

รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

สายอากาศแถวลำดับที่ใช้องค์ประกอบสวิตซ์ลำคลื่น

Phase Array of Switched Beam Elements

นายโมนัย	ไกรฤกษ์
นายชวงค์	พงศ์เจริญพานิชย์
นายเอกรัฐ	บุญภูงา
นายจักรกฤษ	ตรรกพานิชย์
นายธัญวัฒน์	ลิมปิติ
Mr. Monai	Krairiksh
Mr. Chuwong	Phongcharoenpanich
Mr. Akkarat	Boonpoonga
Mr. Jukkrit	Tagapanij
Mr. Thanyawat	Limpiti

RCH  
 TK  
 7871.63  
 A 33  
 ศ 664

เลขหมู่.....  
 เลขทะเบียน..... 83638  
 วัน,เดือน,ปี..... 10 . ก. ย. 2551

ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารไร้สาย  
 โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 กันยายน 2549

Wireless Communication Laboratory  
 Research Center for Communications and Information Technology  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

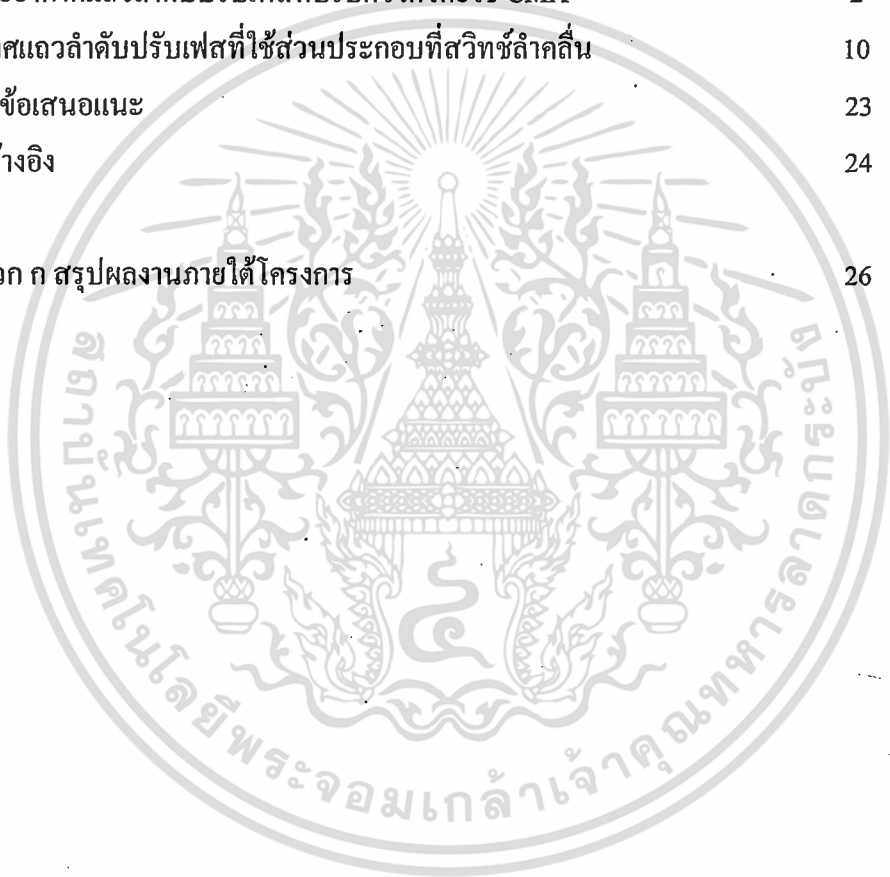
September 2006

b. 119 82147  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ	III
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ปรับตัวได้โดยใช้ CMA	2
บทที่ 3 สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบที่สวิตซ์ลำดับ	10
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ	23
บทที่ 5 เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สรุปผลงานภายใต้โครงการ	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยสายอากาศแถวลำดับที่ใช้องค์ประกอบสวิตช์ลากลื่น (Phase Array of Switched Beam Elements) นี้ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology : ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 วงเงินงบประมาณ 117,481.90 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทสรุปย่อ

ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารไร้สาย กำลังพัฒนาสายอากาศปรับตัวเพื่อติดตั้งบนอุปกรณ์มือถือ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือเก็บข้อมูลความอ่อนแก่ของผลไม้จากเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนผลไม้ สายอากาศนี้มีข้อกำหนดที่ต้องทำงานได้รวดเร็ว กินไฟน้อยและต้นทุนต่ำ เราเลือกใช้การทำงานผสมกันระหว่างฮาร์ดแวร์กับซอฟต์แวร์ โดยใช้สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบที่สวิทช์ค่าคลื่นได้ในการเริ่มต้นการทำงานของกระบวนการปรับตัวที่ชื่อว่า Constant Modulus Algorithm (CMA) ดังนั้นงานที่ทำอยู่จึงแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ปรับตัวได้โดยใช้ CMA ซึ่งเป็นการพัฒนาสายอากาศปรับตัว CMA ที่ทำให้การทำงานรวดเร็วโดยการเริ่มต้นการทำงานด้วยสายอากาศแถวลำดับปรับเฟส และส่วนการพัฒนาสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบที่สวิทช์ค่าคลื่นได้ ในปีงบประมาณ 2549 ได้ศึกษาและพัฒนาทั้งสองส่วนจนเกิดความเข้าใจได้ดี ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาสายอากาศปรับตัวบนอุปกรณ์มือถือในขั้นต่อไป

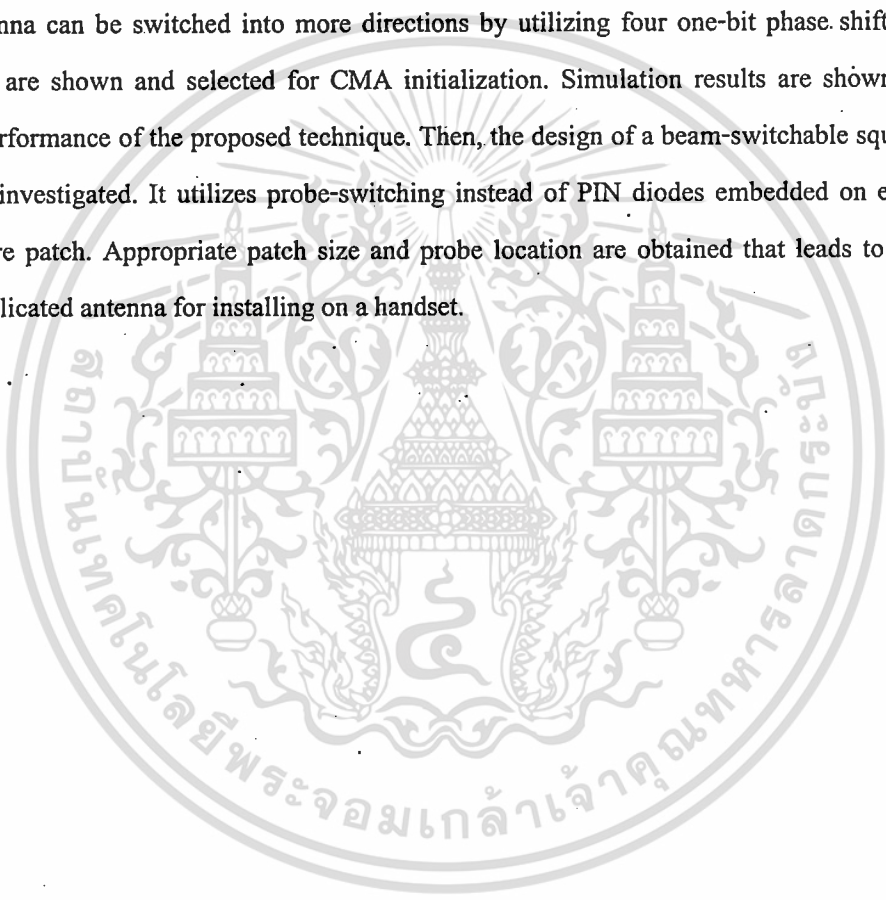


## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการเริ่มต้นสำหรับ Constant Modulus Algorithm (CMA) ที่ปรับปรุงคุณสมบัติในการลู่เข้าได้อย่างเห็นได้ชัด เพื่อนำไปปรับตัวถ่วงน้ำหนักของระบบสายอากาศปรับตัว กระบวนการดังกล่าวเลือกใช้ค่าคลื่นที่รับสัญญาณได้สูงที่สุดของสายอากาศแถวลำดับปรับตัวที่ปรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เป็นส่วนประกอบได้ ในการเริ่มต้น CMA สายอากาศนี้สามารถปรับได้มากที่สุดทางขึ้นโดยใช้ตัวปรับเฟสหนึ่งบิต เมื่อแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานได้แสดงที่รับกำลังงานได้มากที่สุดแล้วจะนำมาใช้ในเริ่มต้น ได้แสดงผลการจำลองเพื่อประเมินสมรรถนะของเทคนิคที่นำเสนอนี้ จากนั้นจะศึกษาการออกแบบสายอากาศ สายอากาศสวิตซ์ค่าคลื่นที่ปรับทิศทางของค่าคลื่นด้วยการสวิตซ์โพรบที่ใช้ป้อนสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสแทนการใช้ไดโอดพิน (PIN Diode) ติดตั้งบนขอบทั้งสี่ด้านของสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัส การศึกษานี้ทำให้ทราบขนาดของแพทช์ ตำแหน่งของโพรบที่ป้อนสายอากาศที่เหมาะสมอันจะนำไปสู่สายอากาศที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยากเหมาะสำหรับติดตั้งบนอุปกรณ์มือถือ

## Abstract

This research proposes an initialization scheme for a Constant Modulus Algorithm (CMA). The technique can significantly improve convergence properties of CMA, which is employed for weight adjustment of an adaptive antenna system. The technique exploits a beam of a switched-beam element phased array antenna with maximum received power to initial CMA. In addition, a main beam of the antenna can be switched into more directions by utilizing four one-bit phase shifters. Antenna patterns are shown and selected for CMA initialization. Simulation results are shown to evaluate SINR performance of the proposed technique. Then, the design of a beam-switchable square patch antenna is investigated. It utilizes probe-switching instead of PIN diodes embedded on each edge of the square patch. Appropriate patch size and probe location are obtained that leads to the design of uncomplicated antenna for installing on a handset.



## บทที่ 1

### บทนำ

การเพิ่มขึ้นของอุปสงค์สำหรับการสื่อสารไร้สาย สัญญาณแทรกสอดท่ามกลางการสื่อสารและผลของการจางหายเนื่องจากคลื่นหลายวิธีนำมาซึ่งปัญหาที่น่าวิตก เป็นที่รู้กันเป็นอย่างดีว่าสายอากาศผลาดสามารถลดปัญหากันดังกล่าวได้ โดยทั่วไป สายอากาศผลาดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดได้แก่ สายอากาศไดเวอร์จันต์ สายอากาศปรับลำคลื่น และสายอากาศปรับตัว

ในสิบปีที่ผ่านมา อัลกอริทึมปรับตัวซึ่งไม่ใช่สัญญาณอ้างอิง (blind adaptive algorithm) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สาย วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ CMA (constant modulus algorithm) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า CMA สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยไม่ใช่สัญญาณอ้างอิง (reference signal) บนเงื่อนไขที่ว่าสัญญาณส่งมีขนาดที่คงที่ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักในการประยุกต์ใช้ CMA คือความล่าช้าในการลู่เข้าของ CMA

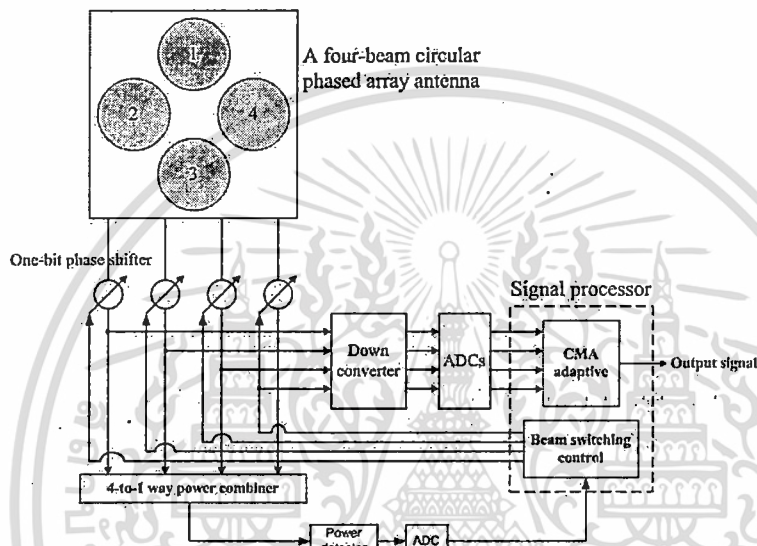
เมื่อไม่นานมานี้ [1] ได้นำเสนอสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ปรับตัวได้ที่แบนกะทัดรัดสี่ลำคลื่น (A flat four-beam compact phased array antenna) ตัวเลื่อนเฟสหนึ่งบิตได้ถูกใช้เพื่อการปรับลำคลื่น สามารถพิจารณาลำคลื่นที่รับกำลังงานที่มากที่สุดได้โดยเพิ่มวงจรการเชื่อมต่อได้ง่ายๆ ลำคลื่นดังกล่าวสามารถใช้เป็นลำคลื่นเริ่มต้นได้ และ CMA สามารถนำไปใช้ปรับลำคลื่นต่อได้

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาจำลองระบบสายอากาศที่น่าเสนอ การสร้างส่วนประมวลผลปรับตัว การสร้างและทดสอบสายอากาศปรับตัว จากนั้นจะแสดงสายอากาศแพทช์ที่ปรับทิศทางได้ด้วยการสวิตช์โพรบที่ใช้ป้อนสายอากาศทำให้สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบชนิดนี้มีจำนวนลำคลื่นเพิ่มขึ้นด้วยต้นทุนที่ต่ำ

## บทที่ 2

### ระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ปรับตัวได้โดยใช้ CMA

#### 2.1 ระบบสายอากาศปรับตัวที่นำเสนอ



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศปรับตัว CMA ที่นำเสนอ

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ สายอากาศปรับเฟสที่ปรับตัวได้โดยใช้ CMA ที่นำเสนอ. สัญญาณเชิงซ้อนที่รับโดยสายอากาศแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับถูกเลื่อนเฟสโดยใช้วงจรเลื่อนเฟสหนึ่งบิตสี่ตัวโดยในที่นี้สายอากาศอ้างได้ว่าเป็นอุปกรณ์ราคาถูก หลังการเลื่อนเฟส อินพุต  $x_i(k)$  ของ CMA จะถูกคูณค่าตัวถ่วงน้ำหนักเชิงซ้อนที่สามารถปรับได้  $w_i(k)$  เอาท์พุทของสายอากาศ  $y(k)$  ได้จากการรวมกันของผลคูณ  $x_i(k)w_i(k)$ , นั่นคือ  $y(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x_i(k)w_i(k)$  โดยที่  $N$  เป็นจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศ CMA จะปรับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weight vectors)  $\vec{w}(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{N-1}(k)]^T$  ในวิธีที่ว่าฟังก์ชันประสิทธิภาพที่ขนาดคงที่ (the constant modulus cost function)  $J(\vec{w}(k)) = \{[\vec{w}^T(k)\vec{x}(k)]^2 - 1\}$  ถูกทำให้น้อยที่สุด โดยที่  $\vec{x}(k) = [x_0(k), x_1(k), \dots, x_{N-1}(k)]^T$  นั่นคือตัวถ่วงน้ำหนักถูกปรับตามสมการนี้

$$\vec{w}(k+1) = \vec{w}(k) - 4\mu \vec{x}(k)y^*(k)(|y(k)|^2 - 1) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

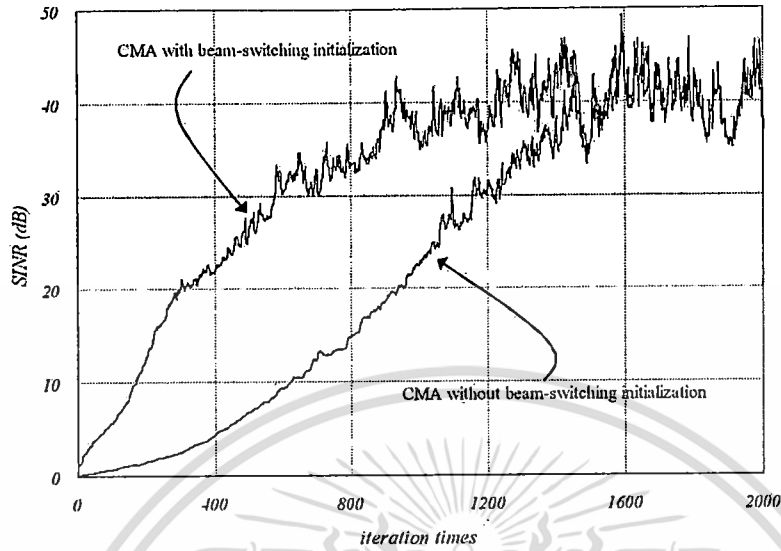
สังเกตว่าโครงสร้างซึ่งได้อธิบายข้างต้นแตกต่างจากแถวลำดับ CMA โดยทั่วไป โดยสัญญาณเชิงซ้อนได้ถูกป้อนให้ CMA โดยตรงเพื่อการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก

## 2.2 การจำลอง

การจำลองได้ถูกกระทำเพื่อประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศปรับตัวที่นำเสนอ สายอากาศเป็นแถวลำดับปรับเฟสที่แบนกะทัดรัดสี่ลำคลื่น โดยที่คุณสมบัติของสายอากาศได้แสดงใน[1] สัญญาณพืงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดถูกมอดูเลตแบบ  $\pi/4$ -QPSK และแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ AWGN (additive white Gaussian noise) ในทางปฏิบัติ ของสภาพแวดล้อมไร้สาย กำลังงานที่รับได้ของสัญญาณแทรกสอดซึ่งเกิดจากช่องสัญญาณร่วมและการจางหายหลายวิถีปกติจะมีค่าน้อยกว่ากำลังงานของสัญญาณพืงประสงค์ ดังนั้นในการจำลองจึงได้กำหนดให้กำลังงานของสัญญาณพืงประสงค์มีค่ามากกว่ากำลังงานของสัญญาณแทรกสอด 3 dB ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขการจำลองซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ 1 มุมที่ตกกระทบของสัญญาณพืงประสงค์อยู่ใกล้กับทิศทางของลำคลื่นหลักที่ใช้เริ่มต้นมากกว่าทิศทางของสัญญาณแทรกสอด กรณีที่ 2 สัญญาณแทรกสอดถูกกำหนดให้อยู่ห่างจากเดิมเพื่อสังเกตคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป

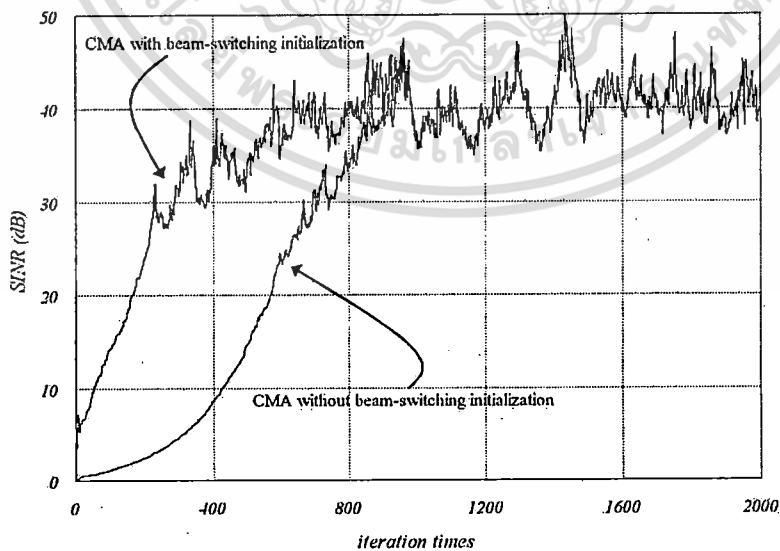
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์การจำลอง

กรณีที่	มุมตกกระทบของ		
	สัญญาณพืงประสงค์ ( $\phi_p$ )	สัญญาณแทรกสอด ( $\phi_i$ )	ลำคลื่นที่เริ่มต้น ( $\phi_0$ )
1	30°	80°	45°
2	30°	120°	45°



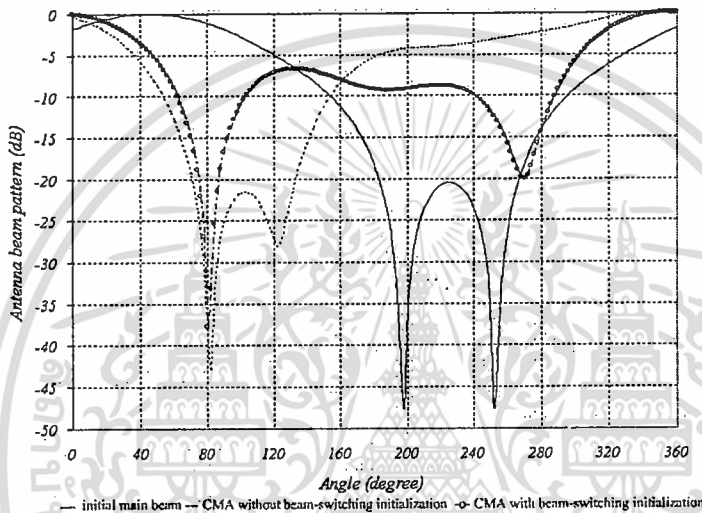
รูปที่ 2 แบบ โจร SINR ของ CMA ในกรณีที่ 1

ในกรณี 1 มุมตกกระทบของสัญญาณพึงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดเป็น  $30^\circ$  และ  $80^\circ$  ตามลำดับ ด้วยกำลังงานของสัญญาณที่รับได้มากที่สุด ถ้าคลื่นหลักที่ใช้เริ่มต้นจะทำมุม  $45^\circ$  ซึ่ง ได้จากการเลือกเฟสของแต่ละองค์ประกอบเป็น  $-40^\circ$   $40^\circ$   $40^\circ$  และ  $-40^\circ$  รูปที่ 2 แสดงอัตราการเริ่มต้นในกรณีที่ 1 ของ CMA ซึ่งเป็นการใช้และไม่ใช้การเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่น จากรูปจะเห็นสายอากาศแถวลำดับที่นำเสนอที่ใช้การเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นจะมีว่าอัตราการลู่เข้าที่มากกว่าอัตราการลู่เข้าด้วยการเริ่มต้นแบบธรรมดา



รูปที่ 3 แบบ โจร SINR ของ CMA ในกรณีที่ 2

ในกรณีที่ 2 ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ถูกย้ายไปที่  $\phi=120^\circ$  รูปที่ 3 แสดงคุณสมบัติการลู่เข้า ซึ่งแสดงอย่างเห็นได้ชัดว่า อัตราการลู่เข้าของ CMA ซึ่งเริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นยังคงมากกว่าอัตราการลู่เข้าของ CMA ที่ไม่ใช้การปรับลำคลื่น นอกจากนี้ กรณีที่ 2 มีอัตราการลู่เข้าที่เร็วกว่ากรณีที่ 1 อัตราการลู่เข้าจะลดลงถ้าสัญญาณแทรกสอดอยู่ห่างจากทิศทางของลำคลื่นหลักที่ใช้เริ่มต้นมากขึ้น



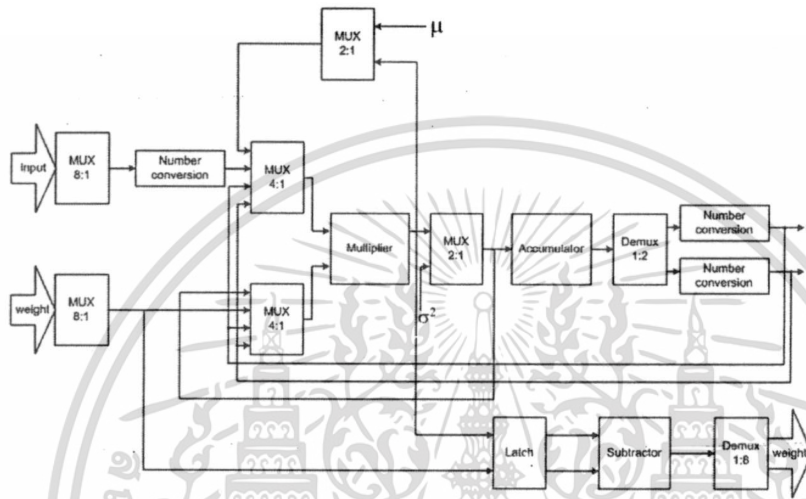
รูปที่ 4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่ 1 หลังการทำซ้ำ 2,000 ครั้ง

นอกจากนี้ จะยืนยันคุณสมบัติการลู่เข้าว่าสามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้จริง โดยการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่ 1 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 จากรูปจะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากลำคลื่นที่เริ่มต้นและสายอากาศปรับตัวที่ใช้ CMA ที่เริ่มต้นด้วยการปรับลำคลื่นและไม่ปรับลำคลื่น สังเกตว่าสัญญาณแทรกสอดได้ถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์แบบ

### 2.3 ส่วนประมวลผลปรับตัว CMA โดยใช้ FPGA

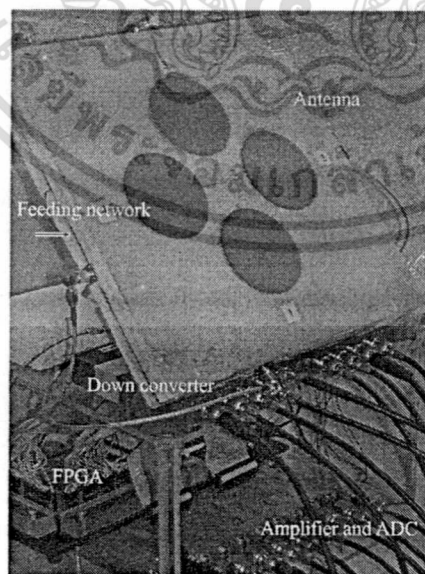
สายอากาศแถวลำดับปรับตัวจะสำเร็จได้โดยใช้ ส่วนประมวลผลปรับตัว ส่วนประมวลผลปรับตัวนี้ได้ถูกสร้างโดยใช้ FPGA และใช้อัลกอริทึม CMA เป็นอัลกอริทึมในการปรับตัว รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของหน่วยประมวลผลปรับตัว CMA หน่วยประมวลผลเป็น floating-point Multiply and Accumulate (MAC)-การดำเนินการของ floating-point สามารถลดปัญหาของการตัดบิตและค่าคงที่การลู่เข้าที่มีค่าน้อยได้ ส่วนประมวลผล CMA ประกอบด้วย วงจรคูณ วงจรสะสม วงจรบวก-ลบ วงจร

มัลติเพล็กซ์ วงจรดีมัลติเพล็กซ์ แล็ตช์ วงจรเปลี่ยน floating-point เป็น fixed-point และส่วนการควบคุม หน่วยประมวลผลรับอินพุต 8 บิต จากช่องสัญญาณ I และ Q ของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศปรับตัว จากที่สายอากาศที่มี 4 องค์ประกอบ ช่องสัญญาณอินพุตจะมี 8 ช่อง นอกจากนี้ ช่องสัญญาณเอาต์พุต I และ Q เป็นช่องสัญญาณ 12 บิต ทั้งหมดนี้หน่วยประมวลผลจะทำงานเป็น real-time



รูปที่ 5 โครงสร้างของหน่วยประมวลผลปรับตัว CMA

## 2.4 ผลการทดสอบ



รูปที่ 6 ต้นแบบสายอากาศปรับตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 แสดงต้นแบบของสายอากาศปรับตัว รายละเอียดเป็นไปตามตารางที่ 2 ระบบประกอบด้วยสายอากาศรับ ตัวแปลงความถี่ I และ Q ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) และหน่วยประมวลผลสัญญาณ สายอากาศเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่เบนกะทัดรัดสี่ลำคลื่นซึ่งถูกเอียงเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ตามที่กำหนด สัญญาณ RF ซึ่งรับจากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบถูกเปลี่ยนความถี่จาก 1.95 GHz เป็นสัญญาณ IF ที่ความถี่ 50 kHz โดยผ่านตัวแปลงความถี่ I และ Q (MAX2102) สัญญาณ IF I และ Q ถูกขยายโดย Op-Amp เบอร์ OPA842 1 และถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัลโดย ADC เบอร์ AD831 โดยความถี่ที่ใช้ซิกตัวอย่าง (sampling) เท่ากับ 250 kHz สัญญาณที่ได้จะถูกประมวลโดย FPGA

ตารางที่ 2 รายละเอียดของต้นแบบสายอากาศปรับตัว

RF frequency	1.95 GHz
Antenna	A flat four-beam compact phased array antenna
IF frequency	50 kHz
Modulation	$\pi/4$ -QPSK
Modulation bit rate	10 kbps
ADC sampling rate	250 kHz
ADC	Eight 8-bit channels
ASIC for DSP	Xilinx Vertex-E XCV400E FPGA
Master clock frequency	16 MHz

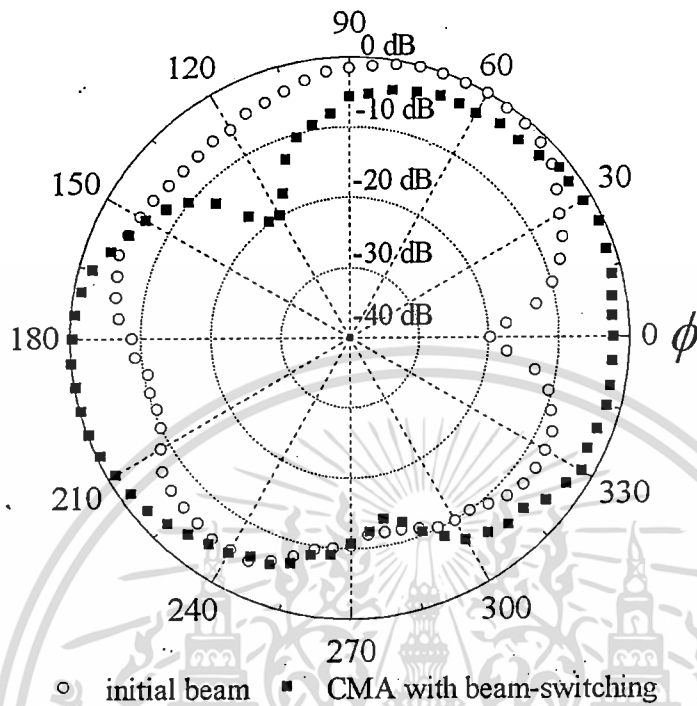
สายอากาศได้ถูกทดสอบในห้องกว้างดังที่แสดงในรูปที่ 7 สัญญาณพึงประสงค์และสัญญาณแทรกสอดตกกระทบทำมุม  $30^\circ$  และ  $120^\circ$  ตามลำดับโดยสัญญาณทั้งสองมอดูเลตเป็นแบบ  $\pi/4$ -QPSK ด้วยอัตรา 10 kbps ระยะระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งเท่ากับ 3 เมตร โดยที่สายอากาศสูง 1.3 เมตร



รูปที่ 7 การติดตั้งระบบทดสอบ

ลำคลื่นหลักของสายอากาศถูกปรับให้ชี้ไปที่ทิศ  $\phi_0$  ดังนี้คือ  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  และ  $315^\circ$  ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่รับกำลังงานได้สูงสุด  $\phi_0$  เป็น  $60^\circ$  ดังที่แสดงในรูปที่ 8 โดยที่ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (SINR) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.6 dB และ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นศูนย์ (null) ที่มุม  $100^\circ$  ลำคลื่นดังกล่าวจะถูกใช้เป็นลำคลื่นเริ่มต้น หลังจากการปรับตัวโดยใช้อัลกอริทึม CMA แล้ว SINR จะดีขึ้นเป็น 19.2 dB โดยลำคลื่นหลักชี้ไปที่มุม  $27^\circ$  และ null ปรากฏที่มุม  $123^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบ

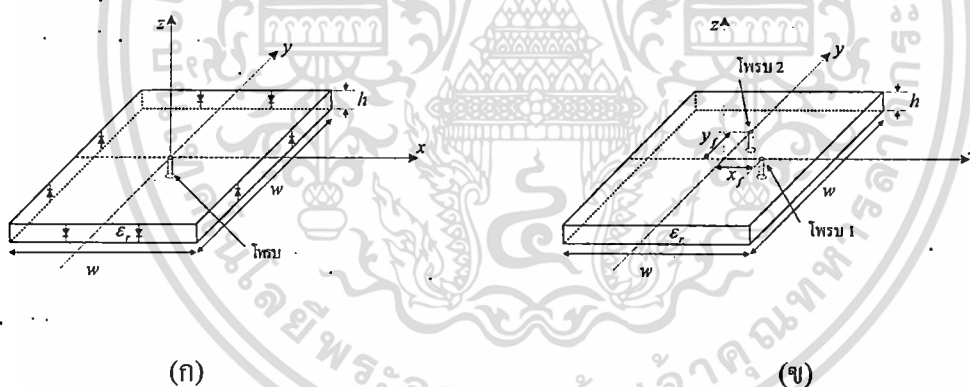
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบที่สวิตช์ล้าเคลื่อนได้

### 3.1 ความเป็นมา

ในงานที่เกี่ยวกับการเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference Ratio: SIR) ของระบบสื่อสารไร้สายจะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชนิด ได้แก่ ส่วนประมวลผล ตัวรวมสัญญาณ ตัวแยกกำลังงาน วงจรเลื่อนเฟส และสายอากาศแถวลำดับ ดังเช่นใน [4] และ [5] สำหรับในงานที่ต้องการลดสัญญาณแทรกสอดนั้นจะใช้การประมวลสัญญาณเป็นหลัก โดยจะพิจารณาให้สายอากาศแต่ละตัวในระบบเป็นสายอากาศไอโซทรอปิก แต่สำหรับใน [4] และ [5] ได้ใช้คุณสมบัติการแผ่คลื่นของสายอากาศเป็นองค์ประกอบด้วย ในระบบนี้จะประกอบด้วยสายอากาศสี่ตัว โดยที่สายอากาศและตัวมีแบบรูปการแผ่คลื่นสองทิศทางและยังสามารถปรับทิศทางของลำคลื่นได้สองทิศทาง ซึ่งสามารถช่วยให้เวลาในการประมวลผลลดลงได้ดังที่แสดงใน [5]



(ก)

(ข)

รูปที่ 9 สายอากาศไมโครสตริปจัตุรัสใช้งานเป็นสายอากาศสวิตช์ล้าเคลื่อน

(ก) เลือกลักษณะการแผ่คลื่นโดยใช้การบังคับไดโอดพิน

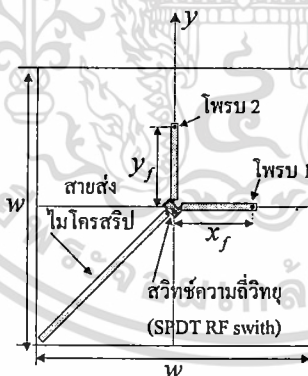
(ข) เลือกลักษณะการแผ่คลื่นโดยการเลือกตำแหน่งการป้อนโพรบ

สายอากาศที่ใช้ใน [4] และ [5] เป็นสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างจากแผ่นปริ้นท์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง  $w$  โดยกราวด์ของสายอากาศมีขนาดเท่ากับตัวสายอากาศ มีโพรบป้อนสัญญาณอยู่ที่จุดศูนย์กลางของตัวสายอากาศ ที่ขอบแต่ละด้านจะมีไดโอดพิน (PIN-diode) อยู่ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) หลักการแผ่คลื่นได้อธิบายใน [4] และ [6] ซึ่งจะเลือกให้สายอากาศแผ่คลื่นออกใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองทิศทางคือในแกน  $\pm x$  หรือ  $\pm y$  โดยการบังคับไดโอดพินให้ทำงาน ด้านที่ไบอัสย้อนกลับไดโอดพินจะเป็นด้านที่แผ่นลื่นออกไป จะเห็นว่ากรณีที่ปรับทิศทางได้นั้นสายอากาศหนึ่งตัวจะต้องใช้ไดโอดพินจำนวน 8 ตัว และถ้านำไปใช้ในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีสายอากาศสี่ตัวจะต้องใช้ไดโอดพินทั้งหมด 32 ตัว จะเห็นว่าการสร้างตัวสายอากาศจะมีความยุ่งยากในการติดตั้งไดโอดพินและยังต้องมีสายไฟที่ใช้ในการบังคับไดโอดพินจำนวนมาก เป็นผลให้มีโครงสร้างของระบบสายอากาศมีความซับซ้อน โดยทั่วไประบบการเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดนั้นจะใช้กับสถานีฐาน แต่ถ้าต้องการนำระบบนี้มาใช้บนอุปกรณ์มือถือ ระบบควรที่จะมีอุปกรณ์น้อยลงเพื่อที่จะลดความซับซ้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอสายอากาศที่มีโครงสร้างที่มีอุปกรณ์น้อยกว่าสายอากาศที่กล่าวมาแต่สามารถมีคุณสมบัติการแผ่คลื่นเช่นเดียวกัน สายอากาศนี้มีลักษณะดังในรูปที่ 9 (ข) คือเป็นสายอากาศไมโครสตริปจตุรัสสร้างจากแผ่นปริ้นท์เช่นเดียวกับสายอากาศข้างต้น แต่จะไม่มีไดโอดพินติดอยู่ที่ขอบของสายอากาศ โดยจะมีจุดป้อนสัญญาณสองที่คือ โพรบ 1 และ โพรบ 2 อยู่ที่ตำแหน่ง  $x_f$  และ  $y_f$  ตามลำดับ ในการใช้งานให้เป็นสายอากาศปรับทิศทางจะเลือกป้อนสัญญาณให้กับโพรบเพียงหนึ่งโพรบเท่านั้น สำหรับการเลือกโพรบนั้นจะใช้สวิตซ์ความถี่วิทยุสองทาง (SPDT RF switch) หนึ่งตัวต่อสายอากาศสวิตซ์ลากลื่นหนึ่งตัวดังแสดงในรูปที่ 10 ทำให้ในระบบจะมีสวิตซ์ทั้งหมดสี่ตัวเท่านั้น จะเห็นว่าสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ได้มาก



รูปที่ 10 การป้อนสายอากาศไมโครสตริปจตุรัสเพื่อใช้งานเป็นสายอากาศสวิตซ์ลากลื่น

ในงานวิจัยนี้จะแสดงหลักการของสายอากาศไมโครสตริปจตุรัสที่เลือกป้อนโพรบเพื่อใช้งาน เป็นสายอากาศสวิตซ์ลากลื่นสองทิศทาง และได้นำสายอากาศนี้มาทำแถวลำดับเพื่อที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสดังในงาน [4] และ [5] โดยกำหนดให้ความถี่ใช้

งาน 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ ผลแบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นและสายอากาศปรับเฟสแถว ลำดับได้คำนวณจากโปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นการคำนวณด้วยวิธีโมเมนต์

### 3.2 สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

โดยทั่วไปการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปแบบสองตำแหน่งนั้นจะใช้เมื่อต้องการให้สายอากาศมีโพลาริเซชันแบบวงกลมหรือแบบสองโพลาริเซชัน และสายอากาศจะทำงานในโหมดพื้นฐานหรือบรอดไซด์อาร์เรย์ (Broadside array) [7] แต่สายอากาศที่ต้องการนี้เป็นสายอากาศปรับทิศทาง โดยจะทำงานที่โหมดสองหรือแบบเอนด์ไฟร์อาร์เรย์ (End-fire array) และมีโพลาริเซชันแบบเส้นตรงในแนวตั้ง สำหรับในงานนี้สายอากาศไมโครสตริปจัดรัสมิโครงสร้างแสดงในรูปที่ 9 (ข) โดยสร้างจากแผ่นปริ้นท์ที่มีความหนา  $h$  มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  เนื่องจากต้องการให้ทำงานที่โหมดสอง สายอากาศจะต้องมีขนาดกว้าง  $w$  เท่ากับ  $\lambda_g$  (โดยที่  $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นในตัวกลางของแผ่นปริ้นท์) ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ 1 หรือ โพรบ 2 ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศเป็นระยะ  $x_r$  อยู่บนแกน  $x$  และ  $y_r$  อยู่บนแกน  $y$  ตามลำดับ ทิศทางการแผ่คลื่นจะกำหนดโดยการเลือกป้อนสัญญาณระหว่างโพรบ 1 หรือ โพรบ 2 อันใดอันหนึ่ง แต่ต้องเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

#### 3.2.1 หลักการของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

ถ้าเลือกป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 ที่ตำแหน่ง  $x_r$  ที่เหมาะสมในรูปที่ 11 (ก) จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองสายส่ง (Transmission line model) [7] จะมีคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ  $\pm y$  และเมื่อสายอากาศมีความยาว  $w$  ตามแกน  $y$  ยาวเท่ากับ  $\lambda_g$  จะทำให้สนามไฟฟ้า  $E_z$  มีขนาดเท่ากันและมีเฟสเดียวกันในขณะที่ช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ  $\pm y$  จะมีสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดตามความยาว  $x$  ซึ่งการกระจายของสนามไฟฟ้าลักษณะนี้คือลักษณะของโหมด  $TM_{020}$  [6] และ [7] (หมายถึงสนามไฟฟ้าจะมีค่าสม่ำเสมอตามแกน  $x$  แต่สนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงสองครั้งถูกคลื่นตามความยาวในแกน  $y$ ) ตามแบบจำลองโพรงสี่เหลี่ยม ซึ่งช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ  $\pm x$  จะเป็นช่องเปิดที่ไม่แผ่คลื่นเนื่องจากสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กจะหักล้างกันหมด ส่วนช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ  $\pm y$  จะเป็นช่องเปิดที่แผ่คลื่น โดยที่สนามไฟฟ้าของทั้งสองช่องเปิดมีเฟสที่ตรงกันแต่มีทิศทางของช่องเปิดตรงข้ามกัน ทำให้ช่องเปิดที่แผ่คลื่นทั้งสองเกิดความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก  $M_z$  บนทั้งสองด้าน แต่จะมีเฟสตรงข้ามกัน (ช่องเปิดทางทิศ  $y$  จะมีค่า  $-M_z$ , ช่องเปิดทางทิศ  $-y$  จะมีค่า  $M_z$ ) ซึ่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบนทั้งสองช่องเปิดนี้จะเป็นตัวกำเนิดการแผ่คลื่นที่มีโพลาริเซชันแบบแนวตั้ง การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นลื่นของสายอากาศจะได้จากการทำแลวลำดับกันของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสองตัวที่มีเฟสตรงข้ามกันวางเรียงตามแกน  $y$  อยู่ห่างกันด้วยระยะ  $K\lambda_0$  (กำหนดให้  $K = w/\lambda_0$  หรือ  $K = \lambda_d/\lambda_0$ ) โดยที่ค่า  $K$  จะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจึงจะทำให้มีการแผ่คลื่นที่ชี้ไปในทิศทาง  $\pm y$  เนื่องจาก  $\lambda_d$  คือค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของแผ่นปรีนท์ที่มีค่าเท่ากับ  $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$  ดังนั้นจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นปรีนท์จะเป็นตัวที่กำหนดขนาดของตัวสายอากาศไมโครสตริปจตุรัส จาก [8] แบบรูปการแผ่คลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ (2) ถ้าเลือกใช้แผ่นปรีนท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีใช้งานอยู่คือ 1, 2.32, 4.4, 6.15 และ 10.2 ซึ่งจะมีค่า  $K$  เท่ากับ 1, 0.659, 0.48, 0.406 และ 0.315 ตามลำดับ จะมีแบบรูปการแผ่คลื่นของสนามแม่เหล็กบนระนาบ  $xy$  ที่มีมุม  $\theta$  เท่ากับ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งแสดงว่า  $K$  จะต้องมีค่ามากกว่าหนึ่ง และค่านี้จะมีผลต่อค่าไดเรกทิวิตีของสายอากาศไมโครสตริปจตุรัสนี้ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3 ถ้ากำหนดให้ความถี่ใช้งานที่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์

ในทำนองเดียวกันถ้าเลือกป้อนสัญญาณที่โพรบ 2 ที่ตำแหน่ง  $y$ , ดังแสดงในรูปที่ 11 (ข) จะทำให้เกิดโหมด  $TM_{200}$  คือช่องเปิดที่อยู่ทางด้าน  $\pm y$  เป็นช่องเปิดที่ไม่แผ่คลื่น แต่ช่องเปิดที่อยู่ทางด้าน  $\pm x$  เป็นช่องเปิดที่แผ่คลื่น ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก  $M_y$  (ช่องเปิดทางทิศ  $x$  จะมีค่า  $-M\hat{a}_x$ , ช่องเปิดทางทิศ  $-x$  จะมีค่า  $M\hat{a}_x$ ) เป็นตัวกำเนิดการแผ่คลื่น จึงได้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสองตัวที่มีเฟสตรงข้ามกันวางเรียงตามแกน  $x$  ด้วยระยะห่าง  $K$  ที่น้อยกว่าหนึ่งจะทำให้แผ่คลื่นไปในทาง  $\pm x$  และมีโพลาริเซชันในแนวตั้งเช่นกัน



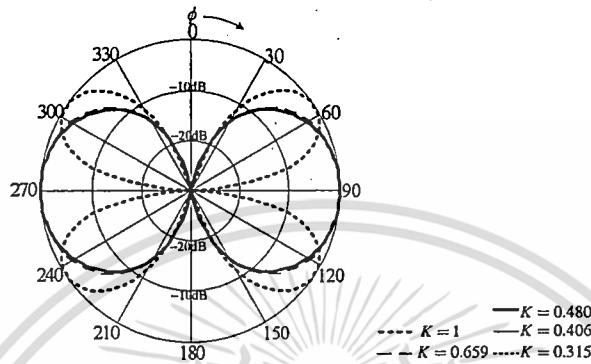
รูปที่ 11 โหมดของสายอากาศไมโครสตริปจตุรัส

(ก)  $TM_{020}$  เมื่อป้อนสัญญาณที่โพรบ 1 (ข)  $TM_{200}$  เมื่อป้อนสัญญาณที่โพรบ 2

$$E_\theta = \begin{cases} C \sin \phi (1 + \sin \phi) \frac{\sin(X)}{X} \cos\left(Y + \frac{\pi}{2}\right) & \text{: ป้อนสัญญาณที่โพรบ 1} \\ C \cos \phi (1 + \cos \phi) \frac{\sin(Y)}{Y} \cos\left(X + \frac{\pi}{2}\right) & \text{: ป้อนสัญญาณที่โพรบ 2} \end{cases} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $X = \frac{kK\lambda_0}{2} \sin \theta \cos \phi$ ,  $Y = \frac{kK\lambda_0}{2} \sin \theta \sin \phi$   
 $C = j \frac{kvhE_0 e^{-jkr}}{4\pi r}$  และ  $K = w/\lambda_0$



รูปที่ 12 แบบรูปการแผ่คลื่นเมื่อเปลี่ยนค่า K โดยป้อนสัญญาณให้กับ โพรบ 1

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์และคุณสมบัติของสายอากาศ

ตัวกลาง h=0.8 มม.		ความถี่ 2.45 GHz			
$\epsilon_r, \tan \delta$	$\lambda_d$ (mm)	$K$	$x_f / \lambda_0$	โคเรคทีวิตี (dBi)	
2.32, 0.0005	80.4	0.659	0.192	4.49	
4.4, 0.02	58.8	0.480	0.114	5.67	
6.15, 0.0013	49.41	0.406	0.102	5.93	
10.2, 0.0013	38.34	0.315	0.075	6.15	

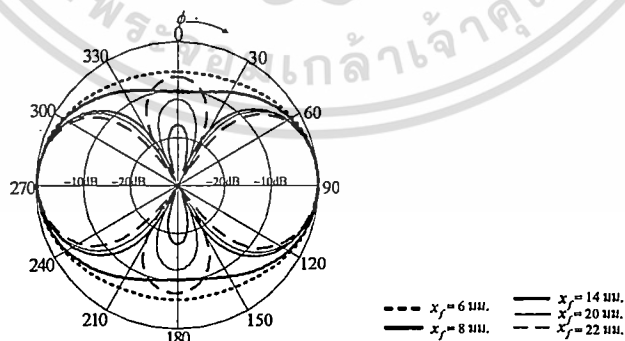
ในการใช้งานจะสามารถกำหนดทิศทางของการแผ่คลื่นของสายอากาศได้โดยการเลือกป้อนสัญญาณให้กับ โพรบ 1 หรือ โพรบ 2 แต่ลักษณะแบบรูปการแผ่คลื่นและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณคือ  $x_f$  และ  $y_f$  ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่คลื่นที่เหมาะสมและสามารถแมตช์ได้ง่าย ดังนั้นจึงได้คำนวณแบบรูปการแผ่คลื่น ค่าอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การกระเจิงเพื่อให้ได้ตำแหน่งป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปจตุรัสที่เหมาะสม

### 3.2.2 ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับแบบรูปการแผ่คลื่น

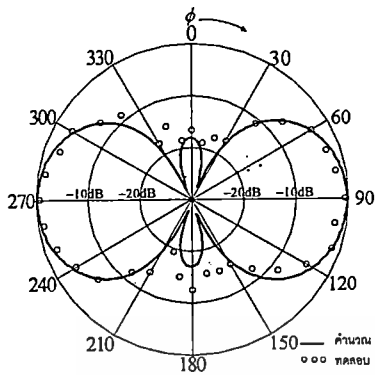
ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้สายอากาศทำงานที่โหมดสองใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต โดยเลือกใช้แผ่นปรีนท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 มีความสูง 0.8 มิลลิเมตร จะทำให้สายอากาศมีความกว้าง  $w$  เท่ากับ 58.8 มิลลิเมตร เมื่อป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 ส่วนโพรบ 2 จะต่อกับความต้านทาน 50 โอห์ม หมายถึงต้องการให้มีการแผ่คลื่นไปในทิศทาง  $\pm y$  หรือ  $\phi$  เท่ากับ 90 และ 270 องศา แสดงผลของแบบรูปการแผ่คลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนได้ดังในรูปที่ 13 ซึ่งแสดงแบบรูปการแผ่คลื่นขณะที่  $x_f$  อยู่ที่ตำแหน่ง 6, 8, 14, 20 และ 22 มิลลิเมตร จะได้แบบรูปการแผ่คลื่นที่มีทิศทางในมุม  $\phi$  เท่ากับ 90 และ 270 องศา ตามที่ต้องการ จะเห็นว่าถ้าตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น (จาก 6 ถึง 14 มิลลิเมตร) การแผ่คลื่นที่มุม  $\phi$  เท่ากับ 0 และ 180 องศา จะลดลงและจะกลับเพิ่มขึ้นมาอีกถ้าเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณเพิ่มขึ้น (จาก 14 ถึง 22 มิลลิเมตร)

ถ้าจะนำสายอากาศนี้ไปใช้สำหรับเป็นสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟส จะต้องมีการแผ่คลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการน้อยกว่า -10 dB ดังนั้นตำแหน่งป้อนสัญญาณที่สามารถจะให้แบบรูปการแผ่คลื่นในลักษณะที่ต้องการจะอยู่ในช่วง 8 ถึง 20 มิลลิเมตร แต่จะดีที่สุดที่ตำแหน่ง 14 มิลลิเมตร เพราะที่มุม  $\phi$  เท่ากับ 0 และ 180 องศา มีการแผ่คลื่นที่น้อยที่สุด

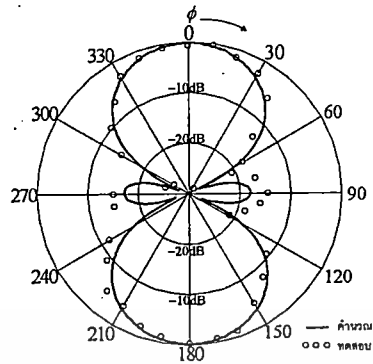
ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นของสายอากาศได้แสดงเทียบกับผลการคำนวณในรูปที่ 14 (ก) และ (ข) เป็นผลการทดสอบค่ากำลังงานสัมพัทธ์ในมุมระนาบ (ระนาบ xy หรือ ระนาบสนามแม่เหล็ก) ด้วยการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง  $x_f$  (โพรบ 1) และ  $y_f$  (โพรบ 2) ตามลำดับ และในรูปที่ 14 (ค) เป็นผลการทดสอบและคำนวณของกำลังงานสัมพัทธ์ของระนาบสนามไฟฟ้าในมุมที่มีการแผ่คลื่นมากที่สุด ในระนาบ xy ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณ



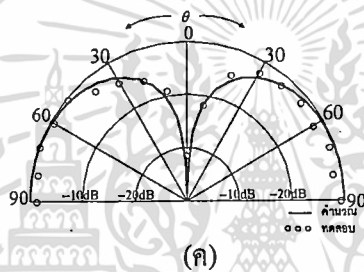
รูปที่ 13 ผลการคำนวณแบบรูปการแผ่คลื่นตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ



(ก)



(ข)



(ค)

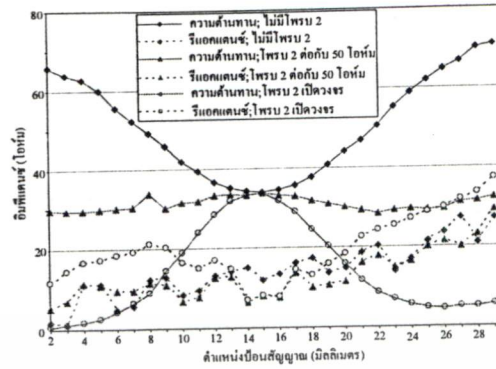
รูปที่ 14 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่น (ก) ระบายสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนสัญญาณให้กับ โพรบ 1  
 (ข) ระบายสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนสัญญาณให้กับ โพรบ 2 (ค) ระบายสนามไฟฟ้า

3.2.3 ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับค่าอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การกระเจิง

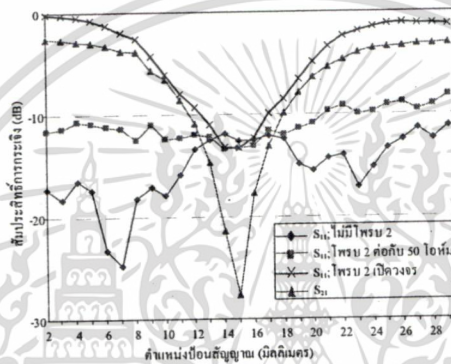
ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้เปลี่ยนแปลงตำแหน่งป้อนสัญญาณตั้งแต่ 2 ถึง 29 มิลลิเมตร เนื่องจากสายอากาศนี้มีโพรบป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง ในการใช้งานจะเลือกป้อนสัญญาณเพียงโพรบเดียวเท่านั้น ซึ่งจะใช้โพรบ 1 ในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่โพรบ 1 แต่โพรบที่ไม่ได้ป้อนสัญญาณคือโพรบ 2 จะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโพรบ 1 ด้วย ในการคำนวณจึงได้เทียบกับในกรณีที่โพรบ 2 ได้ต่อกับค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และกรณีที่โพรบ 2 เปิดวงจรไว้ และยังได้แสดงในกรณีที่ตัวสายอากาศมีโพรบที่ป้อนสัญญาณเพียงโพรบเดียว

จากผลในรูปที่ 15 (ก) ค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ โดยที่จะมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณอยู่ที่ 13 ถึง 16 มิลลิเมตร ในทั้งสามกรณี แต่ที่ตำแหน่งอื่นๆ ค่าความต้านทานจะต่างกันมาก โดยแตกต่างกันมากกว่าค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งตำแหน่งที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางและอยู่ใกล้กับขอบของสายอากาศจะมีความแตกต่างกันมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

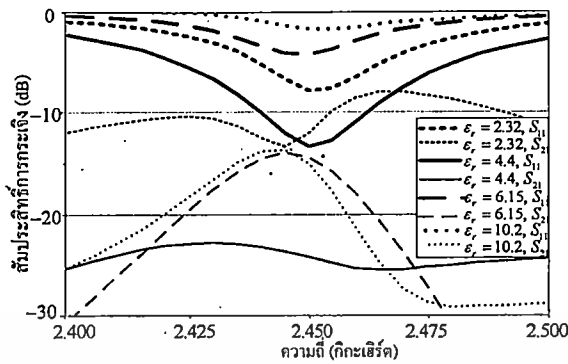


(ข)

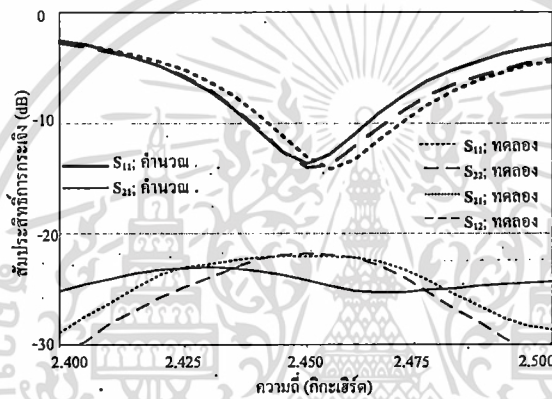
รูปที่ 15 ผลการปรับตำแหน่งของโพรบ (ก) ค่าอิมพีแดนซ์ (ข) สัมประสิทธิ์การกระเจิง

ถ้าพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $S_{21}$ ) ในรูปที่ 15 (ข) การป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 13 ถึง 16 มิลลิเมตร  $S_{11}$  ของทั้งสามกรณีจะใกล้เคียงกันมากแต่จะต่างกันที่ตำแหน่งอื่น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะบอกถึงผลของโพรบที่ไม่ได้ป้อนสัญญาณ สำหรับกรณีที่โพรบ 2 ต่อกับความต้านทาน 50 โอห์ม จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากรณีที่โพรบ 2 เป็ดวงจร จะเห็นได้ว่ากรณีที่โพรบ 2 ต่อกับความต้านทาน  $S_{11}$  มีค่าต่ำที่สุดที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตร และมี  $S_{21}$  ที่ต่ำกว่า -20 dB ถือว่ามีผลกระทบจากโพรบ 2 น้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการใช้งานและเป็นตำแหน่งที่มีแบบรูปการแผ่คลื่นตามที่ต้องการด้วย

จากการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตรนี้จะทำให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงที่ตอบสนองตามความถี่ดังรูปที่ 16 (ก) และได้แสดงสำหรับในกรณีที่ใช้แผ่นปริ้นท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอื่นคือ 2.23, 6.15 และ 10.2 เมื่อป้อนสัญญาณตรงตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละกรณี จะเห็นว่าถ้าใช้แผ่นปริ้นท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 จะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่ำที่สุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 16 สัมประสิทธิ์การกระเจิง

- (ก) ผลการคำนวณ ในกรณีที่ใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าต่างๆ
- (ข) ผลการทดสอบที่ใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4

ในรูปที่ 16 (ข) แสดงผลการคำนวณและผลการวัดในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับผลการคำนวณเนื่องจากสายอากาศมีความสมมาตรกันจึงแสดงเฉพาะ  $S_{11}$  กับ  $S_{21}$  แต่สำหรับผลการทดสอบได้แสดง  $S_{11}$   $S_{21}$   $S_{12}$  และ  $S_{22}$  โดยที่  $S_{11}$  กับ  $S_{12}$  และ  $S_{22}$  กับ  $S_{21}$  สำหรับการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง  $x_r$  และ  $y_r$  ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้จะมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณ แต่จะเลื่อนไปทางด้านความถี่สูง

ในหัวข้อที่ 2 ได้แสดงหลักการของสายอากาศสวิทช์ค่าคลื่น จะเห็นว่าขนาดของสายอากาศจะมีขนาดเล็กถ้าสร้างจากแผ่นปรินท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและได้แสดงว่าตำแหน่งของการป้อนสัญญาณจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่คลื่น ค่าอิมพีแดนซ์ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ โดยได้คำนวณ

และทดสอบสายอากาศที่สร้างด้วยแผ่นปรินท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ต่ำที่สุด แต่สำหรับแบบรูปการแผ่คลื่นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทุกค่าจะสามารถให้แบบรูปการแผ่คลื่นที่เหมาะสมได้เมื่อป้อนสัญญาณตรงตำแหน่งที่เหมาะสม

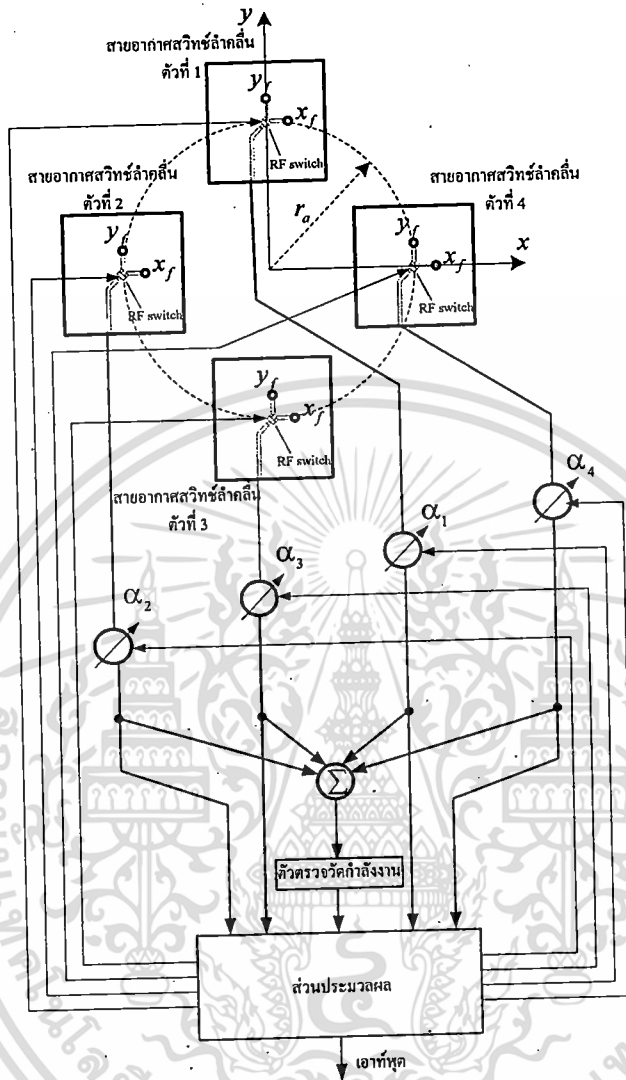
### 3.3 สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นเป็นส่วนประกอบ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นในหัวข้อที่ 2 มาเป็นส่วนประกอบของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสซึ่งจะใช้สำหรับเป็นสายอากาศรับสัญญาณ โครงสร้างของระบบแสดงดังในรูปที่ 17 ประกอบด้วยส่วนประมวลผล ส่วนรวมกำลังงาน ส่วนตรวจวัดกำลังงาน ตัวปรับค่าเฟส และสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นจำนวนสี่ตัวนำมาทำแถวลำดับแบบวงกลม โดยตำแหน่งมุมของสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 อยู่ที่มุม  $\phi$  เท่ากับ 90, 180, 270 และ 0 องศา ตามลำดับ และแต่ละตัวจะมีการปรับค่าเฟสเป็น  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  และ  $\alpha_4$  องศา ตามลำดับ สำหรับในรายงานนี้จะแสดงการปรับค่าเฟสและการสวิตช์ลาคลิ้นของสายอากาศแต่ละตัวเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่คลื่นชี้ทิศทางที่ครอบคลุมในระนาบ xy จากการปรับเฟสของสายอากาศแต่ละตัวเพียงสองสถานะและปรับทิศทางของสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นแต่ละตัว โดยการกำหนดให้สัญญาณที่จะรับมาทางมุมยก  $\theta_0$  เท่ากับ 45 องศา

เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับเป็นลักษณะวงกลมดังนั้นจะต้องพิจารณาให้รัศมี  $r_n$  ของการทำแถวลำดับมีค่าที่เหมาะสมด้วย โดยการพิจารณาจะต้องการแบบรูปที่ชี้ทิศทางไปที่มุม  $\theta_0$  เท่ากับ 45 องศา และมุม  $\phi_0$  เท่ากับ 45 องศา รัศมีของแถวลำดับที่จะพิจารณามี 3 ค่าด้วยกันคือ 0.3 $\lambda_0$ , 0.4 $\lambda_0$  และ 0.5 $\lambda_0$  ซึ่งแต่ละค่าจะมีค่าเฟสที่ป้อนให้สายอากาศแต่ละตัวที่ต่างกันคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3) จาก [8] จะได้ค่าของเฟสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ 4

$$\alpha_n = -kr_n \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (3)$$

โดยที่  $\phi_n$  คือมุมของตำแหน่งสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นแต่ละตัว

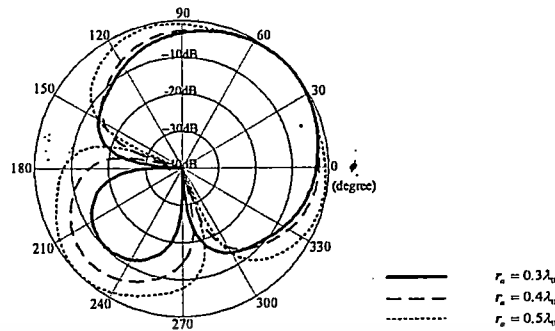


รูปที่ 17 ระบบของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้ส่วนประกอบที่สวิตช์ล้าคลื่นได้

ตารางที่ 4 ค่าของเฟสที่ป้อนให้กับสายอากาศสวิตช์ล้าคลื่นแต่ละตัว

$r_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
$0.3\lambda_0$	$-54^\circ$	$54^\circ$	$54^\circ$	$-54^\circ$
$0.4\lambda_0$	$-72^\circ$	$72^\circ$	$72^\circ$	$-72^\circ$
$0.5\lambda_0$	$-90^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$-90^\circ$

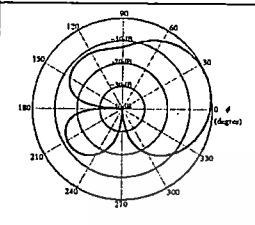
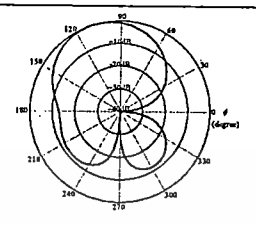
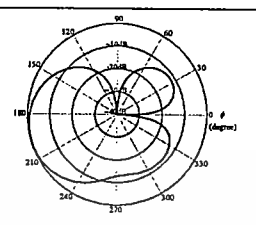
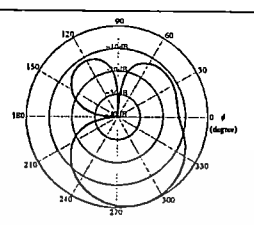
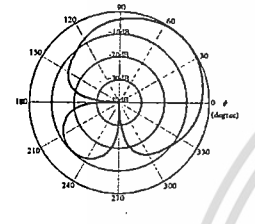
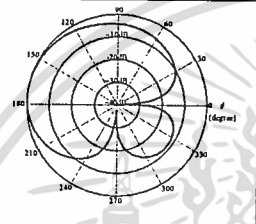
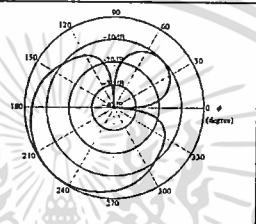
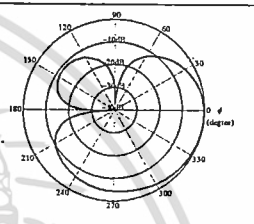
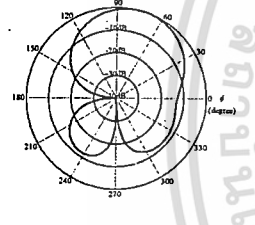
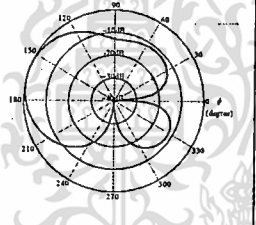
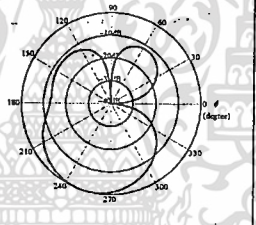
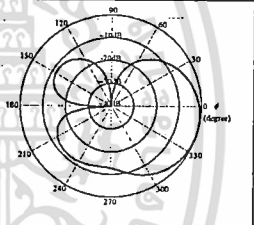
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 แบบรูปการแผ่คลื่นที่ต้องการให้ชี้ทิศทางที่  $\theta_0$  และ  $\phi_0$  เท่ากับ 45 องศา

จากข้อมูลค่าเฟสในตารางที่ 4 และกำหนดให้สายอากาศสวิตซ์ลากลื่น ตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 มีการชี้ทิศทางในแกน  $y$ ,  $y$ ,  $x$  และ  $x$  ตามลำดับจะได้แบบรูปการแผ่คลื่นที่ชี้ไปที่มุม  $\phi_0$  ที่ 45 องศา ตามที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 18 จากรูปจะเห็นว่าถ้ารัศมีของแฉกลำดับมีค่า  $0.5\lambda_0$  จะทำให้มีโหลบหลังที่สูงมากและจะลดต่ำลงเมื่อค่ารัศมีลดลง ที่รัศมี  $0.3\lambda_0$  จะมีโหลบหลังต่ำที่สุดคือ  $-10$  dB ดังนั้นจึงเป็นค่ารัศมีที่สมควรจะนำมาใช้ในการทำแฉกลำดับ แต่สายอากาศสวิตซ์ลากลื่นที่จะใช้ต้องเป็นสายอากาศที่สร้างจากแผ่นปรินท์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10.2 เพราะจะมีขนาดที่เล็กพอสำหรับการทำแฉกลำดับที่มีรัศมี  $0.3\lambda_0$  ค่าเฟสที่จะป้อนให้กับสายอากาศสวิตซ์ลากลื่นแต่ละตัวเป็น 54 หรือ  $-54$  องศา เมื่อปรับค่าเฟสและทิศทางของสายอากาศสวิตซ์ลากลื่นดังกล่าวจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่คลื่นที่ชี้ทิศทางทั้งหมด 12 ทิศทาง ซึ่งจะสามารถครอบคลุมในมุมระนาบดังแสดงในตารางที่ 5 จากการปรับค่าต่างๆนี้ จะใช้ตรวจหาสัญญาณที่จะรับว่าเข้ามาใกล้กับมุมใด เพื่อที่จะให้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณปรับเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสำหรับการประมวลผลใน [5]

ตารางที่ 5 แบบรูปการแผ่คลื่นเมื่อปรับค่าเฟสและทิศทางของสายอากาศสี่ทิศทางลัดคลื่นแต่ละตัว

ค่าเฟสที่ป้อน $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ และ $\alpha_4$			
$-54^\circ, 54^\circ, 54^\circ$ และ $-54^\circ$	$-54^\circ, -54^\circ, 54^\circ$ และ $54^\circ$	$54^\circ, -54^\circ, -54^\circ$ และ $54^\circ$	$54^\circ, 54^\circ, -54^\circ$ และ $-54^\circ$
			
xxxx	yyyy	xxxx	yyyy
			
yyxx	yxyx	yyxx	yxyx
			
yyyy	xxxx	yyyy	xxxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ปรับตัวได้โดยใช้ CMA ระบบของสายอากาศประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่แบนกะทัดรัดสี่ลำคลื่น และหน่วยการประมวลผลที่ปรับตัวโดย CMA การจำลองด้วยพารามิเตอร์ของสายอากาศได้พิสูจน์ว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถเพิ่มอัตราการรู้เข้าของ CMA ได้ โดยที่สายอากาศที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้ไม่ต้องใช้สัญญาณอ้างอิงซึ่งแตกต่างจาก [2]-[3] นอกจากนี้ยังได้สร้างสายอากาศปรับตัวต้นแบบและทำการทดสอบสายอากาศดังกล่าว ผลการทดสอบพบว่าสายอากาศสามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ได้แสดงหลักการทำงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นซึ่งเป็นสายอากาศไมโครสตริป จัตุรัสเพื่อใช้แทนสายอากาศของเดิม โดยที่จะสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ปรับทิศทางลงได้มาก ทำให้ลดความซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสำหรับใช้งานบนอุปกรณ์มือถือ และได้แสดงถึงค่ารีซีมของการทำแถวลำดับแบบวงกลมที่เหมาะสมคือต้องมีรีซีมเท่ากับ  $0.3\lambda_0$  เพราะจะได้แบบรูปการแผ่คลื่นที่มีโหลบหลังน้อยที่สุดคือ  $-10\text{dB}$  จากนั้นได้แสดงแบบรูปการชี้ทิศทางที่ครอบคลุมในระนาบ  $xy$  จากการปรับค่าเฟสและทิศทางของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว

## บทที่ 5

### เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Krairiksh, P. Ngamjanyaporn and C. Kessuwan, "A Flat Four-Beam Compact Phased Array Antenna," *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, Vol. 12, No 5, May 2002.
- [2] R. Yonezawa and I. Chiba, "A Combination of Two Adaptive Algorithms SMI and CMA," *IEICE Trans. Commun.*, VOL.E84-B, No.7, July 2001.
- [3] Y. Chen, T. Le-Ngoc, B. Champagne, and C. Xu, "Recursive Least Squares Constant Modulus Algorithm for Blind Adaptive Array," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 52, No. 5, May 2004.
- [4] P. Ngamjanyaporn, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, "Signal-to-interference ratio improvement by using a phased array antenna of switched-beam elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no: 5, pp 1819-1828, May 2005.
- [5] A. Boonpoonga, P. Sirisuk, and M. Krairiksh, "A Switch-Beam Element Phased Array Antenna for CMA Initialization," Proceedings of EuMC 2006.
- [6] P. Ngamjanyaporn and M. Krairiksh, "Switched-beam single patch antenna," *Electron. Lett.*, vol.38, no. 1, pp. 7-8, Jan. 2002.
- [7] G. Kumar and K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House, 2003.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Son, Inc, 1997, ch.12, 14.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## สรุปผลงานภายใต้โครงการ

- [1] A. Boonpoonga, P. Sirisuk and M. Krairiksh, "A Switched-beam Element Phased Array Antenna for CMA Initialization," Proc. of the 36th European Microwave Conference (EuMC), Manchester, pp.772-775, Sept. 2006.
- [2] J. Tagapanij, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "A Dual Feed Switched-Beam Patch Antenna for a Phased Array of Switched-Beam Elements," in Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, pp.2102-2105, 2006.
- [3] J. Tagapanij, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin and M. Krairiksh, "Phased Array of Switched-Beam Elements for Handset Adaptive Antenna," accepted for presentation in the 2007 IEEE Radio & Wireless Symposium.
- [4] A. Boonpoonga, P. Sirisuk, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, "Beam-switching-assisted CMA initialization for Handset Adaptive Antenna," accepted for presentation in the 2007 IEEE Radio & Wireless Symposium.
- [5] A.Boonpoonga, P. Sirisuk, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, "Performance of Switched-beam Element Phased Array for Handset Adaptive Antenna," submitted to the 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS).
- [6] A. Boonpoonga, P. Sirisuk, M. Chongcheawchamnan, S. Patisang, and M.Krairiksh, "Low-Cost Hardware-Assisted Initialization for CMA Adaptive Antenna," submitted IEICE Trans. Commun.