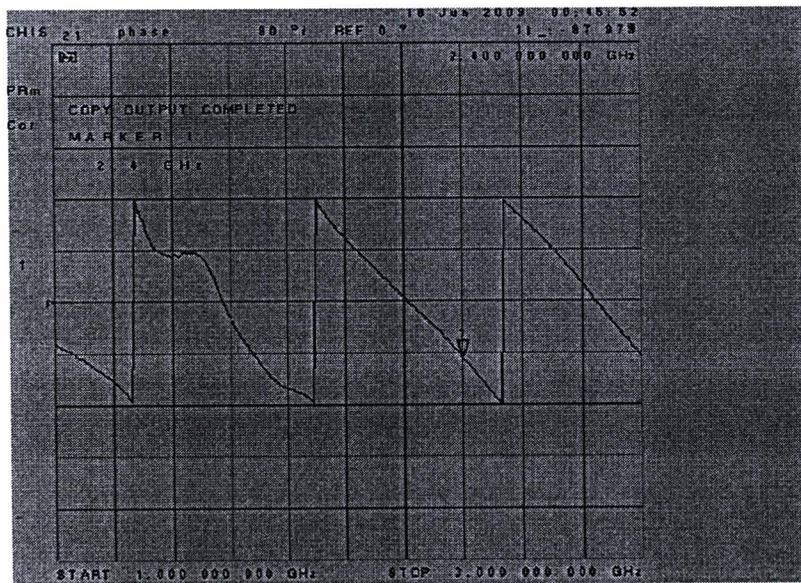
รูปที่ 4-23 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P3 กับพอร์ต E1 มีค่าเท่ากับ 132 องศา



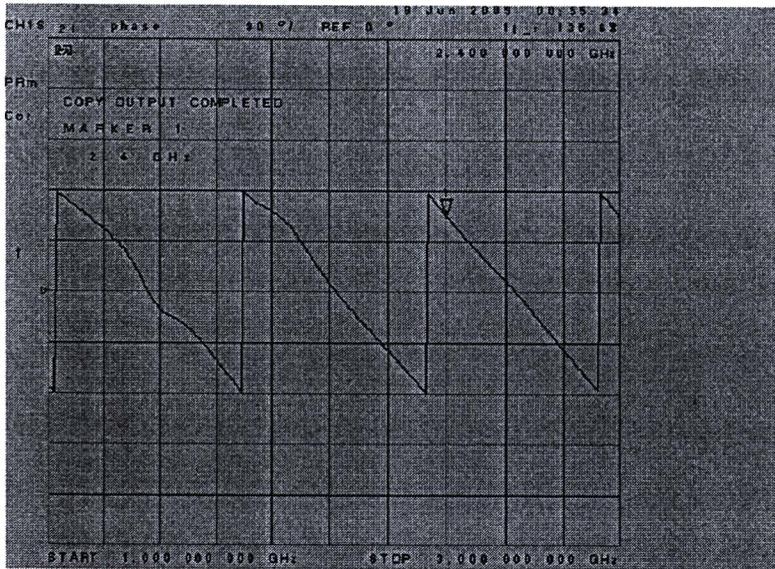
รูปที่ 4-24 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P3 กับพอร์ต E2 มีค่าเท่ากับ 178 องศา



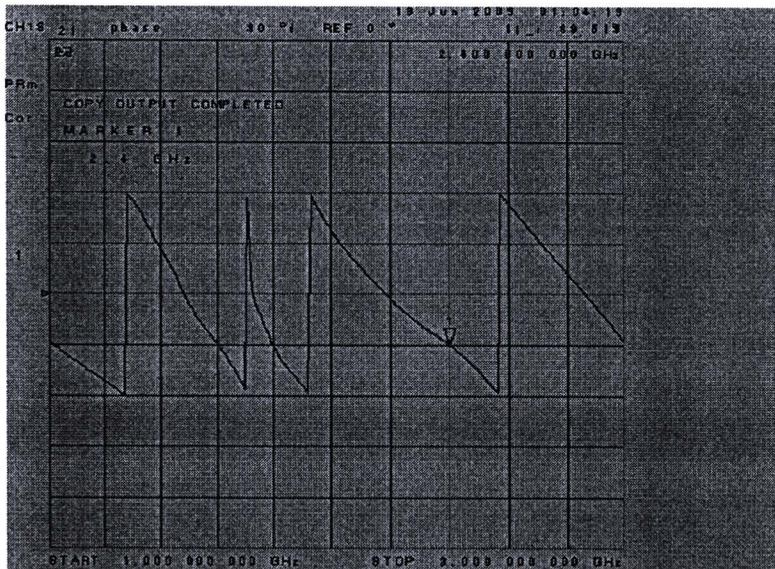
รูปที่ 4-25 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P3 กับพอร์ต E3 มีค่าเท่ากับ -139 องศา



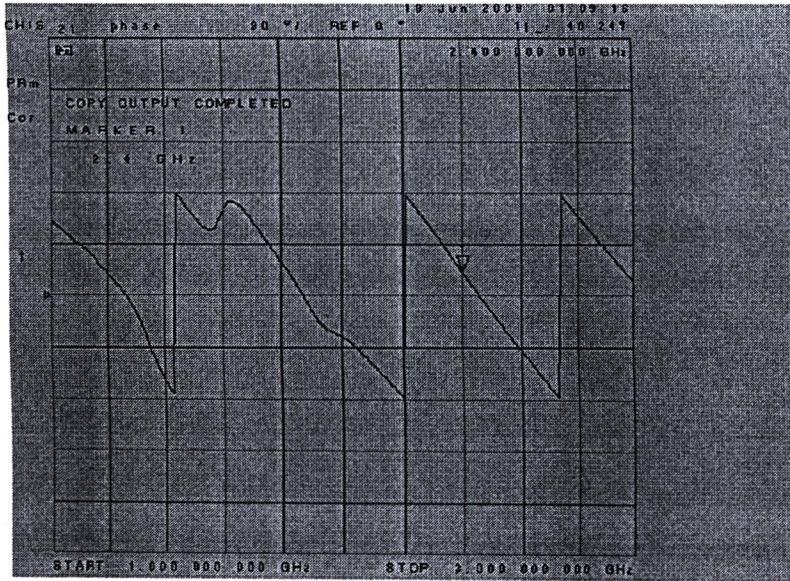
รูปที่ 4-26 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P3 กับพอร์ต E4 มีค่าเท่ากับ -98 องศา



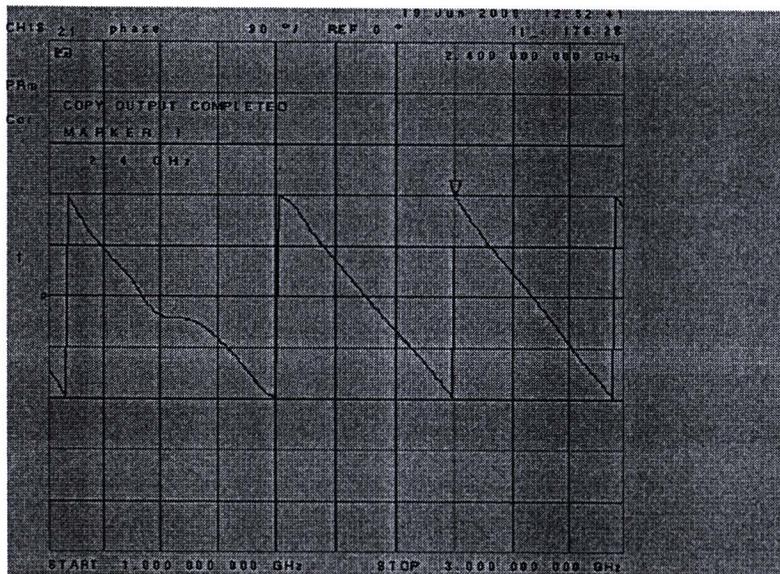
รูปที่ 4-27 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต E1 มีค่าเท่ากับ 136 องศา



รูปที่ 4-28 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต E2 มีค่าเท่ากับ -90 องศา



รูปที่ 4-29 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต E3 มีค่าเท่ากับ 40 องศา



รูปที่ 4-30 วัดค่าเฟสระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต E4 มีค่าเท่ากับ 176 องศา

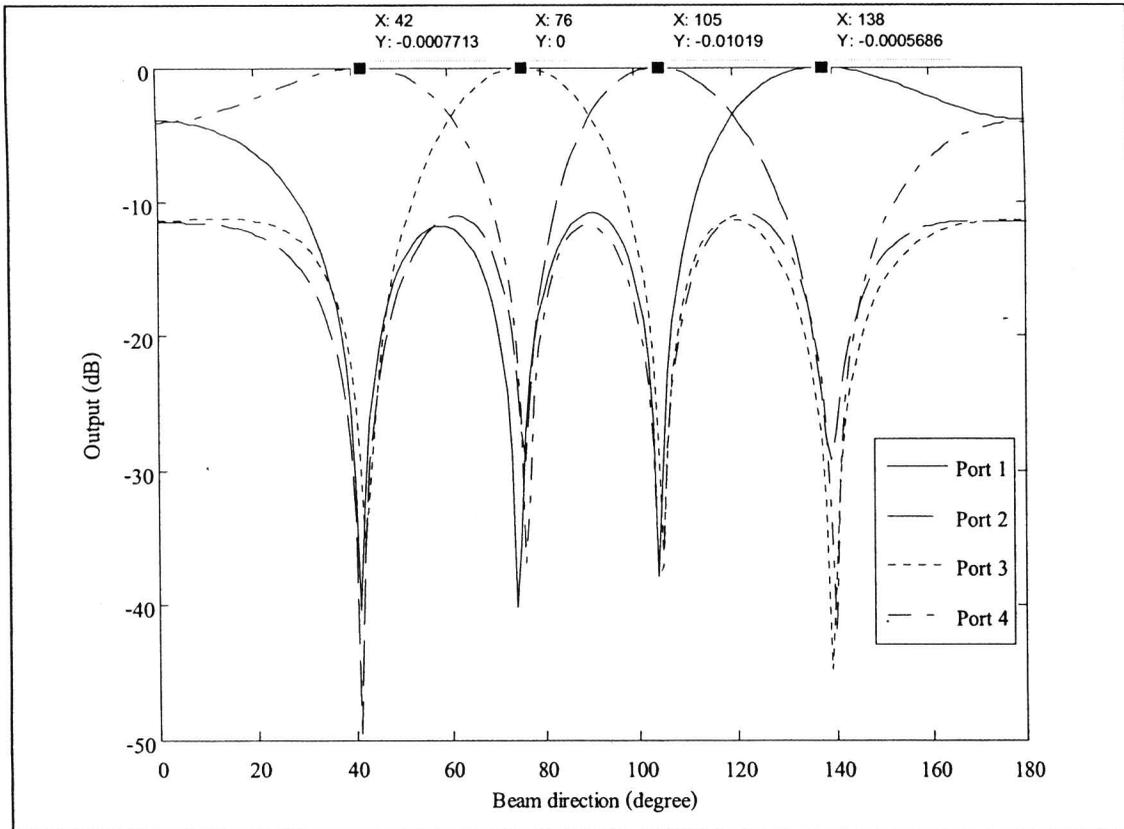
ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายลำคลื่น

จากการทดสอบวัดค่ามุมเฟสที่พอร์ตต่างๆ ของสายอากาศแต่ละต้น นำไปคำนวณหาการชี้ทิศทาง และวัดระยะห่างระหว่างเฟส โดยเฉลี่ยได้ค่าดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงเฟสของสายอากาศ ทิศทางของลำคลื่น ของบัทเลอร์เมทริกซ์ที่ได้จากการวัด

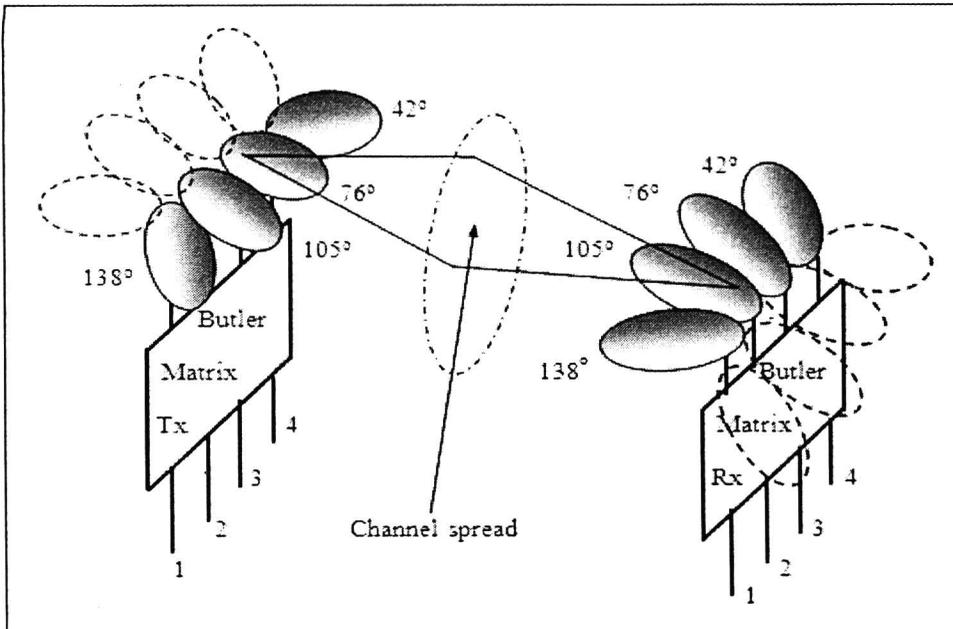
$\theta_k$	E1 ( $l=1$ )	E2 ( $l=2$ )	E3 ( $l=3$ )	E4 ( $l=4$ )	Beam Direction	Inter-Element Phasing (average)
Port 1 ( $k=1$ )	158°	25°	-112°	118°	138°	-130°
Port 2 ( $k=2$ )	-87°	-137°	176°	137°	105°	-42°
Port 3 ( $k=3$ )	132°	178°	-139°	-98°	76°	50°
Port 4 ( $k=4$ )	136°	-90°	40°	176°	42°	138°

สามารถนำผลการทดสอบนี้มาพล็อตแบบรูปการแผ่พลังงานในแต่ละทิศทางด้วยโปรแกรม MATLAB มีผลดังรูปที่ 4-31



รูปที่ 4-31 แบบรูปการแผ่พลังงานในแต่ละทิศทาง

จากรูปที่ 4-31 ผลที่ได้สามารถยอมรับได้ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงนำโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์ เมทริกซ์ นี้ไปใช้งานและพัฒนาต่อไปได้ นั้นหมายความว่า เราสามารถใส่บัทเลอร์ เมทริกซ์เข้าที่ภาคส่งและภาครับของสายอากาศได้เลย โดยผลที่ได้จะเป็นการประมวลผลเชิงมุมในทางปฏิบัติทันทีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-32 รูปแสดงการประยุกต์ใช้บัทเลอร์ เมทริกซ์เข้ากับสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ

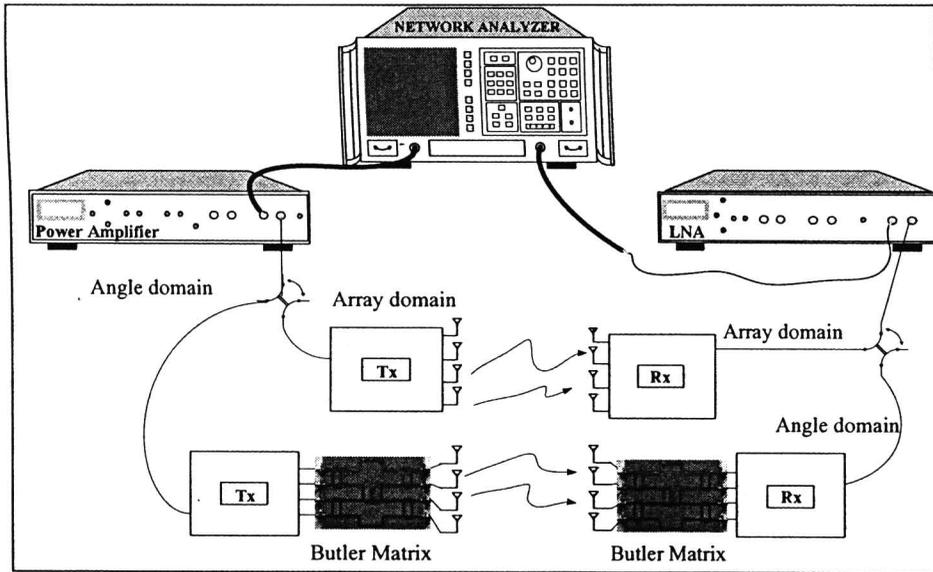
#### 4.4 การทดสอบระบบโมโนในสถานการณ์จริง

จากการสร้างชุดอุปกรณ์ต้นแบบโดยอ้างจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ บทที่ 3 นั้น ได้ชุดอุปกรณ์ต้นแบบที่สมบูรณ์หลังจากนั้นนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการและทดสอบใช้งานจริง ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบต่อไป

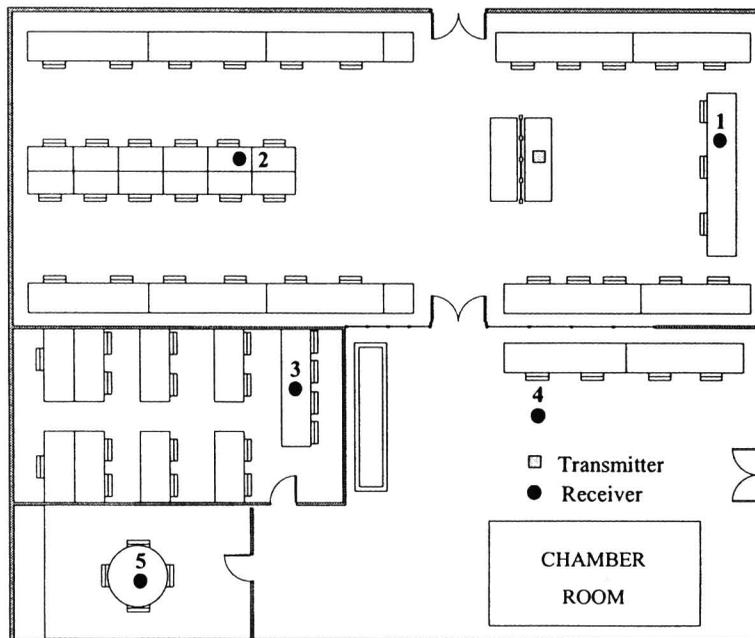
##### 4.4.1 การทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการวัดช่องสัญญาณ

จากโครงสร้างของการวัดช่องสัญญาณในระบบโมโนแบบ 4x4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-3 โดยที่องค์ประกอบของระบบโมโนแบบ 4x4 ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (Network Analyzer) โมดุลตัวขยายกำลัง (Power Amplifier: PA) และโมดุลตัวขยายที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-Noise Amplifier: LNA) สำหรับ PA ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มกำลังส่งสัญญาณที่ภาคส่ง โดย LNA ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มระดับสัญญาณที่ภาครับ สมบัติของช่องสัญญาณทั้งหมดและเฟสถูกวัดจากเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ( $S_{21}$ ) โดยแต่ละช่องสัญญาณจะวัดทั้งหมด 5 ครั้งในวันที่ต่างกัน สำหรับสายอากาศที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณเป็นสายอากาศไดโพล โดยความถี่ที่ทำการทดสอบคือ 2.4GHz อย่างไรก็ตาม, ช่องสัญญาณที่วัดได้เป็น

รูปแบบของระบบโมโมแบบ 4x4 ซึ่งการนำมาสร้างชุดทดสอบหรือทำการสร้างการจำลองแบบสำหรับระบบโมโมสามารถนำช่องสัญญาณที่วัดได้ทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันในการหาความจุช่องสัญญาณ



รูปที่ 4-33 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณ



รูปที่ 4-34 แผนที่สำหรับวัดช่องสัญญาณ

สถานที่ที่ทำการวัดช่องสัญญาณเราได้เลือกห้องทำงานที่มีขนาดใหญ่ โดยในรูปแบบที่ 4-4 อาคารวิจัย 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเพิ่มกรณีของการศึกษาช่องสัญญาณในหลายรูปแบบ ได้แสดงแผนที่ของห้องที่ได้ทำการวัดช่องสัญญาณ โดยที่จุดวงกลมหมายถึงจุดทดสอบที่ได้ทำการวัด โดยมีทั้งหมด 5 จุด ในแต่ละจุดทดสอบภาคส่งจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิมเมื่อทำการเปรียบเทียบการประมวลผลแอมพลิจูดและการประมวลผลเชิงมุม

ช่องสัญญาณที่วัดได้ถูกแสดงในรูปของขนาดหน่วย dB และเฟสในหน่วยองศา ส่วนการสูญเสียเนื่องจากสายส่งสัญญาณ วัดได้ -24 dB

-49 dB/29°	-39 dB/-124°	-35 dB/21°	-35 dB/-57°
-39 dB/53°	-40 dB/32°	-40 dB/41°	-42 dB/35°
-46 dB/-60°	-43 dB/41°	-49 dB/2°	-46 dB/-11°
-30 dB/20°	-37 dB/-140°	-41 dB/43°	-39 dB/19°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 1 (การประมวลผลแอมพลิจูด)

-38 dB/-148°	-34 dB/-97°	-31 dB/171°	-30 dB/72°
-28 dB/-148°	-30 dB/166°	-31 dB/83°	-40 dB/-13°
-33 dB/-60°	-27 dB/-153°	-29 dB/98°	-31 dB/45°
-28 dB/-143°	-32 dB/125°	-39 dB/116°	-37 dB/72°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 1 (การประมวลผลเชิงมุม)

-60 dB/-55°	-48 dB/-130°	-53 dB/-70°	-59 dB/-94°
-53 dB/-92°	-49 dB/-118°	-48 dB/-49°	-55 dB/-176°
-58 dB/-80°	-48 dB/-135°	-52 dB/-74°	-56 dB/-81°
-59 dB/-113°	-51 dB/-95°	-54 dB/-69°	-52 dB/-60°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 2 (การประมวลผลแอมพลิจูด)

-62 dB/8°	-55 dB/34°	-55 dB/142°	-61 dB/134°
-60 dB/108°	-50 dB/-197°	-50 dB/146°	-61 dB/-174°
-62 dB/171°	-48 dB/66°	-52 dB/116°	-59 dB/94°
-62 dB/135°	-52 dB/62°	-58 dB/-155°	-55 dB/-171°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 2 (การประมวลผลเชิงมุม)

-62 dB/-62°	-63 dB/-63°	-63 dB/-63°	-63 dB/-63°
-60 dB/-60°	-61 dB/-61°	-61 dB/-61°	-61 dB/-61°
-61 dB/-61°	-49 dB/-49°	-61 dB/-61°	-62 dB/-62°
-62 dB/62°	-62 dB/-62°	-63 dB/-63°	-64 dB/-64°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 3 (การประมวลผลแถวลำดับ)

-60 dB/172°	-61 dB/36°	-61 dB/7°	-60 dB/-47°
-60 dB/75°	-60 dB/-151°	-59 dB/138°	-58 dB/92°
-55 dB/122°	-48 dB/108°	-53 dB/124°	-60 dB/117°
-61 dB/39°	-61 dB/-169°	-63 dB/-151°	-64 dB/51°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 3 (การประมวลผลเชิงมุม)

-59 dB/-15°	-47 dB/7°	-55 dB/-11°	-58 dB/22°
-50 dB/15°	-44 dB/26°	-43 dB/-6°	-53 dB/47°
-51 dB/-13°	-43 dB/23°	-43 dB/17°	-52 dB/22°
-59 dB/56°	-53 dB/8°	-53 dB/-18°	-57 dB/-114°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 4 (การประมวลผลแถวลำดับ)

-60 dB/143°	-56 dB/116°	-55 dB/129°	-59 dB/-145°
-57 dB/174°	-48 dB/140°	-58 dB/-175°	-55 dB/-150°
-57 dB/164°	-46 dB/118°	-53 dB/-169°	-61 dB/146°
-62 dB/157°	-59 dB/143°	-53 dB/168°	-59 dB/168°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 4 (การประมวลผลเชิงมุม)

-63 dB/-106°	-61 dB/-103°	-62 dB/66°	-62 dB/96°
-64 dB/176°	-62 dB/-64°	-60 dB/156°	-60 dB/50°
-66 dB/-58°	-62 dB/59°	-66 dB/15°	-63 dB/-78°
-63 dB/-164°	-64 dB/102°	-66 dB/-158°	-64 dB/84°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 5 (การประมวลผลแถวลำดับ)

-61 dB/-73°	-59 dB/168°	-61 dB/17°	-61 dB/160°
-62 dB/-32°	-60 dB/-153°	-59 dB/95°	-58 dB/-36°
-63 dB/116°	-62 dB/-171°	-61 dB/92°	-63 dB/145°
-61 dB/25°	-62 dB/-149°	-63 dB/-12°	-63 dB/78°

ค่าแอมพลิจูดและเฟส จุดทดสอบที่ 5 (การประมวลผลเชิงมุม)

แต่ละองค์ประกอบของเมทริกซ์ช่องสัญญาณได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของช่องสัญญาณที่ได้จากการวัด 5 ครั้ง เมื่อแปลงจากรูปแบบโพลาร์ให้อยู่ในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อน จาก  $A(\cos \theta + i \sin \theta) = A + Bi$  เราสามารถนำค่าที่ได้เพื่อแสดงให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $\mathbf{H}$  คือเมทริกซ์ช่องสัญญาณที่ได้จากการประมวล

สำหรับเมทริกซ์ช่องสัญญาณทั้ง 5 จุดทดสอบ โดยมีการประมวลผลแถวลำดับและการประมวลผลเชิงมุม ช่องสัญญาณสามารถสรุปได้ดังนี้

$(1.70+0.97i) \times 10^{-2}$	$(-1.80-2.60i) \times 10^{-2}$	$(7.40+2.80i) \times 10^{-2}$	$(4.30-6.70i) \times 10^{-2}$
$(1.90+2.50i) \times 10^{-2}$	$(2.10+1.30i) \times 10^{-2}$	$(1.90+1.60i) \times 10^{-2}$	$(1.30+0.90i) \times 10^{-2}$
$(0.30-0.50i) \times 10^{-2}$	$(0.95+0.80i) \times 10^{-2}$	$(0.30+0.01i) \times 10^{-2}$	$(0.60-0.10i) \times 10^{-2}$
$(23.00+8.60i) \times 10^{-2}$	$(-3.80-3.20i) \times 10^{-2}$	$(1.50+1.40i) \times 10^{-2}$	$(3.00+1.00i) \times 10^{-2}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 1 (การประมวลผลแถวลำดับ)

$(-3.40-2.10i) \times 10^{-2}$	$(-1.20-9.90i) \times 10^{-2}$	$(-19.70+3.10i) \times 10^{-2}$	$(7.80+23.90i) \times 10^{-2}$
$(-33.70-21.10i) \times 10^{-2}$	$(-24.40+6.10i) \times 10^{-2}$	$(24.30+19.80i) \times 10^{-2}$	$(2.40-0.60i) \times 10^{-2}$
$(6.30-10.60i) \times 10^{-2}$	$(-44.70-22.80i) \times 10^{-2}$	$(-4.40+31.30i) \times 10^{-2}$	$(14.00+14.00i) \times 10^{-2}$
$(-32.00-24.00i) \times 10^{-2}$	$(-9.00+13.00i) \times 10^{-2}$	$(-1.40+2.80i) \times 10^{-2}$	$(1.50+4.80i) \times 10^{-2}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 1 (การประมวลผลเชิงมุม)

$(1.40-2.10i) \times 10^{-4}$	$(-26.00-31.00i) \times 10^{-4}$	$(4.30-12.00i) \times 10^{-4}$	$(-0.20-3.20i) \times 10^{-4}$
$(-0.40-13.00i) \times 10^{-4}$	$(-15.00-28.00i) \times 10^{-4}$	$(26.00-30.00i) \times 10^{-4}$	$(-7.90-0.60i) \times 10^{-4}$
$(0.70-3.90i) \times 10^{-4}$	$(-28.00-28.00i) \times 10^{-4}$	$(4.40-15.00i) \times 10^{-4}$	$(0.90-6.20i) \times 10^{-4}$
$(-1.20-2.90i) \times 10^{-4}$	$(-1.70-20.00i) \times 10^{-4}$	$(3.60-9.30i) \times 10^{-4}$	$(7.90-14.00i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 2 (การประมวลผลแถวลำดับ)

$(1.60+0.20i) \times 10^{-4}$	$(6.60+4.40i) \times 10^{-4}$	$(-6.30+4.90i) \times 10^{-4}$	$(-1.40+1.40i) \times 10^{-4}$
$(-0.80+2.40i) \times 10^{-4}$	$(-24.00+7.30i) \times 10^{-4}$	$(-21.00+14.00i) \times 10^{-4}$	$(-2.00-0.20i) \times 10^{-4}$
$(-1.60+0.30i) \times 10^{-4}$	$(16.00+36.00i) \times 10^{-4}$	$(-6.90+14.00i) \times 10^{-4}$	$(-0.20+3.20i) \times 10^{-4}$
$(-1.10+1.10i) \times 10^{-4}$	$(7.40+14.00i) \times 10^{-4}$	$(-3.60-1.70i) \times 10^{-4}$	$(-7.80-1.20i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 2 (การประมวลผลเชิงมุม)

$(1.30+0.90i) \times 10^{-4}$	$(1.20+0.30i) \times 10^{-4}$	$(1.20+0.40i) \times 10^{-4}$	$(0.80-0.90i) \times 10^{-4}$
$(-2.50+0.20i) \times 10^{-4}$	$(2.00+0.40i) \times 10^{-4}$	$(-0.50-1.90i) \times 10^{-4}$	$(1.80-0.80i) \times 10^{-4}$
$(-0.70-1.90i) \times 10^{-4}$	$(-24.00+20.00i) \times 10^{-4}$	$(-0.90-1.80i) \times 10^{-4}$	$(0.50-1.50i) \times 10^{-4}$
$(-1.30-0.90i) \times 10^{-4}$	$(-1.50+0.60i) \times 10^{-4}$	$(-1.20-0.50i) \times 10^{-4}$	$(-0.90-0.50i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 3 (การประมวลผลแถวลำดับ)

$(-2.50+0.30i) \times 10^{-4}$	$(1.60+1.10i) \times 10^{-4}$	$(2.00+0.20i) \times 10^{-4}$	$(1.70-1.80i) \times 10^{-4}$
$(0.70+2.40i) \times 10^{-4}$	$(-2.20-1.20i) \times 10^{-4}$	$(-2.40+2.10i) \times 10^{-4}$	$(-0.10+4.00i) \times 10^{-4}$
$(-4.20+6.70i) \times 10^{-4}$	$(-12.00+38.00i) \times 10^{-4}$	$(-7.00+10.00i) \times 10^{-4}$	$(-1.10+2.20i) \times 10^{-4}$
$(1.60+1.30i) \times 10^{-4}$	$(-2.00-0.40i) \times 10^{-4}$	$(-1.10-0.60i) \times 10^{-4}$	$(0.60-0.80i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 3 (การประมวลผลเชิงมุม)

$(3.10-0.80i) \times 10^{-4}$	$(-22.00+45.00i) \times 10^{-4}$	$(7.80-1.50i) \times 10^{-4}$	$(3.70+1.50i) \times 10^{-4}$
$(24.00+6.50i) \times 10^{-4}$	$(89.00+44.00i) \times 10^{-4}$	$(125.00-13.00i) \times 10^{-4}$	$(8.60+9.20i) \times 10^{-4}$
$(19.40-4.50i) \times 10^{-4}$	$(116.00+49.00i) \times 10^{-4}$	$(120.40+37.80i) \times 10^{-4}$	$(14.70+5.90i) \times 10^{-4}$
$(1.80+2.60i) \times 10^{-4}$	$(12.50+1.80i) \times 10^{-4}$	$(12.00-3.90i) \times 10^{-4}$	$(-2.10-4.60i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 4 (การประมวลผลแถวลำดับ)

$(-2.00+1.50i) \times 10^{-4}$	$(-2.80+5.70i) \times 10^{-4}$	$(-5.00+6.20i) \times 10^{-4}$	$(-2.60-1.80i) \times 10^{-4}$
$(-5.00+0.50i) \times 10^{-4}$	$(-30.00+26.00i) \times 10^{-4}$	$(-4.00-0.30i) \times 10^{-4}$	$(-6.90-4.00i) \times 10^{-4}$
$(-4.80+1.40i) \times 10^{-4}$	$(-29.60-55.70i) \times 10^{-4}$	$(-12.40-2.40i) \times 10^{-4}$	$(-1.70+1.10i) \times 10^{-4}$
$(-1.50+0.60i) \times 10^{-4}$	$(-2.20+2.30i) \times 10^{-4}$	$(-12.30+2.60i) \times 10^{-4}$	$(-3.10+0.70i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 4 (การประมวลผลเชิงมุม)

$(-0.40-1.20i) \times 10^{-4}$	$(-0.50-1.90i) \times 10^{-4}$	$(0.60+1.50i) \times 10^{-4}$	$(-0.17+1.60i) \times 10^{-4}$
$(-1.00+0.07i) \times 10^{-4}$	$(0.70-1.40i) \times 10^{-4}$	$(-2.30+10i) \times 10^{-4}$	$(1.60+1.90i) \times 10^{-4}$
$(0.30-0.50i) \times 10^{-4}$	$(0.80+1.40i) \times 10^{-4}$	$(0.60+0.16i) \times 10^{-4}$	$(0.26-1.23i) \times 10^{-4}$
$(-1.20-0.35i) \times 10^{-4}$	$(-0.20+0.98i) \times 10^{-4}$	$(-0.59-0.24i) \times 10^{-4}$	$(0.10-0.99i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 5 (การประมวลผลแถวลำดับ)

$(0.58-1.90i) \times 10^{-4}$	$(-3.10+0.66i) \times 10^{-4}$	$(1.90+0.58i) \times 10^{-4}$	$(-1.87+0.68i) \times 10^{-4}$
$(1.34-0.84i) \times 10^{-4}$	$(-2.20-1.14i) \times 10^{-4}$	$(-0.28+3.15i) \times 10^{-4}$	$(3.20-2.34i) \times 10^{-4}$
$(-0.60+1.13i) \times 10^{-4}$	$(-1.56-0.25i) \times 10^{-4}$	$(-0.07+2.00i) \times 10^{-4}$	$(-1.00+0.72i) \times 10^{-4}$
$(1.80+0.84i) \times 10^{-4}$	$(-1.40-0.82i) \times 10^{-4}$	$(1.23-0.26i) \times 10^{-4}$	$(0.26+1.23i) \times 10^{-4}$

เมทริกซ์ช่องสัญญาณ จุดทดสอบที่ 5 (การประมวลผลเชิงมุม)

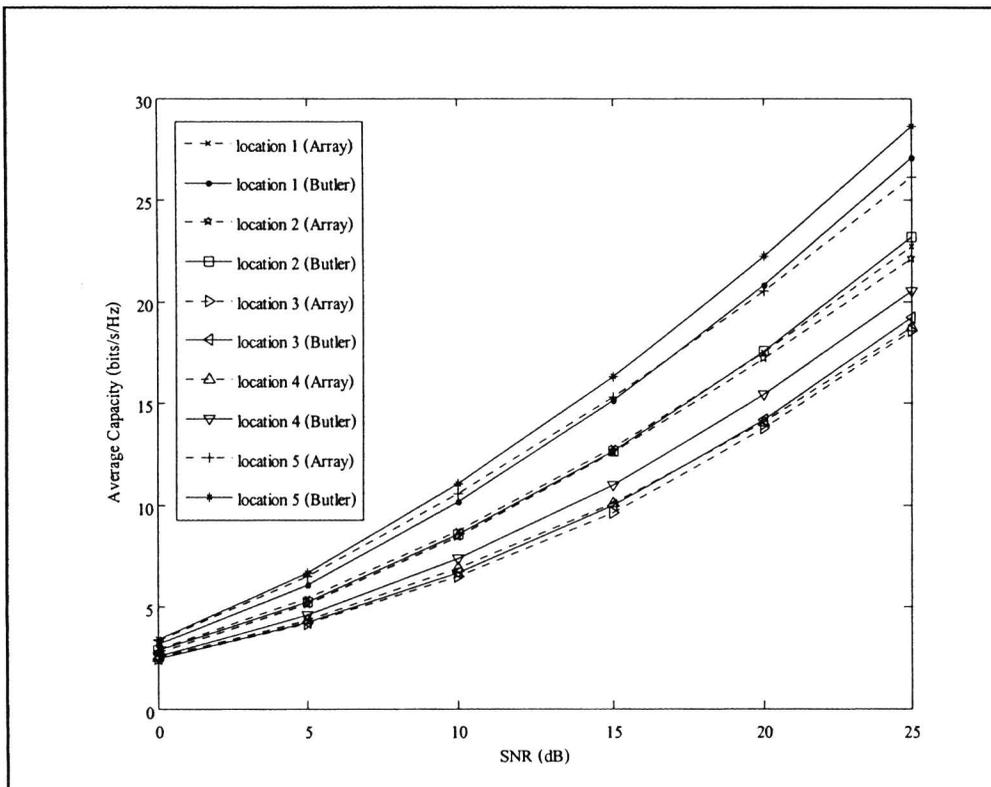
จากผลช่องสัญญาณที่ได้จะเห็นว่า ทั้งช่องสัญญาณมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งในส่วนเฟสและขนาด อย่างไรก็ตาม ในบางจุดทดสอบช่องสัญญาณมีความแตกต่างกับจุดอื่น มากเช่นในจุดทดสอบที่ 5 ผลจากความ

แตกต่างกันนี้อาจเกิดจากการที่จุดทดสอบมีระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่งที่ไกลรวมถึงสภาพแวดล้อมรอบๆที่อาจทำให้มีผลกระทบเนื่องจากสัญญาณหลายวิถีสูงกว่าจุดทดสอบอื่น

#### 4.4.2 การหาความจุช่องสัญญาณ

เมื่อนำแอมพลิจูดและมุมเฟสมาแปลงเป็นช่องสัญญาณที่อยู่ในรูปเชิงซ้อนแล้ว นำช่องสัญญาณในแต่ละพื้นที่ ที่ได้จากการประมวลผลแอมพลิจูดมาจำลองแบบหาความจุช่องสัญญาณจากสมการ (4-15) แล้วนำช่องสัญญาณในแต่ละพื้นที่ ที่ได้จากการประมวลผลเชิงมุมที่เกิดจากการประยุกต์ใช้บทเตอร์เมทริกซ์มาจำลองแบบหาความจุช่องสัญญาณจากสมการ (4-21) จะได้กราฟเปรียบเทียบดังนี้

รูปที่ 4-35 แสดงความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ทั้ง 5 จุดที่ทำการวัดผล และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเท่ากับ 10 dB ในแต่ละจุดที่ทำ การวัดผล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-2

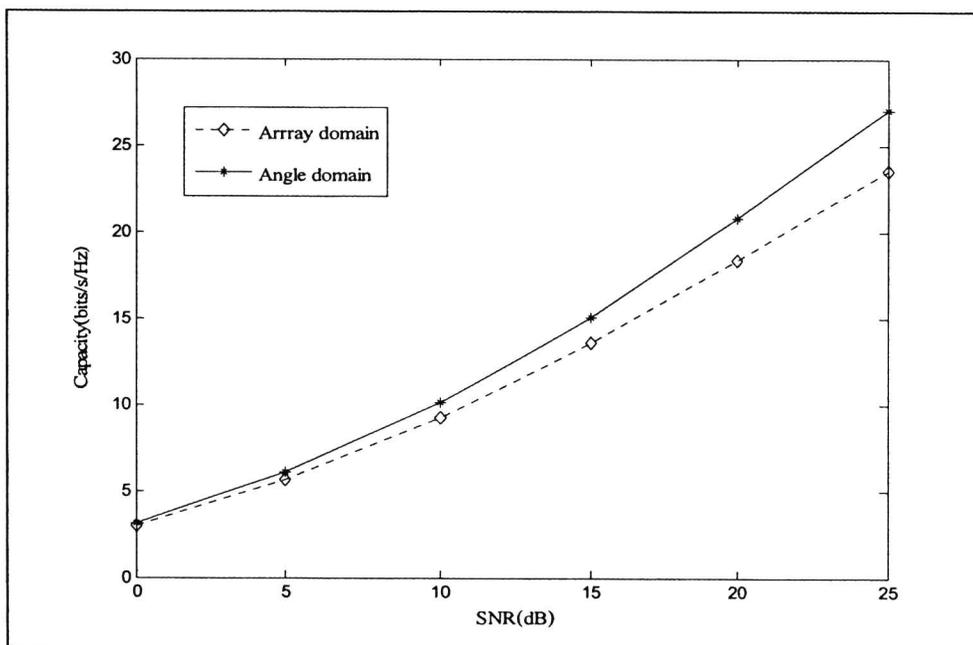


รูปที่ 4-35 ความจุช่องสัญญาณเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละจุดที่ทำ การวัด

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณในแต่ละจุดที่ทำการวัดผล เมื่อ SNR = 10 dB

พื้นที่	ค่าเฉลี่ยความจุช่องสัญญาณ (bits/s/Hz)	
	โดเมนแถวลำดับ	โดเมนเชิงมุม (บัทเลอร์ เมทริกซ์)
1	8.72	10.12
2	8.43	8.52
3	6.46	6.65
4	6.88	7.37
5	10.57	11.03

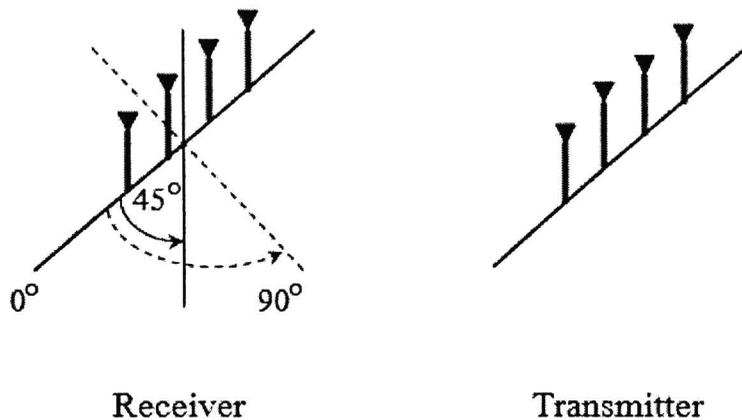
และเมื่อนำแต่ละพื้นที่ ที่ทำการวัดผลมาหาค่าเฉลี่ยรวมของทั้งสองกรณีจะได้ดังรูปที่ 4-36



รูปที่ 4-36 ค่าเฉลี่ยรวมความจุช่องสัญญาณทั้งสองกรณีเมื่อเทียบกับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

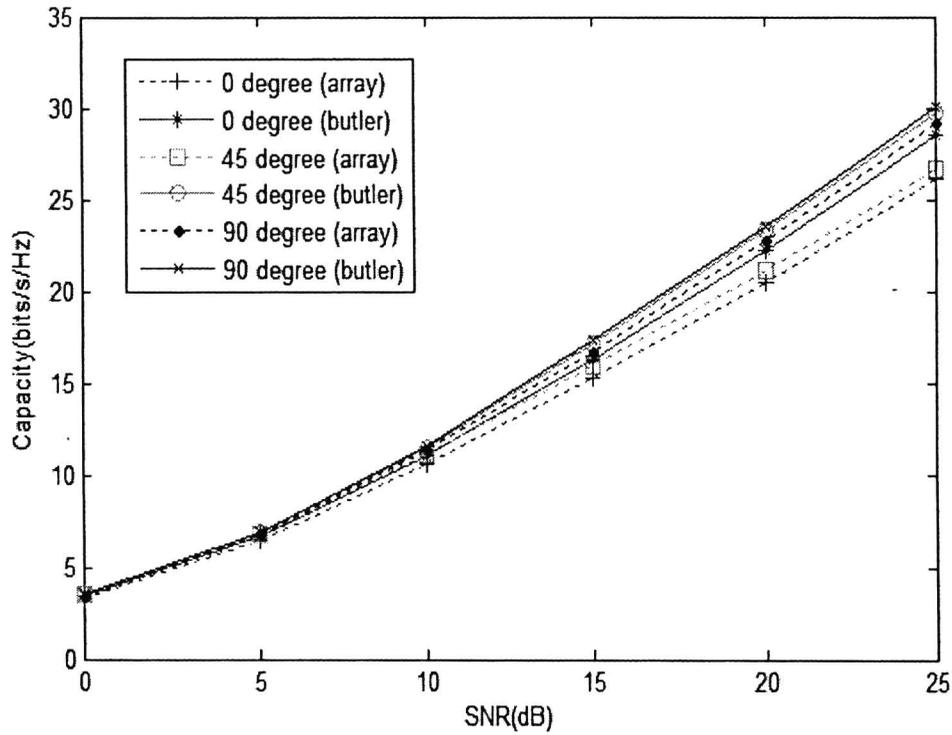
#### 4.5 การทดสอบทิศทางการรับสัญญาณในสถานการณ์จริง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่แล้ว เป็นสถานการณ์ที่ภาคส่งและรับหันด้านหน้าระนาบของสายอากาศเข้าหากัน ซึ่งเป็นลักษณะที่เป็นไปตามทฤษฎีที่วิเคราะห์ไว้ อย่างไรก็ตามลักษณะของสิ่งแวดล้อมย่อมมีผลกระทบทำให้สัญญาณที่เข้ามาในระบบจากทิศทางต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนี้การประมวลผลเชิงมุมยังต้องใช้ปัจจัยเรื่องมุมเป็นสำคัญในการวิเคราะห์หาความจุของช่องสัญญาณ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองที่เปรียบเทียบระหว่างการประมวลผลเชิงมุมและแถวลำดับเมื่อภาครับมีการจัดวางลักษณะของหน้าระนาบสายอากาศที่หมุนมุมไปจากเดิม ในการทดสอบนี้เลือกใช้ที่มุม 0 45 และ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4-37



รูปที่ 4-37 ทิศทางการหมุนของสายอากาศแถวลำดับที่ภาครับ

การทดสอบนี้จะดำเนินการทุกตำแหน่งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว รูปที่ 4-38 แสดงค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณ (bits/s/Hz) เทียบกับอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สำหรับตำแหน่งที่ 5 ผลที่ได้ยังยืนยันการเพิ่มขึ้นของความจุของช่องสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการใช้การประมวลผลเชิงมุมเทียบกับแถวลำดับในทุกๆ มุมที่มีการหมุนไป สำหรับผลในตำแหน่งอื่นๆ นั้น ค่าเฉลี่ยความจุของช่องสัญญาณเมื่อ  $SNR = 10$  dB ของทุกตำแหน่งแสดงในตารางที่ 4-3 ผลที่ได้ก็ยังคงแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้สายอากาศที่ประมวลผลเชิงมุม



รูปที่ 4-38 ค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณ (bits/s/Hz) เทียบกับอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สำหรับตำแหน่งที่ 5

ตารางที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยของความจุของช่องสัญญาณ (bps/Hz) ของทุกตำแหน่งเมื่อ SNR=10 dB

Direction Location	0°		45°		90°	
	Array domain	Angle (Butler)	Array domain	Angle (Butler)	Array domain	Angle (Butler)
1	8.72	10.12	9.99	11.68	11.01	11.59
2	8.43	8.52	10.54	10.98	9.61	10.84
3	6.46	6.65	6.88	9.69	9.67	10.00
4	6.88	7.37	6.66	10.69	6.67	10.69
5	10.57	11.03	11.11	11.52	11.31	11.59

#### 4.6 วิเคราะห์ผลการจำลองแบบและการทดสอบ

การจำลองแบบโดยโปรแกรมเมทแลปสำหรับระบบไม โมแบบที่ใช้สายอากาศส่งและรับภาคละ 4 ดัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการประมวลผลเชิงมุมให้ความจุช่องสัญญาณมากกว่าการประมวลผลแถวลำดับ ทุกๆ มุมที่มีการจำลองขึ้น ส่วนการทดสอบโดยการประยุกต์ใช้การประมวลผลเชิงมุมในทางปฏิบัติโดยใช้บัทเลอร์ เมทริกซ์และมีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับ การประมวลผลแถวลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการประมวลผลเชิงมุมให้คุณลักษณะที่ดีกว่าการประมวลผลแถวลำดับในทุกๆ พื้นที่ที่ทำการวัดผล

#### 4.7 กล่าวท้ายบท

เนื้อหาที่สำคัญของบทนี้เป็นการกล่าวถึงการจำลองแบบเพื่อหาความจุช่องสัญญาณในระบบไม โม โดยใช้การประมวลผลแถวลำดับเปรียบเทียบกับ การประมวลผลเชิงมุม รวมถึงการสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบจริงสำหรับระบบไม โมเมื่อใช้การประมวลผลแถวลำดับเปรียบเทียบกับ การประมวลผลเชิงมุม โดยทำการวัดช่องสัญญาณของทั้งสองกรณีแล้วนำมาจำลองผลหาความจุช่องสัญญาณ ผลที่ได้จากการทดสอบจริงพบว่าช่องสัญญาณทั้งสองกรณี มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งช่องสัญญาณที่ให้ความจุมากที่สุดเป็นช่องสัญญาณที่มีผลกระทบจากสัญญาณหลายวิถี อีกทั้งยังมีระยะทางไกล ทำให้เป็นผลดีต่อระบบไม โม และการประมวลผลเชิงมุมให้ความจุช่องสัญญาณที่มากกว่าการประมวลผลแถวลำดับทุก ๆ กรณี ไม่ว่าจะ เป็นผลจากการจำลองแบบหรือผลจากการวัดจริง และการจำลองแบบได้กำหนดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับมีภาคละ 4 ดันเพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง มีการจำลองแบบด้วยโปรแกรมเมทแลปในคอมพิวเตอร์เพื่อหาความจุช่องสัญญาณของระบบไม โม องค์ประกอบของอุปกรณ์ที่ภาครับและภาคส่งเป็นชนิดเดียวกัน เพื่อให้ช่องสัญญาณเป็นไปตามทฤษฎี และการศึกษาสมรรถนะของช่องสัญญาณพิจารณาด้วยการจัดสรรกำลังส่งสัญญาณที่เท่า ๆ กันในสายอากาศแต่ละดัน