



รายงานการวิจัย

สายอากาศอัตรายายสูงสำหรับสถานีฐานโดยใช้ไมโครสตริป  
และโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปสามเหลี่ยม  
(High-Gain Antenna for Base Station Using MSA  
and Triangular EBG Cavity)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

สายอากาศอัตราขยายสูงสำหรับสถานีฐานโดยใช้ไมโครสตริป  
และโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้ารูปสามเหลี่ยม  
(High-Gain Antenna for Base Station Using MSA  
and Triangular EBG Cavity)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคต์  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวเกศภัทร คำพิกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2558

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้  
ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556  
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเกวณัฐรา คำพิกุล ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง  
ด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์



## บทคัดย่อ

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular phone system) ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถให้บริการมัลติมีเดียในลักษณะที่สามารถโต้ตอบได้ มีความกว้างแถบที่กว้างเพียงพอให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วที่สูง และสามารถใช้งานได้ทั่วโลก ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่กำลังมุ่งเน้นพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่ยุค 3.9G และสูงกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบสายอากาศแบบรอบตัวสำหรับรองรับเทคโนโลยีดังกล่าว สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐาน (base station) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยใช้เทคโนโลยีใหม่ในการเพิ่มอัตรายายของสายอากาศ แถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot array antenna) ให้สูงขึ้น ด้วยการนำโพรงช่องว่าง แถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) มาทำการวิจัยและออกแบบให้ใช้งานร่วมกับสายอากาศดังกล่าว โดยระบบสายอากาศจะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ (1) สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ที่มีการปรับปรุงความกว้างแถบให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบ 3.9G (2) โครงสร้าง EBG ที่ได้ทำการวิจัยและออกแบบ และ (3) ระบบป้อนกำลังงาน (feed system) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology) ในการออกแบบและจำลองผล จากนั้นทำการสร้างสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ เพื่อนำไปวัดทดสอบ คุณลักษณะเปรียบเทียบกับความแม่นยำตรงกับผลการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST ต่อไป

## Abstract

The cellular phone system is suitably improved and developed for mobile phone communication system for supporting the real time interactive multimedia services, and providing enough bandwidth for high bit rate receiving and transmitting data for global mobility. Nowadays, the cellular phone system has been innovated into 3.9G technology and beyond. Therefore, this research aims to design an omnidirectional antenna system for the age of Third Generation (3.9G) to be applied for the cellular base station, following IEEE802.16e Mobile WiMAX Standards at 2.1 GHz. The Electromagnetic Band Gap (EBG), a new technology for increasing microstrip slot array antenna gain, is researched and designed to cooperate with this antenna. The antenna system comprises of 3 main parts including: (1) microstrip slot array antenna that is proposed with a bandwidth covered frequency ranges for 3.9G system, (2) EBG structure, and (3) feed system. The CST (Computer Simulation Technology) program is utilized in this research for simulation array antenna. Then the array antenna will be realized and experimented to validate the CST program and the developing analysis tool.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 สมมุติฐานของการวิจัย .....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล .....	2
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	
2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1.1 สายอากาศสำหรับการสื่อสารไร้สาย .....	4
2.1.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG).....	8
2.2 สรุป.....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
3.1 สายอากาศไมโครสตริป .....	13
3.1.1 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป.....	14
3.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป .....	16
3.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
3.2.1 คำจำกัดความ และโครงสร้าง EBG .....	17
3.2.2 โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงรี .....	23
3.2.3 โครงสร้าง EBG และอภิวัดดู.....	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สรุป.....	27
บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ	
4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศ แบบร่องไมโครสตริปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	28
4.1.1 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม.....	28
4.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป แพทช์วงกลม.....	29
4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศ แถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง ร่วมกับโครงสร้าง EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST.....	35
4.3 สรุป.....	39
บทที่ 5 ผลการวัดทดสอบ	
5.1 วิธีการสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ.....	40
5.2 ผลการวัดทดสอบกำลังการสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความกว้างแถบ.....	44
5.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์.....	47
5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	48
5.5 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย.....	51
5.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง.....	55
5.7 เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G.....	56
5.8 สรุป.....	57
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 บทสรุป.....	58
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	63
ประวัติผู้วิจัย.....	65

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ .....	13
ตารางที่ 3.2	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ ที่เป็น PEC และ EBG .....	22
ตารางที่ 4.1	ผลการจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	36
ตารางที่ 5.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม และแผ่นตัวสะท้อน .....	41
ตารางที่ 5.2	พารามิเตอร์ของโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้ง .....	42
ตารางที่ 5.3	การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลอง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST .....	55
ตารางที่ 5.4	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G .....	56



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไดโพล .....	5
รูปที่ 2.2 สายอากาศแบบปลอก.....	6
รูปที่ 2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยม.....	6
รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007) .....	8
รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็นแบบชั้นบันได (Yang and Rahmat-Samii, 2001).....	9
รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็น โครงสร้าง EBG (Yang and Rahmat-Samii, 2001).....	10
รูปที่ 2.7 สายอากาศไมโครสตริปวางบน โครงสร้าง EBG (Qu Shafai และ Foroozesh, 2006).....	11
รูปที่ 2.8 สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับที่ถูกแทรกด้วย โครงสร้าง EBG (Yang and Rahmat-Samii, 2003).....	11
รูปที่ 2.9 โพรง EBG ในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนอัตราขยายสูง.....	12
รูปที่ 3.1 รูปร่างของแพทช์ไมโครสตริป.....	15
รูปที่ 3.2 การป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (Yoshimura, 1972) .....	16
รูปที่ 3.3 EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ .....	18
รูปที่ 3.4 EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ.....	19
รูปที่ 3.5 EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ .....	19
รูปที่ 3.6 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุ ของโครงสร้าง EBG .....	20
รูปที่ 3.7 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบราบที่มีสี่ชั้น (Weily et al., 2005).....	23
รูปที่ 3.8 โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010).....	24
รูปที่ 3.9 โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง.....	25
รูปที่ 4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม .....	29

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับ แบบร่องไมโครสตริป.....	30
รูปที่ 4.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับ แบบร่องไมโครสตริป.....	31
รูปที่ 4.4	สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง .....	32
รูปที่ 4.5	ผลของค่ากำลังการสะท้อนต่อความถี่เมื่อระยะห่างระหว่าง แผ่นสะท้อนด้านหลังและสายอากาศแฉวลำดับมีค่าแตกต่างกัน.....	33
รูปที่ 4.6	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริป เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง .....	33
รูปที่ 4.7	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริป เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง .....	34
รูปที่ 4.8	ระบบสายอากาศ .....	36
รูปที่ 4.9	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3 .....	37
รูปที่ 4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3.....	38
รูปที่ 5.1	สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม และตัวสะท้อนด้านหลัง.....	41
รูปที่ 5.2	โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้ง .....	42
รูปที่ 5.3	ตัวแบ่งกำลังงาน.....	42
รูปที่ 5.4	ระบบสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบ .....	43
รูปที่ 5.5	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบ จากการวัดทดสอบ .....	45
รูปที่ 5.6	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบ จากการวัดทดสอบ.....	45
รูปที่ 5.7	กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังการสะท้อนระหว่างผลจากการวัดทดสอบ และจากการจำลอง.....	46
รูปที่ 5.8	ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบ จากการวัดทดสอบ.....	47

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.9 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน .....	49
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ .....	50
รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป .....	53
รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ .....	54
รูปที่ 5.13 สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G .....	57



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การสื่อสารไร้สายนับได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความสะดวกมากขึ้นในการเชื่อมต่อเครือข่าย ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile phone system) หรือระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ (cellular phone system) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาให้เหมาะสมกับการใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุโทรศัพท์เคลื่อนที่ และยังสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้กว้างมากขึ้น ขยายขอบเขตการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้ต่อเนื่องอย่างไม่มีขีดจำกัด กล่าวคือ ในเขตพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่น เช่น เขตในเมือง มีความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากก็สามารถออกแบบให้มีจำนวนเซลล์มากขึ้นเพื่อรองรับอัตราการให้บริการให้มากขึ้น ส่วนในเขตพื้นที่ที่มีประชากรเบาบาง เช่น ในเขตต่างจังหวัด มีความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นจำนวนน้อยก็ออกแบบให้เซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อความเหมาะสม แต่ละเซลล์ที่ติดกันจะใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกัน เพื่อป้องกันการรบกวนซึ่งกันและกัน ส่วนเซลล์ที่อยู่ห่างออกไปจะนำความถี่เดิมมาใช้ เรียกว่า การนำความถี่กลับมาใช้อีก (frequency reuse) โดยไม่เกิดการสอดแทรกและสูญหายของสัญญาณ และเมื่อต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เพิ่มขึ้นก็แบ่งจำนวนเซลล์ออกเป็นเซลล์ย่อยให้มากขึ้นได้ตามต้องการ ทำให้การทำงานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์สามารถนำความถี่มาใช้งานอย่างคุ้มค่า จากข้อดีของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ดังกล่าว ส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายยุค สำหรับประเทศไทยกำลังมุ่งเน้นพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่ยุค 3.9G ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบสายอากาศสำหรับรองรับเทคโนโลยีในยุค 3.9G ซึ่งสามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้กว้างมีอัตราขยายสูง มีกำลังการควบคุม (power handling) ของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐาน (base station) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยระบบสายอากาศประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ (1) สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) เป็นสายอากาศแบบแพทช์ (patch) ที่มีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น ราคาถูก มีโครงสร้างที่ง่าย น้ำหนักเบา ออกแบบ สร้างและติดตั้งเพื่อใช้งานได้ง่าย (2) โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) สามารถพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของการขจัดคลื่นผิวและการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ และ (3) ระบบป้อนกำลังงาน (feed system) ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้แก่สายอากาศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาคุณค่าข้อมูลของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และ โครงสร้าง EBG สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์

1.2.2 ออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศสำหรับระบบ โทรศัพท์เซลลูลาร์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology)

1.2.3 สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการวัดทดสอบ และผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ และโครงสร้าง EBG

1.3.2 ออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ และโครงสร้าง EBG

1.3.3 สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

## 1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

1.4.1 โครงสร้าง EBG จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์โดยการขจัดคลื่นผิว การลดระดับพดคลื่นด้านข้างและด้านหลังของการแผ่พลังงาน และการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

### 1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และโครงสร้าง EBG

- ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และโครงสร้าง EBG จำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และวิเคราะห์สมรรถนะของสายอากาศ เพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์

- สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ วัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST รวมทั้งสรุปผลงานวิจัย

- จัดทำบทความสำหรับนำเสนอผลการวิจัยและส่งเสริมพิมพ์
- จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

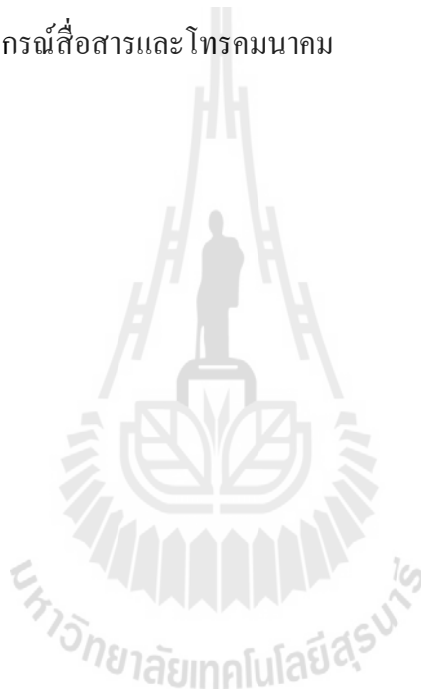
#### 1.5.2 สถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4 (F4) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี

#### 1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป และเป็นบริการความรู้แก่สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ หน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและโทรคมนาคม



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบและสร้างระบบสายอากาศสำหรับรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ในยุค 3.9G ซึ่งพัฒนามาจากสายอากาศไมโครสตริป และโครงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE และนอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

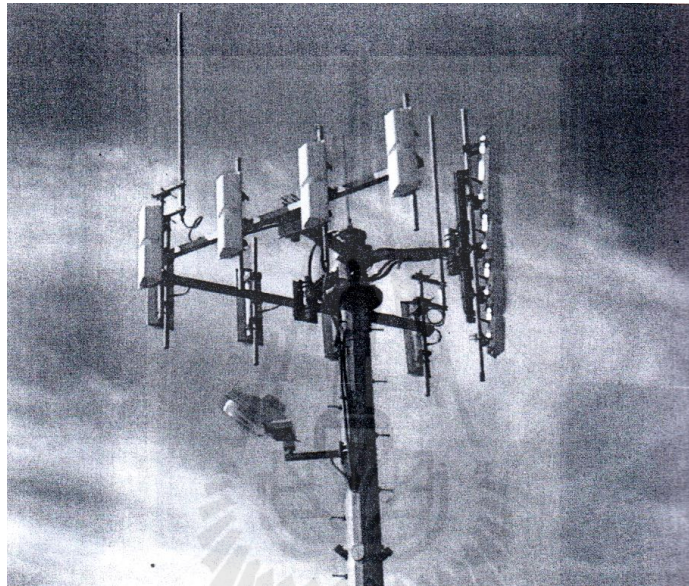
สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สาย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะโครงสร้างชนิดต่าง ๆ การออกแบบ และการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมกับแต่ละโครงสร้าง

#### 2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 สายอากาศสำหรับการสื่อสารไร้สาย

สายอากาศไดโพล (dipole antenna) สายอากาศโมนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และ สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) สายอากาศทั้งสี่แบบนี้เป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย (Fujimoto and James, 1994; Katsibas, 1996; Katsibas et al., 1998) สายอากาศแบบแรก คือ สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ รูปที่ 2.1 แสดงสายอากาศแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไดโพล ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศไดโพลจำนวนสิบสองอิลิเมนต์ โดยแต่ละข้างของแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมจะมีสายอากาศไดโพลจำนวนสี่อิลิเมนต์ รวมเป็นสามเหลี่ยม โดยแต่ละเหลี่ยมจะห่อหุ้มด้วยเช็ทเตอร์ 120° ของพื้นที่ผู้ใช้งาน สายอากาศแถวลำดับไดโพลนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานในสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ ในขณะที่สายอากาศโมนโพล (Chen, Peng, and Liang, 2005) จะนิยมนำมาใช้งานสำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่า เคลื่อนที่ได้สะดวกกว่า เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular

telephone) โทรศัพท์ไร้สาย (cordless telephones) และยานพาหนะ (automobiles) ทั้งนี้เนื่องจากสายอากาศโมโนโพลมีน้ำหนักเบา คุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (broadband characteristics) และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง สายอากาศไดโพลและโมโนโพล ถ้ามีการออกแบบที่ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานแล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงมาก ในขณะเดียวกันสายอากาศทั้งสองชนิดนี้ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน คือ มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง เปราะบาง แดกหักได้ง่าย ราคาสูง และอาจเกิดความเสียหายจากการใช้งานของผู้ใช้ เนื่องจากโครงสร้างไม่มีที่กำบังสายอากาศ

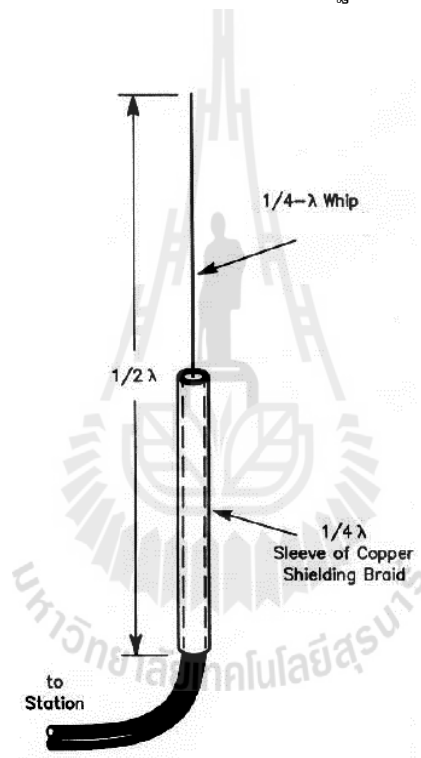


รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไดโพล

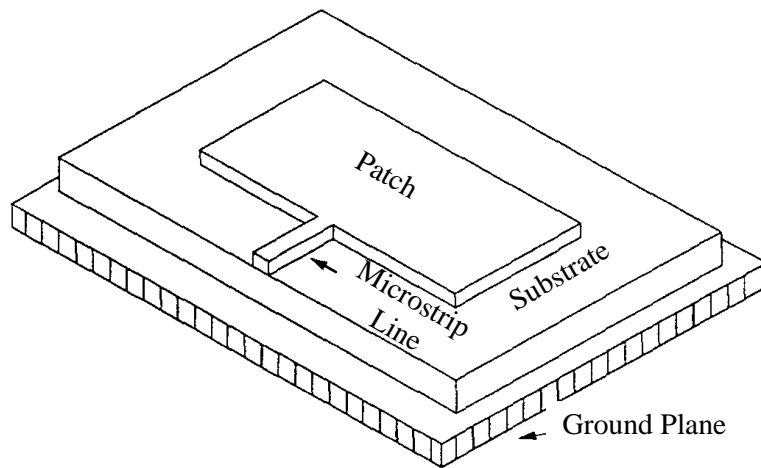
สายอากาศชนิดที่สาม คือ สายอากาศแบบปลอก (Taguchi, Egashira, and Tanaka, 1991) มีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตรของตัวนำ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกมัดด้วยลวดลัดที่ถูกรอบ ๆ สายโคแอกเซียลแสดงดังรูปที่ 2.2 สายอากาศแบบปลอกนี้มีคุณลักษณะเหมือนสายอากาศโมโนโพลแบบที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์ แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสีย คือ เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะทำให้อัตราขยายลดลง และแบบสุดท้าย คือ สายอากาศไมโครสตริป (Richards, 1988; James and Hall, 1989) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวด์ (ground plane) ที่มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) แสดงดังรูปที่ 2.3 ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่างมากในการ



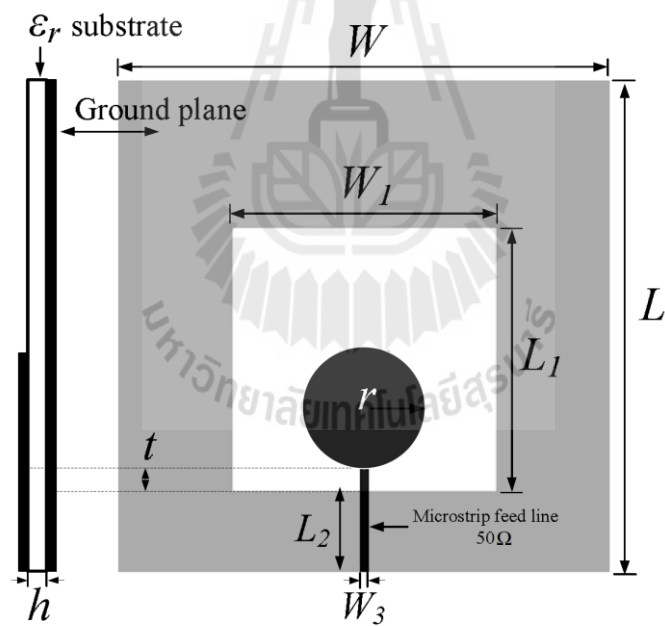
ใช้งานทางด้านสายอากาศ เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ต้านลมและสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ และยังมีข้อดีในแง่ของราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อจำกัดเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟชนิดอื่น ๆ ในเรื่องของความกว้างแถบ (bandwidth) ที่แคบ ซึ่งสามารถแก้ไขข้อจำกัดนี้ได้ โดยการเซาะร่องบนระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศ เรียกเทคนิคนี้ว่า สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot antenna) โดยทำการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือร่องบนระนาบกราวด์ (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007) แสดงดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำสายอากาศสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมาประยุกต์และปรับปรุง เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานสำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์



รูปที่ 2.2 สายอากาศแบบปลอก



รูปที่ 2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยม

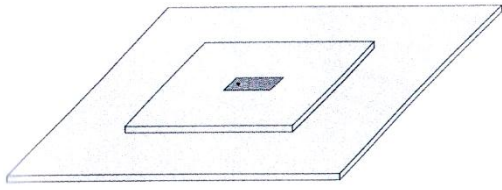


รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007)

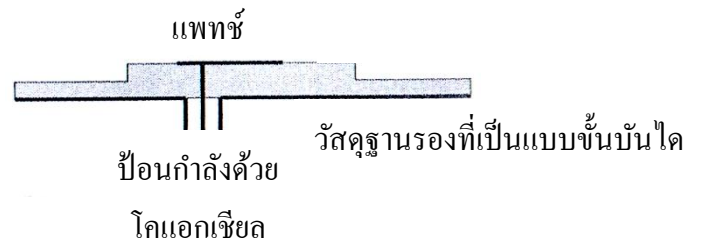
### 2.1.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG)

ในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นไปตามทิศทางของระนาบกราวด์ โดยจะมีการแผ่พลังงานไปยังอากาศว่าง ซึ่งคลื่นผิวนี้อาจลดประสิทธิภาพและอัตราขยายของสายอากาศ การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวจะเพิ่มการแผ่พลังงานของพู่คลื่นด้านหลัง (back lobe) ให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่ไม่ดี ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ EBG ร่วมกับโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อลดหรือขจัดคลื่นผิวนอกจากนี้ EBG ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ในส่วนของอัตราขยาย และลดระดับการแผ่พลังงานของพู่คลื่นด้านข้างและด้านหลัง และการเชื่อมต่อยุติกัน (mutual coupling) สำหรับสายอากาศแถวลำดับ (Yang and Rahmat-Samii, 2009)

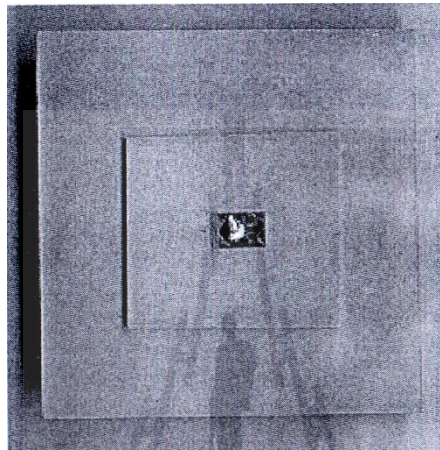
Yang and Rahmat-Samii (2001) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบวัสดุฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันได (step-like substrate) และวัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแพทช์แสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ เพื่อเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองให้สูงขึ้น (high dielectric constant substrate) โดยไม่มีผลกระทบต่อลักษณะโครงสร้างภายนอก ขนาด และความกว้างแถบของสายอากาศ จากการเปรียบเทียบพบว่าวัสดุฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันไดสามารถช่วยลดคลื่นผิวได้ โดยควบคุมระยะห่างระหว่างแพทช์และขั้นบันไดให้มีความเหมาะสม ถ้ามีระยะแคบเกินไปจะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนไปและความกว้างแถบก็จะลดลงด้วย แต่ถ้ามีระยะกว้างเกินไปก็จะไม่สามารถลดคลื่นผิวได้ ในขณะที่วัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG จะถูกออกแบบให้โพรงช่องว่างของคลื่นผิวครอบคลุมความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ทำให้คลื่นผิวที่ถูกกระตุ้นโดยแพทช์จะถูกขจัดออกจากการแพร่กระจายพลังงาน โดยโครงสร้าง EBG Yang and Rahmat-Samii (2001) ได้สรุปว่าวัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบบแพทช์ได้ดีกว่า โดยไม่มีผลต่อขนาดและความกว้างแถบของสายอากาศ



(ก) รูปร่างทางเรขาคณิต



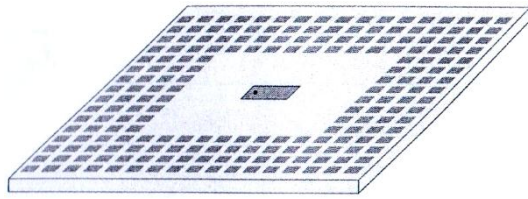
(ข) ภาพตัดตามขวาง



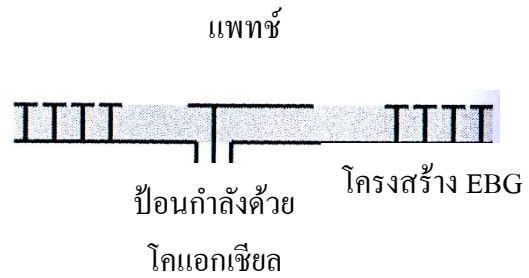
(ค) สายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันได  
(Yang and Rahmat-Samii, 2001)

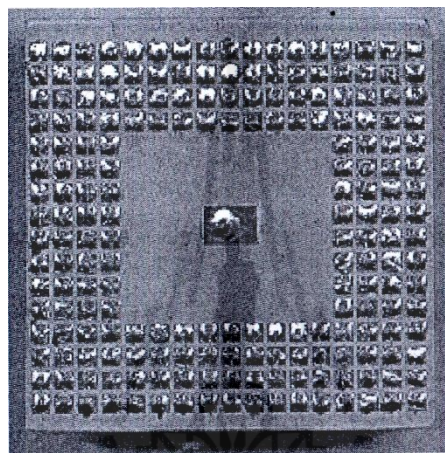
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) รูปร่างทางเรขาคณิต.



(ข) ภาพตัดตามขวาง

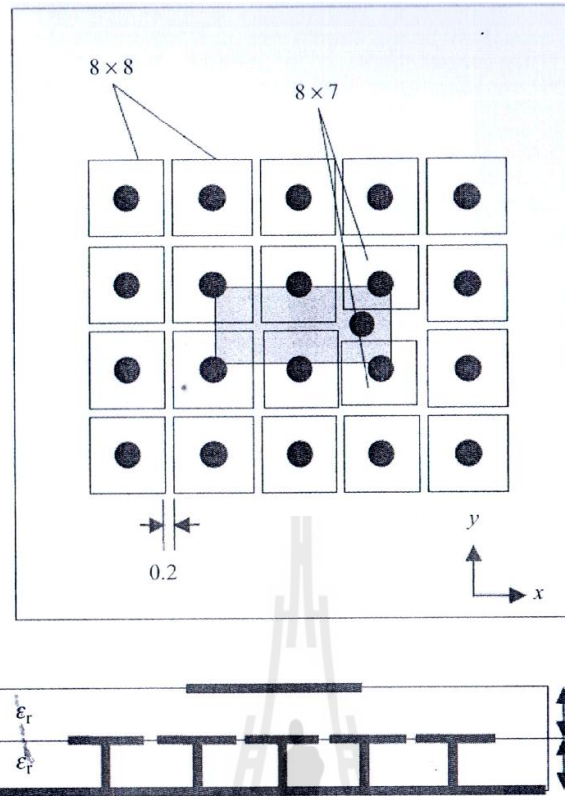


(ค) สายอากาศต้นแบบ

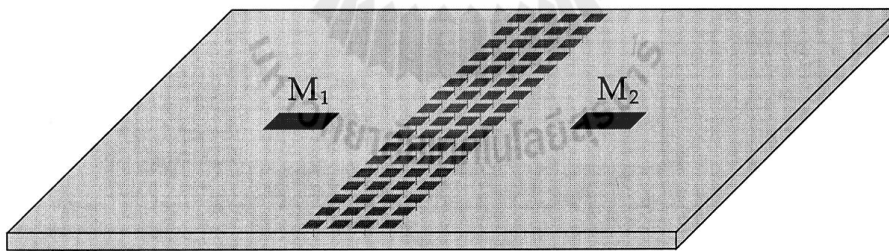
### รูปที่ 2.6 สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็น โครงสร้าง EBG

(Yang and Rahmat-Samii, 2001)

Fan และคณะ (2003) และ Qu Shafai และ Foroozesh (2006) ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปด้วยการนำมาวางบนโครงสร้าง EBG ที่มีอิมพีแดนซ์สูงแทนที่ระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 2.7 เพื่อปรับปรุงสนามระยะใกล้ของสายอากาศ ส่งผลให้ความกว้างแถบ อัตราขยาย และ โพลาริเซชัน ไขว้ดีขึ้น ด้วยการปรับตำแหน่งการป้อนกำลังงาน ความกว้างแพทช์ ขนาดของระนาบกราวด์ และระยะห่างของ EBG ที่เหมาะสม นอกจากนี้ได้มีการนำโครงสร้าง EBG มาประยุกต์ใช้ร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปแกลวลำดับ โดยวางแทรกระหว่างสายอากาศทั้งสองอีลิเมนต์ (Yang and Rahmat-Samii, 2003) แสดงดังรูปที่ 2.8 เพื่อลดการเชื่อมต่อร่วมในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากสำหรับการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับ



รูปที่ 2.7 สายอากาศไมโครสตริปวางบนโครงสร้าง EBG (Qu Shafai และ Foroozesh, 2006)

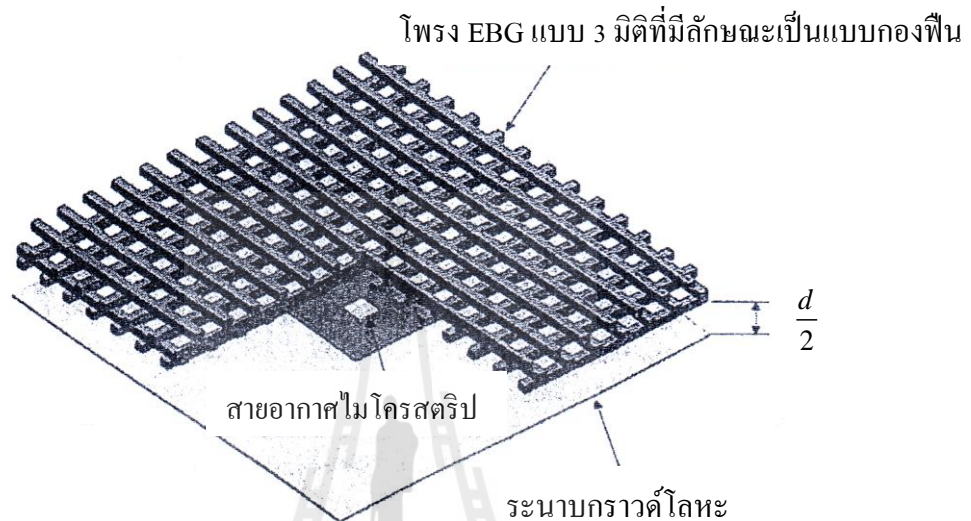


รูปที่ 2.8 สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับที่ถูกรบกวนด้วยโครงสร้าง EBG

(Yang and Rahmat-Samii, 2003)

EBG สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศได้มากถึง 20 dBi ในอดีตเป็นที่เข้าใจกันว่าสายอากาศอัตราขยายสูงจะต้องเป็นสายอากาศพาราโบลาหรือสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามพบว่าพื้นผิวความโค้งของสายอากาศพาราโบลานั้นมีความยากในเรื่องของมุมและมาตราส่วนสำหรับแพลตฟอร์มโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile platform) ในขณะที่เดียวกันสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ก็จะเกิดการ

สูญเสียพลังงานจากวงจรจ่ายการป้อนกำลังงาน (feeding networks) ดังนั้นจึงได้มีการใช้โครงสร้าง EBG เพื่อแก้ปัญหานี้ อาทิเช่น การใช้โครง EBG แบบ 3 มิติในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนอัตราขยายสูง (A. R. Weily et al., 2005) โดยนำโครง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกองฟืน (woodpile EBG) มาล้อมรอบสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.9 และจากการวัดทดสอบพบว่าสายอากาศมีอัตราขยายมากถึง 19 dBi



รูปที่ 2.9 โครง EBG ในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนอัตราขยายสูง

จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้นำโครง EBG แบบ 3 มิติมาประยุกต์ใช้ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น สำหรับรองรับเทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX

## 2.2 สรุป

สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมีลักษณะคล้ายแผ่นพิมพ์ที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ชนิดที่มีแผ่นทองแดงประกบอยู่ทั้งสองด้านและมีไดอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุฐานรองทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ คั่นกลางอยู่ การศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปนี้มีการพัฒนาการเซาะร่องบนระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มความกว้างแถบให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับ โครงสร้าง EBG สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองหัวข้อ คือ หัวข้อแรกกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน การป้อนกำลังงาน และการจัดแถวลำดับของสายอากาศไมโครสตริป และหัวข้อที่สองกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศ และสรุป

#### 3.1 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารสมัยใหม่ สายอากาศไมโครสตริปนับว่ามีข้อดีหรือข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศไมโครเวฟ ทำให้สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 100 GHz แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อจำกัดเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟดังตารางที่ 3.1 แสดงข้อได้เปรียบที่เป็นจุดเด่นของสายอากาศไมโครสตริปและข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ

ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป	ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
<ul style="list-style-type: none"><li>■ น้ำหนักเบา ปริมาณน้อย มีโครงสร้างรูปร่างที่บาง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงมุมและมาตราส่วนได้อย่างชัดเจน</li><li>■ ราคาถูก</li><li>■ ง่ายต่อการป้อนกำลังงานสำหรับโพลาริซัที่เป็นแบบเส้นตรงและวงกลม</li><li>■ ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสำหรับสายอากาศที่เป็นแบบความถี่คู่และโพลาริซัคู่</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ มีความกว้างแถบที่แคบ</li><li>■ มีอัตราขยายที่ค่อนข้างต่ำ (<math>\approx 6dB</math>)</li><li>■ มีความต้านทานการสูญเสียมากและมีความซับซ้อนของโครงสร้างการป้อนกำลังงานสำหรับสายอากาศแถวลำดับ</li><li>■ เกิดการแผ่กระจายคลื่นภายนอกจากจุดป้อนกำลังงานและจุดเชื่อมต่อ</li><li>■ เกิดการกระตุ่นของคลื่นบนผิวหน้า</li></ul>



ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ (ต่อ)

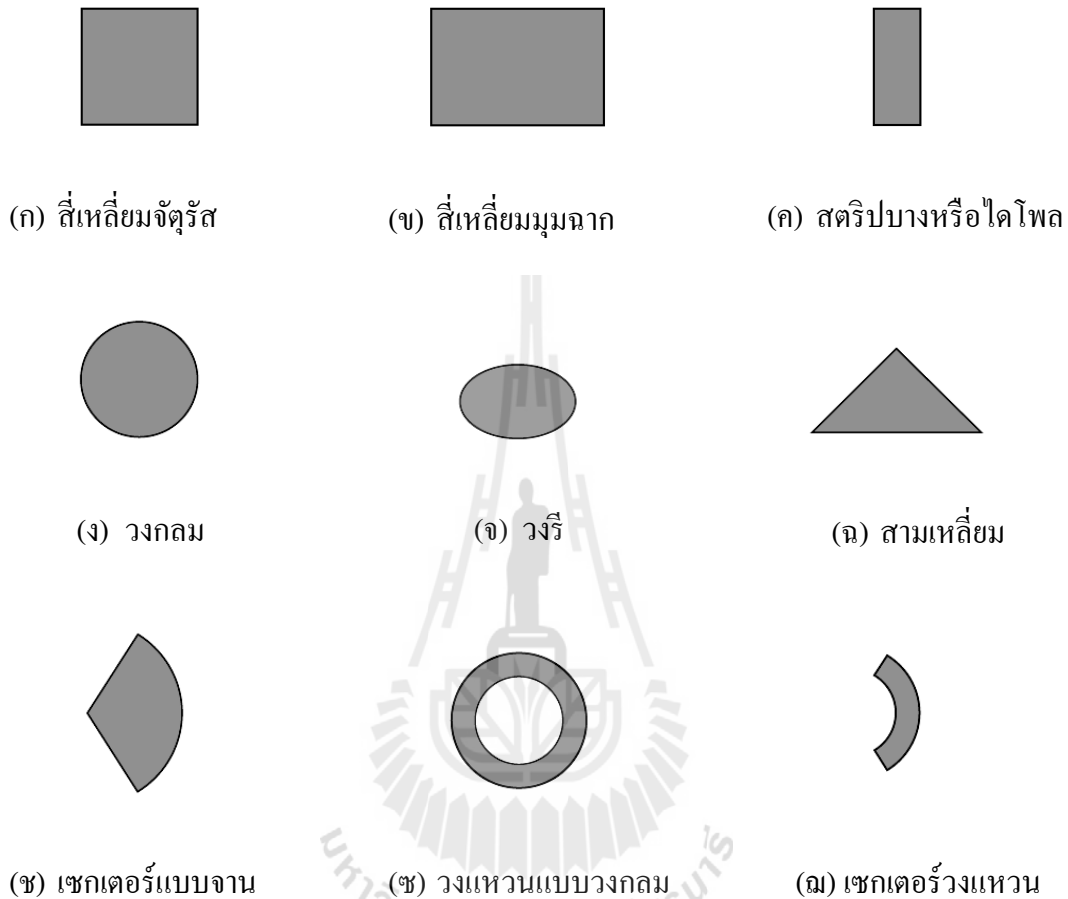
ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป	ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ สามารถอินทิเกรตร่วมกับวงจรไมโครเวฟ</li> <li>■ การทำเส้นป้อนกำลังงานและการแมทช์สายอากาศสามารถออกแบบและสร้างในเวลาเดียวกันกับโครงสร้างของสายอากาศ</li> </ul>	

โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปได้สามส่วน ได้แก่ (1) ส่วนบนจะเป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) เป็นตัวนำที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น (2) ส่วนที่เป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric sheet) หรือซับสเตรต (substrate) ซึ่งกั้นกลางระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นตัวนำ และ (3) ระนาบกราวด์ (Balanis, 2005) แสดงดังรูปที่ 2.3 (ในบทที่ 2) ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board หรือ PCB) โดยที่แพทช์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (operating frequency :  $f_c$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant :  $\epsilon_r$ ) และความสูงของวัสดุฐานรอง (high :  $h$ )

### 3.1.1 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปถูกพัฒนามาจากสายอากาศแบบร่อง (slot antenna) ที่ถูกกระตุ้นหรือป้อนกำลังเข้าที่เส้นสตริป (strip line) (Garg et al., 2001) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะเหมือนกับสายอากาศไมโครสตริป แต่แตกต่างจากสายอากาศไมโครสตริปตรงที่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะมีการเจาะร่องบนระนาบกราวด์ แสดงดังรูปที่ 2.4 (ในบทที่ 2) นอกจากนี้รูปร่างของร่องสามารถออกแบบให้เป็นแบบใดก็ได้ แต่ที่นิยม คือ ออกแบบให้มีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างแพทช์ไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับข้อดีของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป คือ เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง (bidirectional radiation) ที่ให้ความกว้างแถบกว้างมาก (ultra wide band) และนอกจากนี้ยังสามารถออกแบบสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว

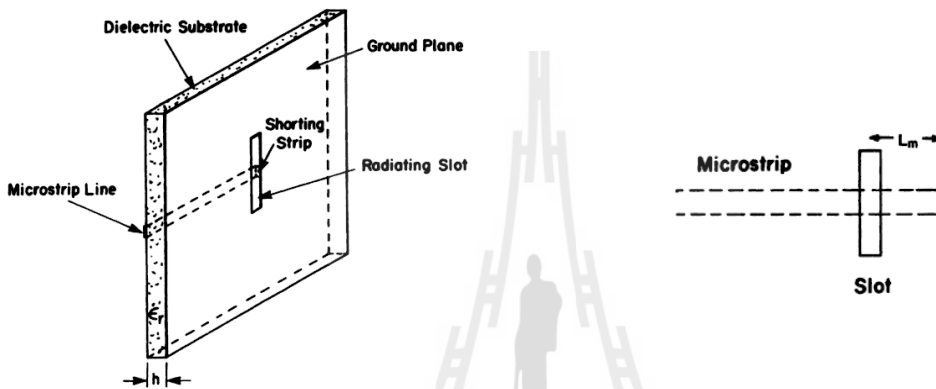
(directional radiation) ได้ด้วยการเพิ่มแผ่นสะท้อน (reflector plate) ที่ด้านใดด้านหนึ่งของร่อง โดยที่สายอากาศยังมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแถบกว้างอยู่



รูปที่ 3.1 รูปร่างของแพทช์ไมโครสตริป

ในการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับสายอากาศไมโครสตริป คือ การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip-line feed) หรือการป้อนกำลังด้วยท่อนำคลื่นบนระนาบเดียวกัน (coplanar waveguide) สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป เนื่องจากง่ายต่อการเชื่อมต่อและสะดวกในการออกแบบและสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปสายส่งสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริปนี้จะประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบแพทช์วางอยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ที่มีสายอากาศแบบร่องอยู่บนระนาบกราวด์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งออกจากเส้นไมโครสตริปผ่านวัสดุฐานรองที่อยู่ระหว่างกลางไปสู่ระนาบกราวด์ ค่าความต้านทานคุณสมบัติ (characteristic impedance)

จะขึ้นอยู่กับความกว้างของเส้นไมโครสตริปและความหนาของวัสดุฐานรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้อนกำลังให้แก่ร่อง สตริปตัวนำต้องเป็นวงจรลัด (short-circuited) ยาวไปตลอดบนวัสดุฐานรองที่เป็นไดอิเล็กตริกจนถึงขอบของร่องแสดงดังรูปที่ 3.2(ก) หรืออีกวิธีการหนึ่ง คือ ที่ปลายของสตริปตัวนำต้องเป็นวงจรเปิดแบบสตัป (open-circuited stub) ที่มีความยาวมากกว่าขอบของร่องด้วยความยาวเท่ากับ  $L_m$  แสดงดังรูปที่ 3.2(ข) (Yoshimura, 1972) โดยความยาว  $L_m$  นี้มีค่าประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ( $\lambda/4$ ) ข้อดีของการป้อนกำลังด้วยวิธีนี้ คือ ทำให้เกิดการโพลาไรซ์ไขว้ (cross-polarization) ที่ต่ำ (ประมาณ -35 dB) (Axelrod, Kisliuk, and Maoz, 1989)



(ก) วงจรลัดที่ปลายไมโครสตริป

(ข) วงจรเปิดที่ปลายไมโครสตริป

รูปที่ 3.2 การป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (Yoshimura, 1972)

### 3.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป

สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot antenna array)

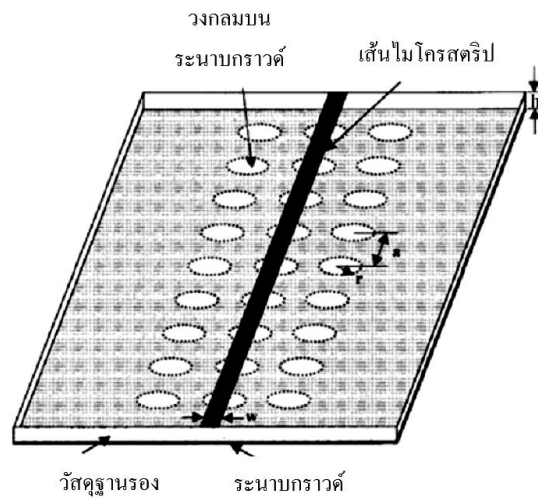
ประกอบขึ้นจากการนำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปหลาย ๆ อิลิเมนต์มาประกอบหรือเรียงลำดับกันให้มีรูปร่างเชิงเรขาคณิต เพื่อเพิ่มขนาดขององค์ประกอบที่ใช้ในการแผ่คลื่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (วงศ์สรรค, 2555) สนามรวมที่เกิดจากแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปจะเกิดจากการทับซ้อนเชิงเวกเตอร์ของสนามที่แผ่ออกมาจากร่องแต่ละอิลิเมนต์ การที่จะได้แบบรูปการแผ่คลื่นในทิศทางที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่าในทิศทางอื่นนั้น ต้องทำให้สนามที่เกิดจากแต่ละอิลิเมนต์มีเฟสที่เสริมกันในทิศทางที่ต้องการ และในขณะเดียวกันสนามที่เกิดจากแต่ละอิลิเมนต์ก็ต้องหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการด้วย เราสามารถควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแผ่กำลังงานรวมของสายอากาศได้ โดยการควบคุม ดังต่อไปนี้

- รูปร่างของแถวลำดับจะต้องมีลักษณะที่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต เช่น เส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม ทรงกลม เป็นต้น
- ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์แต่ละตัวของแถวลำดับ
- แอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละอีลิเมนต์
- เฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละอีลิเมนต์
- แบบรูปการแผ่กำลังงานของแต่ละอีลิเมนต์ให้สัมพันธ์กัน

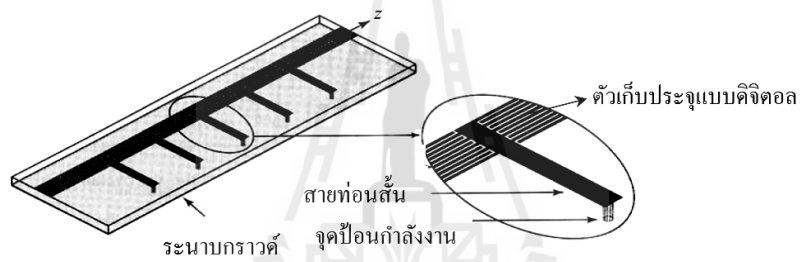
## 3.2 โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า

### 3.2.1 คำจำกัดความ และโครงสร้าง EBG

โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ EBG (Electromagnetic Band Gap) คือ วัสดุที่ขัดขวางหรือสับสนุนการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความถี่ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบ และทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัสดุที่เป็น ไดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ สามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโครงสร้าง EBG ได้ 3 ประเภทได้แก่ (1) EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ เช่น เส้นไมโครสตริปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (Radisic et al., 1998) และเส้นส่งผ่านพลังงานที่ประกอบด้วยส่วนทางขวามือและทางซ้ายมือ (Caloz and Itoh, 2005) แสดงดังรูปที่ 3.3(ก) และ (ข) ตามลำดับ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ จะมีลักษณะเป็นผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด (mushroom-like) (Sievenpiper et al., 1999) ดังรูปที่ 3.5(ก) และผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ (uni-planar) (Yang et al., 1999) ดังรูปที่ 3.4(ข) และ (3) EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ คือ มีโครงสร้างเป็นลักษณะแบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (Ozbay et al., 1994) และมีโครงสร้างเป็นแถวลำดับแบบมีขาตั้งที่มี 3 ขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (Barlevy and Rahmat-Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) ตามลำดับ

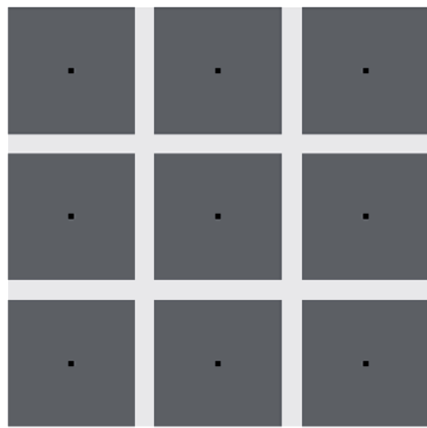


(ก) เส้นไมโครสตริป (Radisic et al., 1998)



(ข) เส้นส่งผ่านพลังงานส่วนทางขวามือ และทางซ้ายมือ (Caloz and Itoh, 2005)

รูปที่ 3.3 EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ

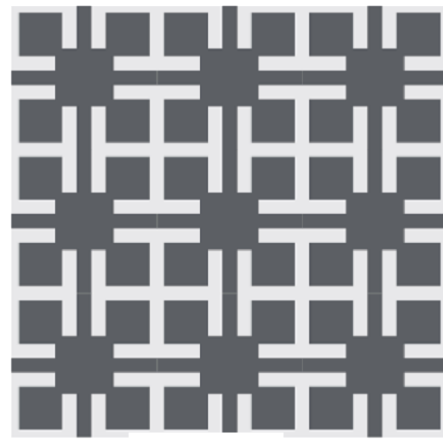


ด้านบน

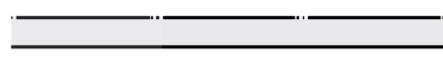


ด้านข้าง

(ก) ผิวหน้าคล้ายดอกเห็ด  
(Sievenpiper et al., 1999)



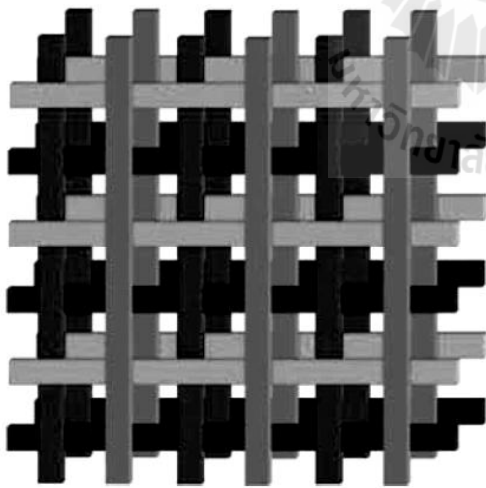
ด้านบน



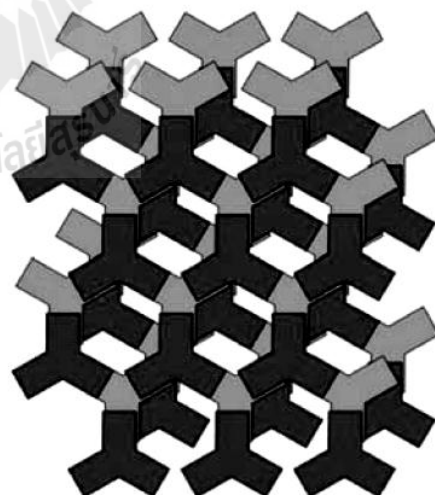
ด้านข้าง

(ข) ผิวหน้าแบบหนึ่งระนาบ  
(Yang et al., 1999)

รูปที่ 3.4 EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ



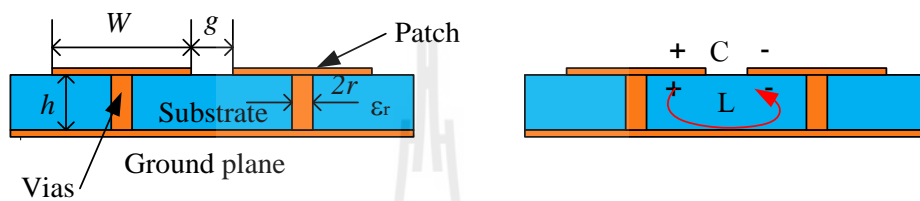
(ก) โพรงเป็นลักษณะแบบกึ่งพื้น  
(Ozbay et al., 1994)



(ข) โพรงเป็นแถวลำดับแบบม้านั่งที่มี 3 ขา  
(Barlevy and Rahmat-Samii, 2001)

รูปที่ 3.5 EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ

สำหรับพารามิเตอร์ของ EBG เพื่อง่ายแก่การทำความเข้าใจในวิธีดำเนินการของ EBG ผู้วิจัยจะนำเสนอโครงสร้างอย่างง่าย คือ โครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โครงสร้าง EBG แบบ 2 มิตินี้ ประกอบด้วยสี่ส่วนดังนี้ (1) แผ่นกราวด์โลหะ (metal ground plane) (2) วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric substrate) (3) แผ่นโลหะวางเป็นคาบบน ไดอิเล็กตริกหรือแพทช์ และ (4) ตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะด้านบนกับแผ่นกราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งคูมามีรูปทรงเรขาคณิตคล้ายดอกเห็ด



(ก) พารามิเตอร์ของ EBG

(ข) วงจร LC ภายในโครงสร้าง

รูปที่ 3.6 พารามิเตอร์และรูปแบบของค่าเหนี่ยวนำและค่าความจุของโครงสร้าง EBG

จากรูปที่ 3.6(ก) แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้าง EBG ประกอบด้วย ค่าต่าง ๆ ดังนี้

- $W$  คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำด้านบน
- $g$  คือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน
- $h$  คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก
- $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่สภาพยอมของไดอิเล็กตริก
- $r$  คือ รัศมีของเวีย
- $(W+g)$  คือ ระยะคาบเล็กที่เปรียบเทียบการดำเนินการความยาวคลื่น

สามารถอธิบายรูปแบบสื่อกลางของโครงสร้าง EBG ได้ด้วยวงจรสมมูลของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ ( $L$ ) และค่าความจุ ( $C$ ) ดังรูปที่ 3.6(ข) โดยค่าความจุที่เกิดขึ้นเป็นผลจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน และค่าเหนี่ยวนำเกิดจากกระแสที่ไหลไปตามตัวนำที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการ (3.1)

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (3.1)$$

ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรคำนวณได้จากสมการ (3.2)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

ที่ความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นการเหนี่ยวนำและรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM surface wave) โดยจะเปลี่ยนเป็นค่าความจุที่ความถี่สูงรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE surface wave) และเมื่อเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ ( $\omega_0$ ) EBG จะไม่รองรับคลื่นระดับพื้นผิวใด ๆ เนื่องจากอยู่ในสถานะที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ๆ และการที่อิมพีแดนซ์ระดับพื้นผิวสูงมากส่งผลให้แน่ใจว่าคลื่นระดับพื้นผิวจะสะท้อนกลับโดยไม่กลับเฟสที่เกิดขึ้นบน PEC โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุสามารถพิสูจน์โดยใช้การส่งคงรูป (conformal mapping) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ หาค่าได้จากสมการ (3.3)

$$C = \frac{W\epsilon_0(1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{W + g}{g} \right) \quad (3.5)$$

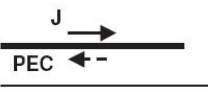
ค่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรกระแสตรงแสดงในรูปที่ 3.6(ข) ประกอบด้วยเวียและแผ่นโลหะ สำหรับกระแสโซลินอยด์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสามารถคำนวณด้วยกฎของแอมแปร์ จากวงจรสมมูลตัวเหนี่ยวนำคำนวณจากพลังสนามแม่เหล็กสะสมและกระดุนด้วยกระแส จะได้ค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ (3.4)

$$L = \mu h \quad (3.4)$$



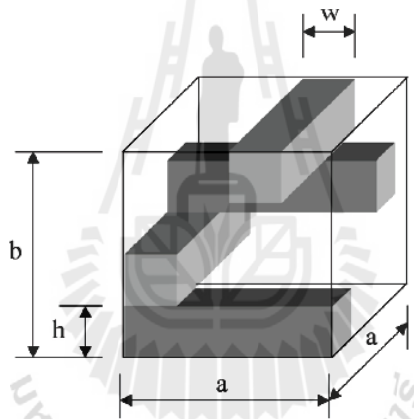
จากโครงสร้าง EBG สำหรับการประยุกต์ใช้งาน EBG ร่วมกับสายอากาศ เพื่อออกแบบให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพ จึงเป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่เป็นความต้องการสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายที่ทันสมัย ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor หรือ PEC) และ EBG พบว่าในกรณีที่ 1 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งฉากกับระนาบกราวด์ PEC กระแสจินตภาพ ( $J$ ) ก็จะมีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งฉากกับระนาบกราวด์ PEC เช่นเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี แต่สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สายอากาศมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงได้กำหนดตำแหน่งของสายอากาศให้อยู่ในแนวอนหรือขนานไปกับระนาบกราวด์ PEC พบว่าสายอากาศมีการแผ่พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศตรงข้ามกัน ดังเช่นกรณีที่ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะกระแสที่ไหลผ่านระนาบกราวด์ PEC จะมีการกลับเฟส ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการนำ EBG มาใช้ทดแทนระนาบกราวด์ PEC เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศตรงกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี และนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ดังกรณีที่ 3

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวด์ที่เป็น PEC และ EBG

ทิศทางการไหลของกระแส	ประสิทธิภาพ	โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน
	✓	✗
	✗	✓
	✓	✓

### 3.2.2 โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้น

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบราบ (planar woodpile EBG structures) (Weily et al., 2005; Lee et al., 2009) จะมีโครงสร้างทางกายภาพที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (layer-by-layer) ประกอบด้วยแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสก็ได้ มาจัดวางเรียงตัวกัน รูปที่ 3.7 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบราบที่มีสี่ชั้น ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) หรือความยาวซ้ำในระนาบแนวนอน (repeat distance in the horizontal plane:  $a$ ) ความกว้างของแท่ง (rod width:  $w$ ) และความสูงรวมของหนึ่งหน่วยเซลล์ (total height of the unit cell:  $b$ ) โดยความต่อเนื่องของชั้น คือ การตั้งฉากของแต่ละชั้นและแท่งที่วางขนานจะถูกชดเชยด้วยการวางในชั้นที่สี่ ที่จะต้องวางตรงตำแหน่งกึ่งกลางของแลตทิซ

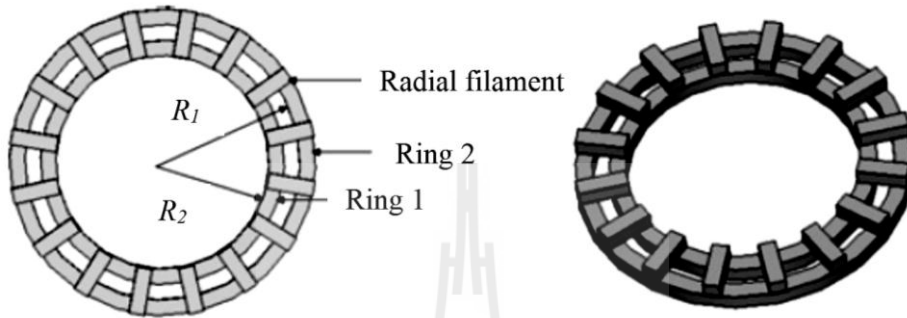


รูปที่ 3.7 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบราบที่มีสี่ชั้น

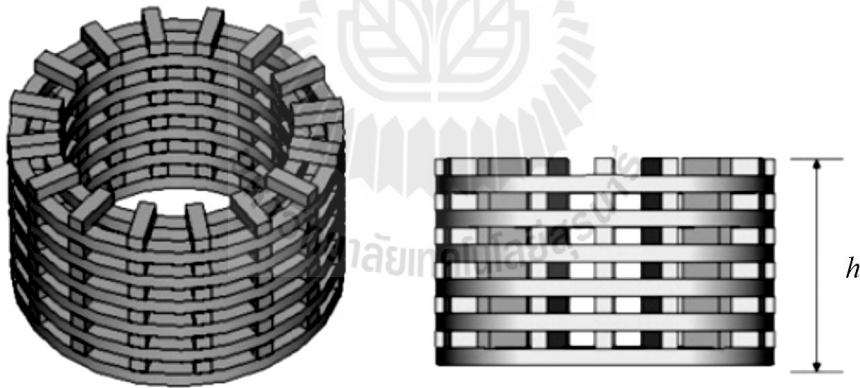
(Weily et al., 2005)

นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบทรงกระบอก (cylindrical woodpile EBG structures) (Lee et al., 2010) สำหรับการเรโซแนนซ์ในโหมดแม่เหล็กตามขวาง (TM mode resonances) ในโพรงทรงกระบอก (cylindrical cavity) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ไม่ต้องการช่องว่างแถบ (band gap) ทั้ง 3 มิติ คือ ด้านกว้าง ยาว และลึก แต่ต้องการช่องว่างแถบในทิศทางเดียวที่รัศมีของทรงกระบอกเท่านั้น ดังนั้น โพรงทรงกระบอกจึงถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าในแนวตั้งเท่านั้น จากรูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างเรขาคณิตของโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบทรงกระบอกที่มีสองวงแหวน (filament rings) ซึ่งมีขนาดต่างกัน และลิบหกแท่งวางตามแนวรัศมี (radial filaments) สำหรับโครงสร้างของโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงพื้นแบบทรงกระบอกประกอบด้วย

ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง (filament thickness หรือ diameter:  $w$ ) ความสูงหรือความยาว (height หรือ length:  $h$ ) จำนวนแท่งวางตามแนวรัศมี (number of radial filaments:  $N_{rad}$ ) จำนวนวงแหวนของทรงกระบอก (number of rings of the cylinder:  $N_{ring}$ ) และรัศมีของแต่ละวงแหวน (radii of each ring:  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , เมื่อ  $n = N_{ring}$ )



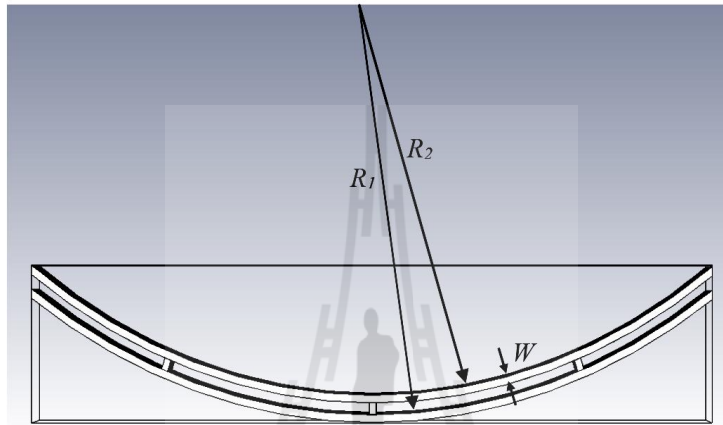
(ก) โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอกหนึ่งชั้น ( $N_{ring} = 2, N_{rad} = 16$ )



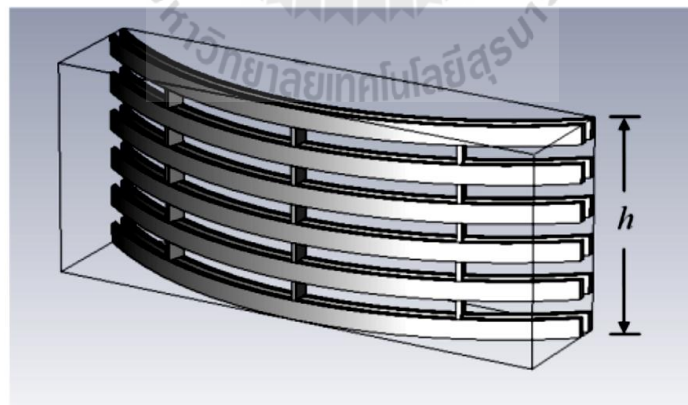
(ข) โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอกสูงหกชั้น

รูปที่ 3.8 โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ซึ่งได้นำแนวคิดจากโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงแบบราบ และแบบทรงกระบอก มาแก้ไขดัดแปลงให้เป็นแบบโค้ง (curved woodpile EBG structures) แสดงดังรูปที่ 3.9 ที่มี  $N_{ring} = 2$  และ  $N_{rad} = 3$  โดยกำหนดพารามิเตอร์ตามโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงแบบทรงกระบอก



(ก) โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงแบบโค้งหนึ่งชั้น ( $N_{ring} = 2, N_{rad} = 3$ )



(ข) โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงแบบโค้งสูงหกชั้น

รูปที่ 3.9 โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงแบบโค้ง

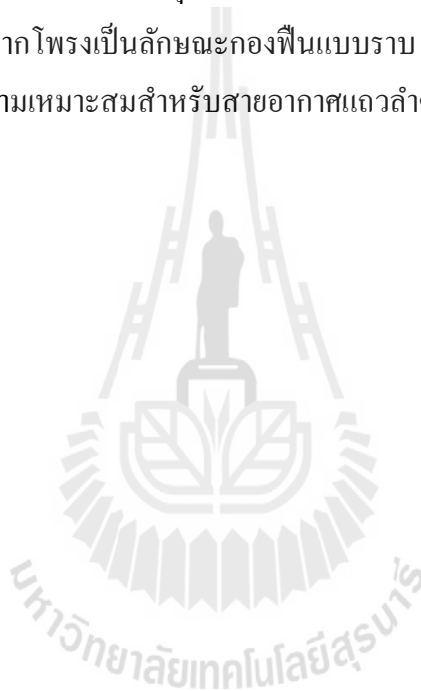
### 3.2.3 โครงสร้าง EBG และอภิวัดดู

อภิวัดดู (metamaterials) คือ วัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ปกติเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (inhomogeneous) (อังควิสิฐพันธ์, 2553; ชัยมูล และ อัครเอกผาลิน, 2554) คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่วาดังกล่าว คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (electric permittivity:  $\epsilon$ ) ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability:  $\mu$ ) และค่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index:  $n$ ) ดังนั้นอภิวัดดูสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝังของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไปยังในตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนดซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระได้แก่ คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวกลาง ขนาด รูปร่างและส่วนประกอบที่จะใส่เข้าไปไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นหรือการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป เช่น ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ และค่าดัชนีการหักเหของแสงเป็นลบ ด้วยเหตุผลนี้วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วัสดุเหนือธรรมชาติ (วงศ์เกษมและมาตรา, 2552)

โครงสร้าง EBG ซึ่งเป็นหนึ่งในอภิวัดดู (Yang and Rahmat-Samii, 2009) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งผิวที่มีอิมพีแดนซ์สูง (high impedanc surface หรือ HIS) และมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าที่เข้าใกล้ศูนย์ (epsilon near zero หรือ ENZ) โดยทั่วไปโครงสร้าง EBG จะประกอบด้วย โลหะรูปต่าง ๆ ที่เป็นรายคาบวางบนระนาบกราวด์ที่แยกด้วยชั้นรองไดอิเล็กตริก และอาจจะเชื่อมต่อ (via) หรือไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ก็ได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถใช้ EBG ในการออกแบบเพื่อลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ นอกจากนี้ EBG ยังช่วยในการกำจัดคลื่นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น

### 3.3 สรุป

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศไมโครสตริป โดยเริ่มศึกษาจากโครงสร้างของสายอากาศก่อน การปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปให้มีความกว้างแถบที่กว้างด้วยการเซาะร่องบนระนาบกราวด์ จนได้เป็นสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป รูปร่างของร่องที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ต่อมาได้ศึกษาในส่วนของการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศ โดยได้เลือกวิธีการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ทั้งการออกแบบและการเมทซ์สายอากาศ และในที่สุดท้ายได้ศึกษาการจัดแถวลำดับเพื่อให้ได้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปที่มีอัตราขยายที่สูง สำหรับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ได้เน้นที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ซึ่งได้นำแนวคิดจากโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบราบ และแบบทรงกระบอก มาแก้ไขดัดแปลงให้เป็นแบบโค้งที่มีความเหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบ



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

ในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริปกับโครงสร้าง EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยระบบสายอากาศประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ (1) สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม (2) โครงสร้าง EBG และ (3) ระบบป้อนกำลังงาน โดยในขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบและจำลองผลสายอากาศสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความกว้างแถบที่เหมาะสม จากนั้นได้เพิ่มโครงสร้าง EBG เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของ การขจัดคลื่นผิวและการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ

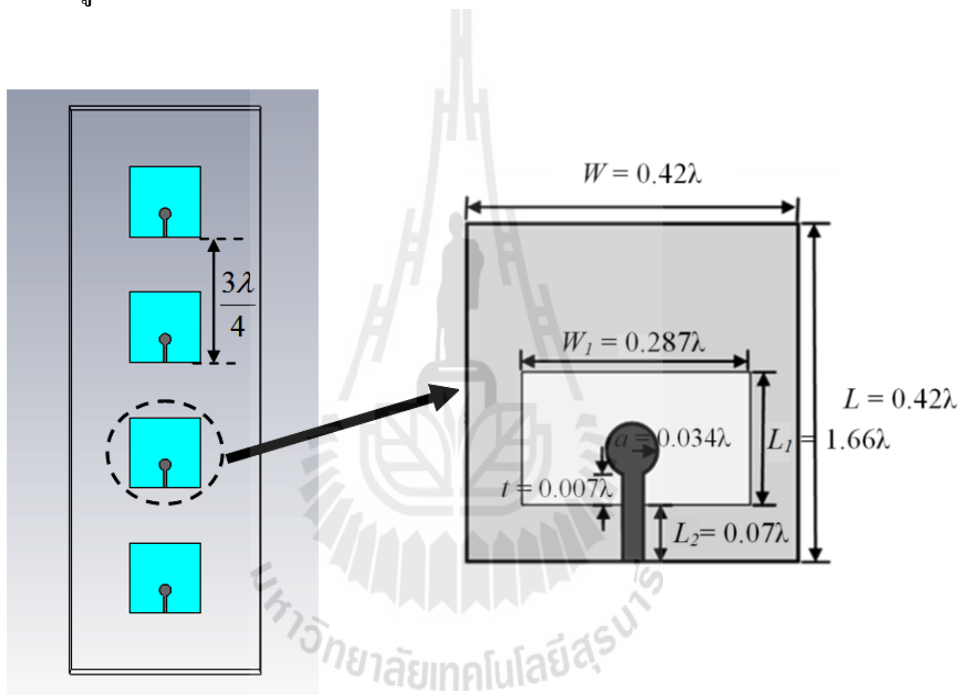
#### 4.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

##### 4.1.1 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม

สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007) ถูกออกแบบให้ทำงานในระบบโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (Universal Mobile Telecommunications System หรือ UMTS) ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz (1.92 GHz ถึง 2.17 GHz) เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดยสายอากาศถูกพิมพ์ลงบนแผ่น FR4 ( $\epsilon_r = 4.5, \tan\delta = 0.02$ ) ที่มีขนาด 60 มิลลิเมตร  $\times$  60 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม ได้แก่ รัศมีของแพทช์วงกลม (radius of circular patch:  $a$ ) ระยะห่างของช่องว่างระหว่างแพทช์วงกลมและเส้นไมโครสตริป (distance of gap:  $t$ ) ความยาวของเส้นไมโครสตริป (microstrip line length:  $L_2$ ) ความกว้างของระนาบกราวด์ (width of ground plane:  $W$ ) ความยาวของระนาบกราวด์ (length of ground plane:  $L$ ) และขนาดของช่องที่ระนาบกราวด์ (wide-slot ground plane: Size  $W_1 \times L_1$ ) แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยได้มีการออกแบบให้สายอากาศแมทซ์ที่ 50 โอห์ม และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมีอัตราขยายเท่ากับ 5 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz

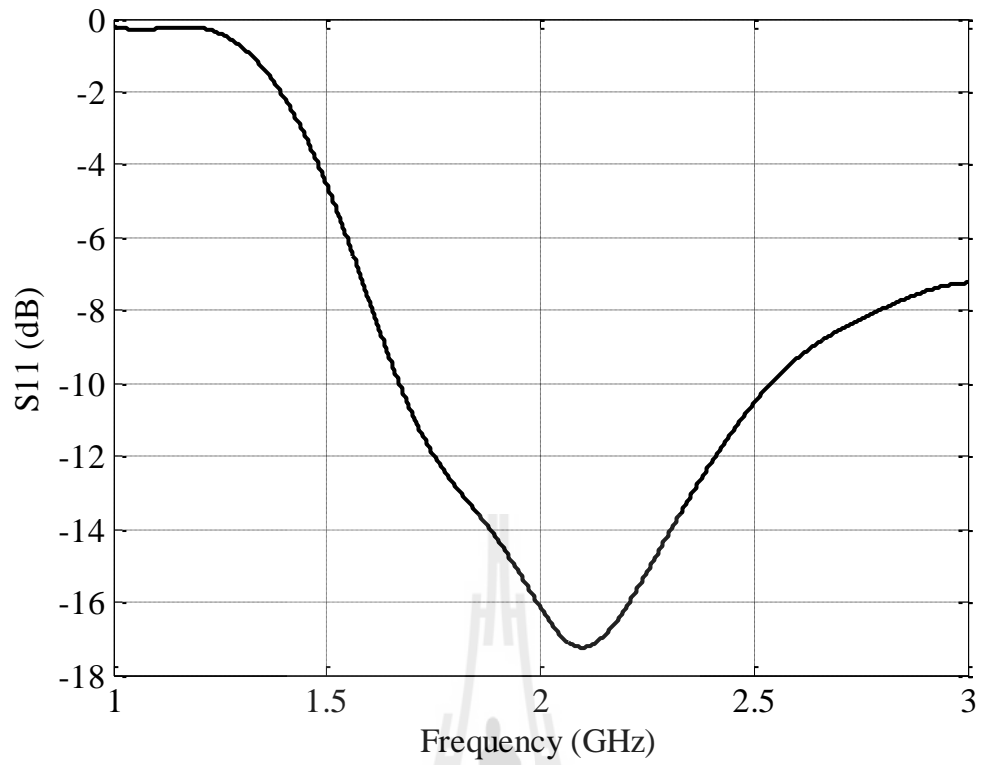
#### 4.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม

ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ วิธีที่ง่ายและนิยม คือ การจัดแถวลำดับ งานวิจัยนี้จึงได้นำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมาจัดแถวลำดับแบบเชิงเส้น แบบ  $1 \times 4$  โดยมีระยะห่างของแต่ละอิลิเมนต์เท่ากับ  $3\lambda/4$  แสดงดังรูปที่ 4.1 และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลมมีค่ากำลังการสะท้อน (reflected power หรือ  $S_{11}$ ) ที่  $-17.24$  dB มีอัตราขยายเท่ากับ  $11.05$  dB ที่ความถี่  $2.1$  GHz และมีความกว้างลำครึ่งกำลัง (half-power beamwidth หรือ HPBW) ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็นอัตราส่วนมุมกวาดต่อมุมเงย (ratio of azimuth pattern to elevation pattern หรือ AZ:EL) เท่ากับ  $17^\circ:98^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



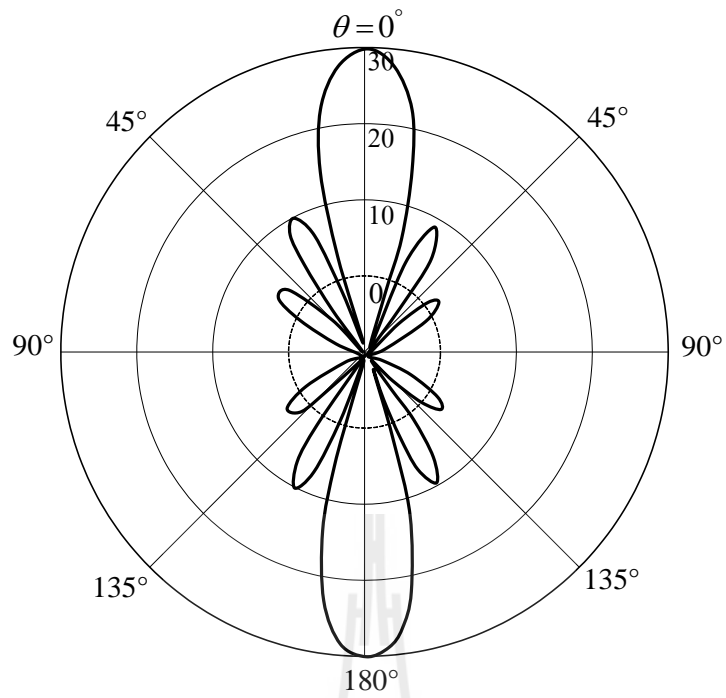
รูปที่ 4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม



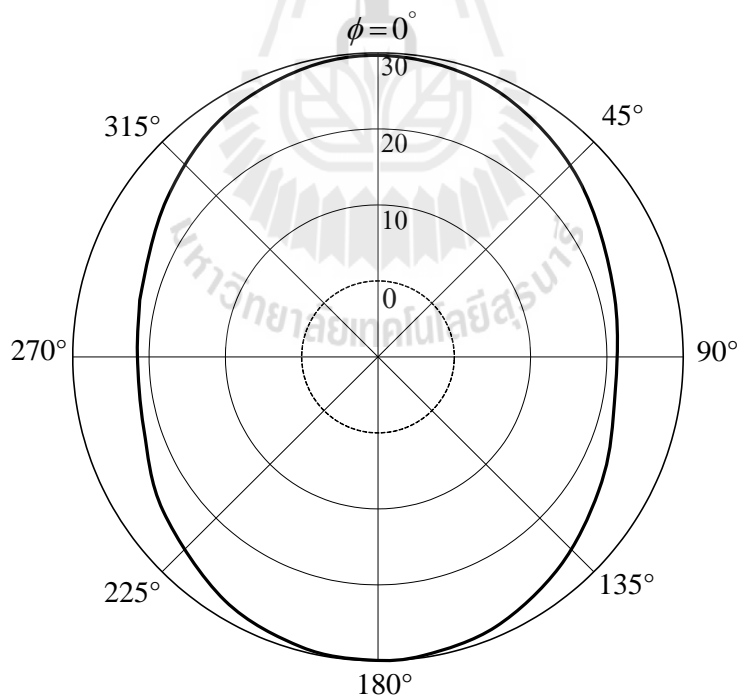


รูปที่ 4.2 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป





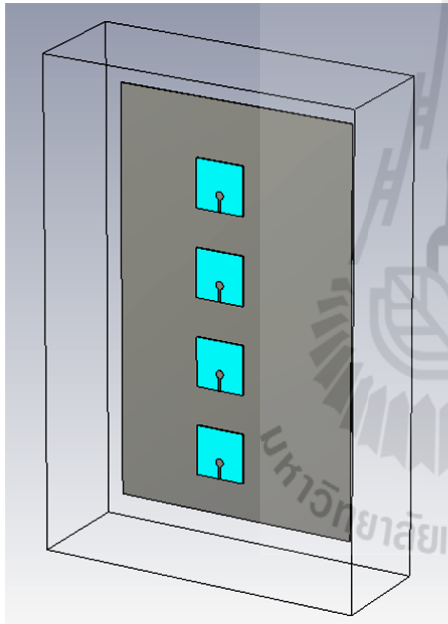
(ก) ระบายมุมเงย



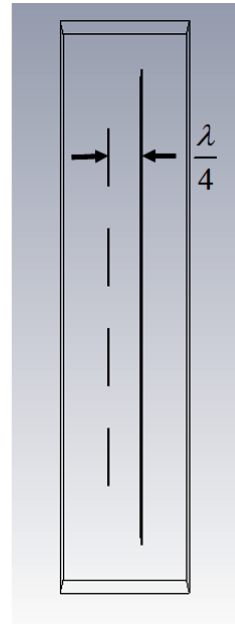
(ข) ระบายมุมกวาด

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลังของระนาบกรวดของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 4.4 เพื่อปรับให้สายอากาศแถวลำดับมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เป็นแบบทิศทางเดียว เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสถานีฐานระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ ซึ่งแผ่นสะท้อนด้านหลังมีขนาดความกว้างเท่ากับ 300 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 500 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนด้านหลังและสายอากาศแถวลำดับเท่ากับ  $\lambda/4$  โดยพบว่าระยะห่างนี้มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแถวลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 และจากผลการจำลองผลพบว่าสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปที่มีแผ่นสะท้อนด้านหลังมี  $S_{11}$  เท่ากับ -30.64 dB มีอัตราขยายเท่ากับ 14 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz และมี HPBW ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็นอัตราส่วน AZ:EL เท่ากับ 16.5°:89.6° แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

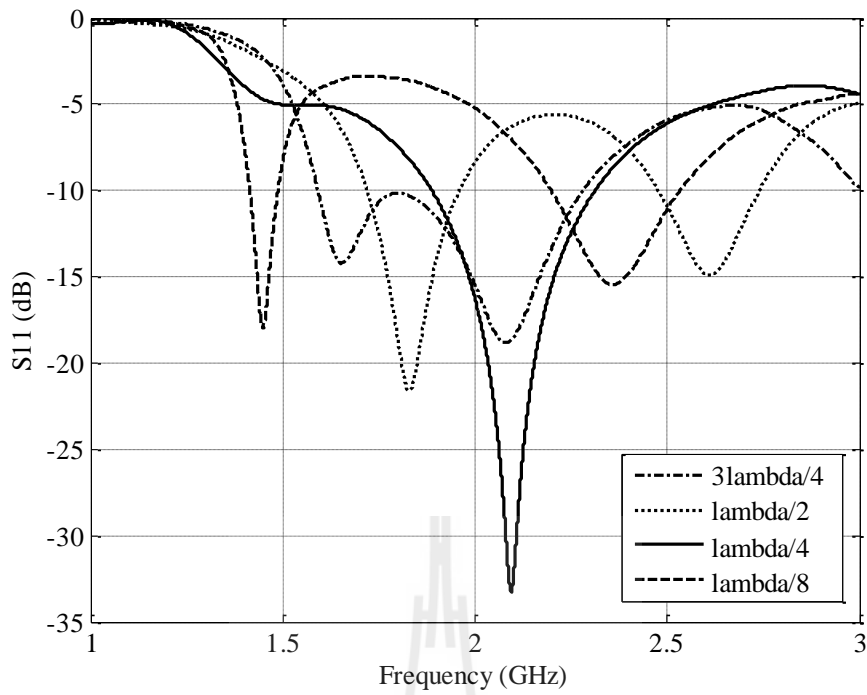


(ก) ด้านหน้า

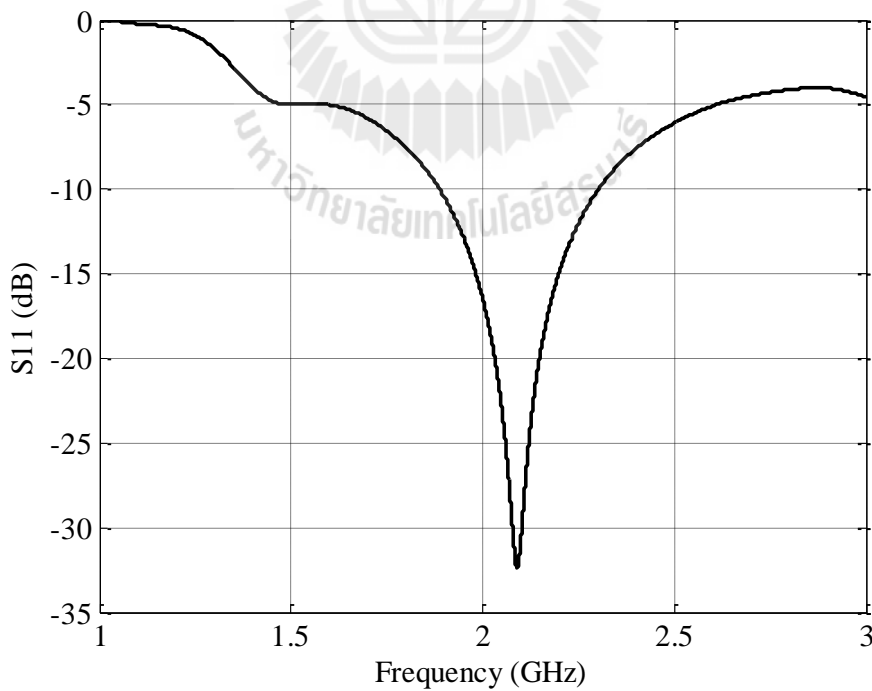


(ข) ด้านข้าง

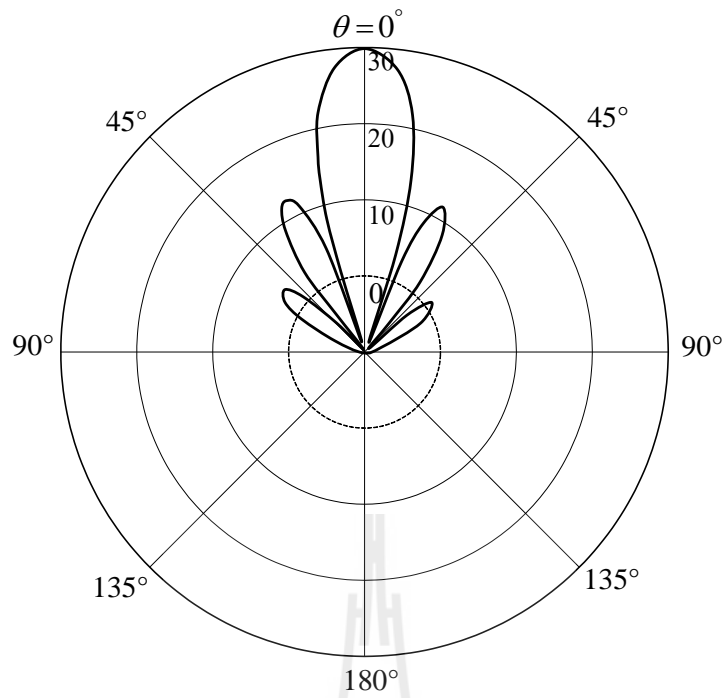
รูปที่ 4.4 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง



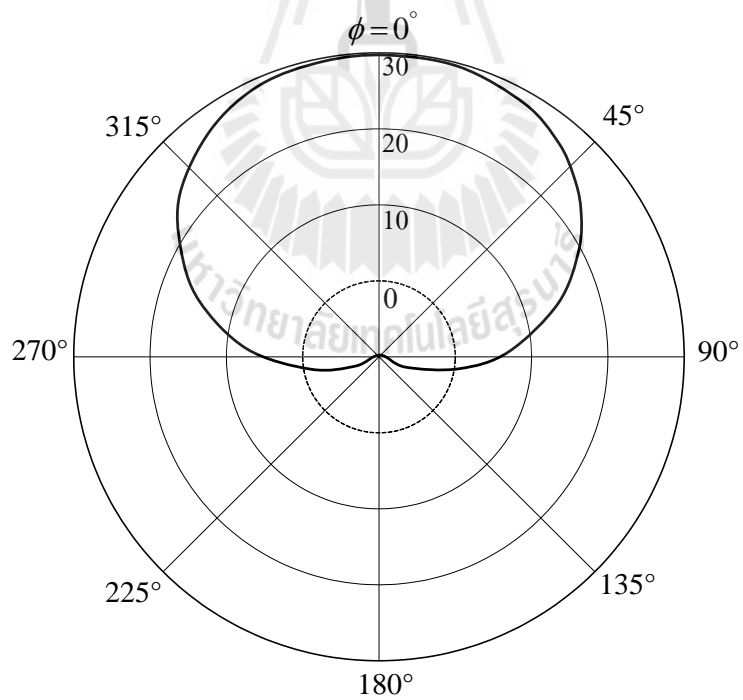
รูปที่ 4.5 ผลของค่ากำลังการสะท้อนต่อความถี่เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนด้านหลัง และสายอากาศแถวลำดับมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง



(ก) ระบายมุมเงย



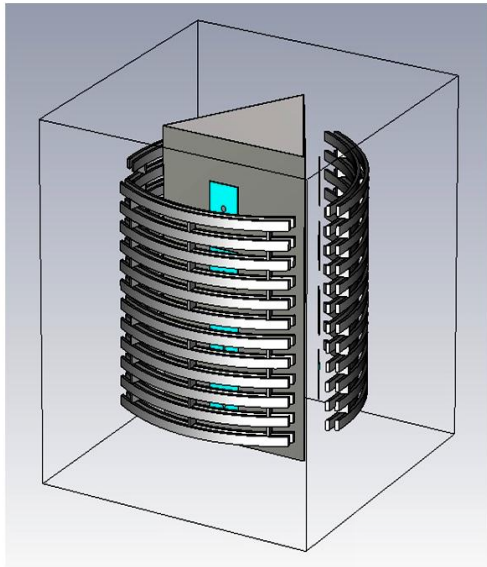
(ข) ระบายมุมกวาด

รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องไมโครสตริป  
เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง

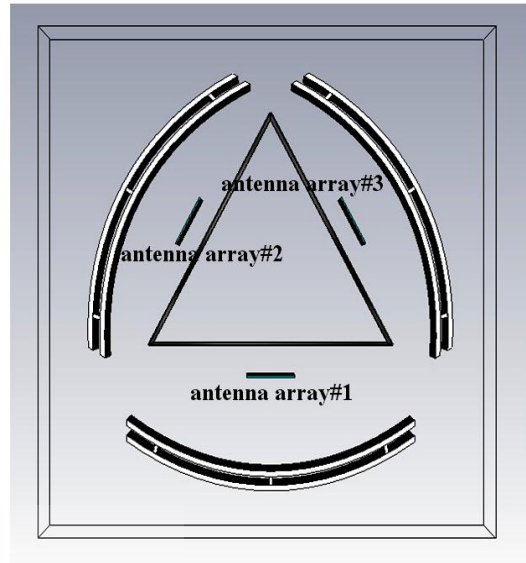
#### 4.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลังร่วมกับโครงสร้าง EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

ดังที่กล่าวในบทที่ 3 งานวิจัยนี้ได้้นำโครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง ซึ่งได้นำแนวคิดจากโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบราบ (Weily et al., 2005; Lee et al., 2009) และแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010) มาแก้ไขดัดแปลงให้เป็นแบบโค้ง (curved woodpile EBG structures) แสดงดังรูปที่ 3.9 (ในบทที่ 3) โดยเลือกใช้แท่งอะลูมิเนียม ( $\epsilon_r = 8.4$  และ  $\tan\delta = 0.002$ ) ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากในการออกแบบ และได้กำหนดพารามิเตอร์ตามโพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบทรงกระบอก (Wongsan et al., 2014)

จากรูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลังร่วมกับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้ง โดยได้นำสายอากาศแถวลำดับมาวางจัดเป็นสามเหลี่ยมและนำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ มาวางไว้ด้านบนของสายอากาศแถวลำดับในลักษณะเป็นโพรงสามเหลี่ยม (triangular EBG cavity) ซึ่งแต่ละด้านจะประกอบด้วยโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปจำนวน 4 อิลิเมนต์ และแผ่นสะท้อนด้านหลัง การจัดวางสายอากาศในลักษณะนี้จะทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้ 360° รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงค่ากำลังการสะท้อนและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแถวลำดับแสดงเป็นผลสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมไว้ที่ด้านบนของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปทำให้สายอากาศแถวลำดับมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นถึง 3 dB หรือหนึ่งเท่าตัว โดยไม่ได้เพิ่มจำนวนของอิลิเมนต์ในการจัดแถวลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก โครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นวงจรรีโซแนนซ์คลื่นที่ความถี่ 2.1 GHz ส่งผลให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสายอากาศได้ ในส่วนของการจัดคลื่นผิวส่งผลให้ระบบสายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น และมีระดับโหลบด้านข้าง (side lobe level หรือ SLL) ที่ลดลง



(ก) ด้านหน้า

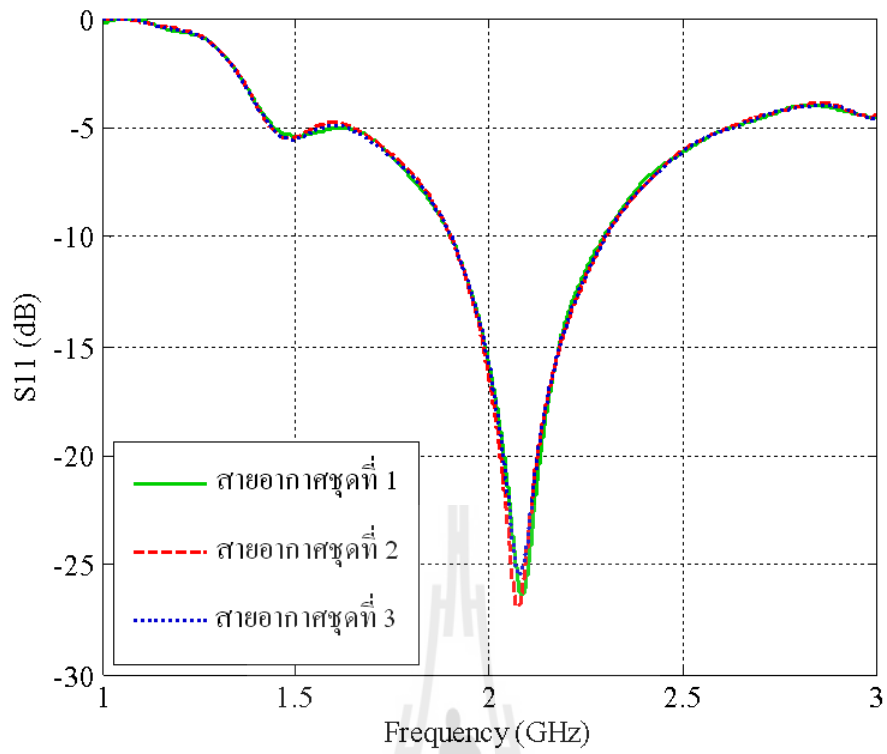


(ข) ด้านบน

รูปที่ 4.8 ระบบสายอากาศ

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST

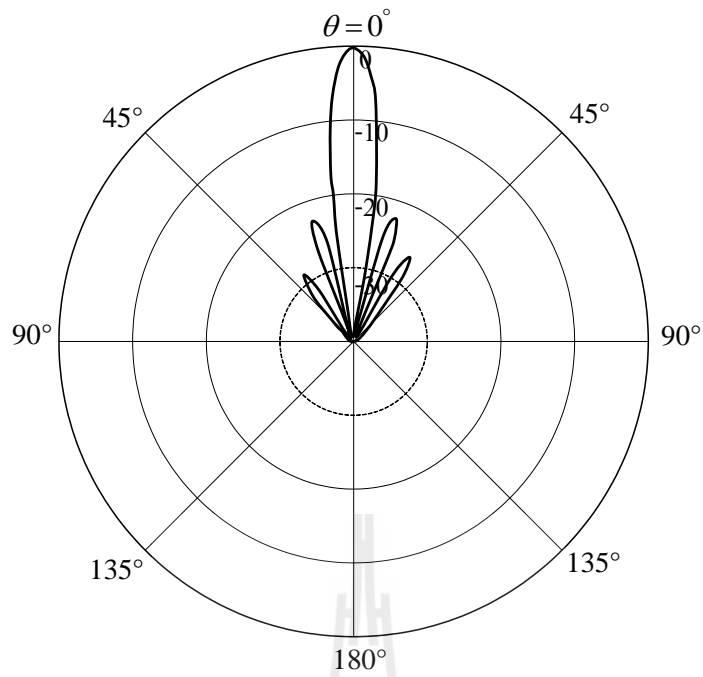
สายอากาศ	อัตราขยาย (dB)	$S_{11}$ (dB)	BW (%)	HPBW AZ:EL	SLL (dB) (E-plane/H-plane)
สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ไมโครสตริป 1×4 อิลิเมนต์	11.05	-17.24	41.1	98°:17° (5.8:1)	-12.7/-
สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อน ด้านหลัง	14	-30.64	19.7	89.6°:16.5° (5.4:1)	-12.8/-39.6
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1	17.2	-25.26	18.9	62.6°:8.6° (7.3:1)	-15.8/-29.0
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 2	17.1	-23.86	19.1	62.8°:8.6° (7.3:1)	-15.7/-29.3
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 3	17.1	-23.71	18.9	62.8°:8.6° (7.3:1)	-15.6/-28.8



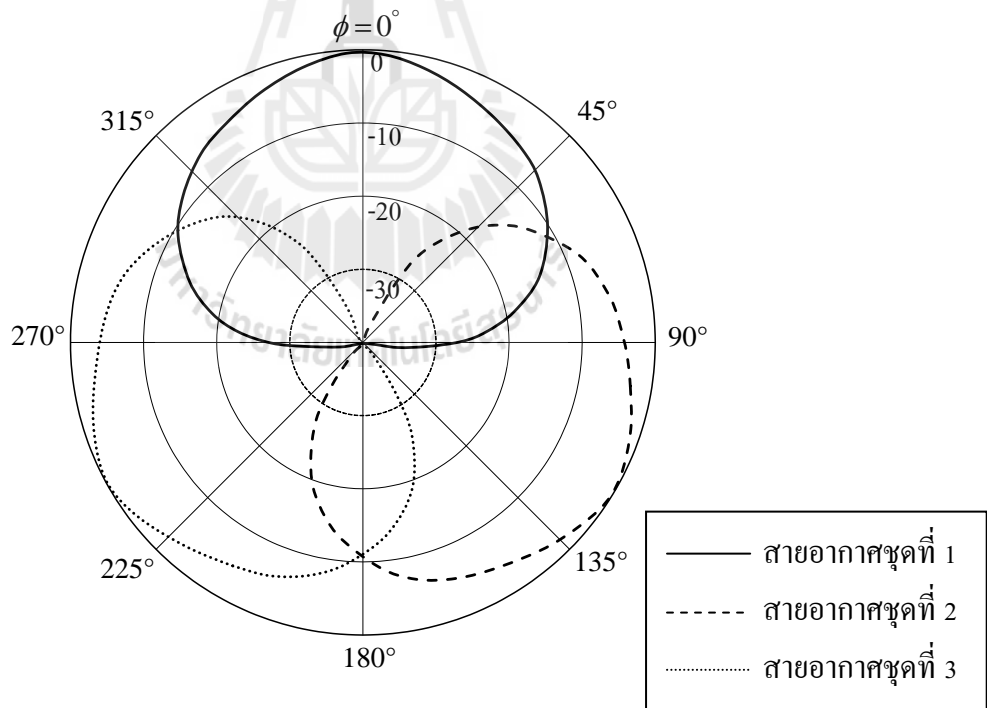
รูปที่ 4.9 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3







(ก) ระบายมุมเงย



(ข) ระบายมุมกวาด

รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3

### 4.3 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อให้ได้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปต้นแบบที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในสถานีฐานระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ โดยทำการจัดแถวลำดับแบบ  $1 \times 4$  เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศในเบื้องต้น มีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์เท่ากับ  $3\lambda/4$  จากนั้นได้นำแผ่นตัวสะท้อนมาวางด้านหลังสายอากาศแถวลำดับ เพื่อควบคุมให้เป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง แล้วสร้างแบบจำลองขึ้นมาอีกสองชุด โดยวางทำมุมกัน  $120^\circ$  เพื่อให้ระบบสายอากาศครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้ครบทั้ง  $360^\circ$  และในขั้นตอนสุดท้ายได้นำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้ง ซึ่งได้มีการคำนวณและออกแบบขนาดที่เหมาะสมมาวางด้านหน้าสายอากาศทั้งสามชุด เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สูงยิ่งขึ้น โดยได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบสายอากาศสำหรับการนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

## บทที่ 5

### ผลการวัดทดสอบ

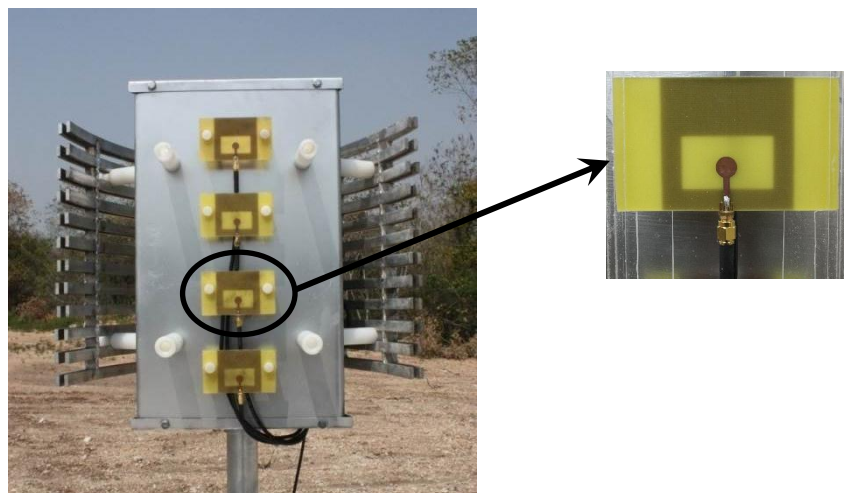
จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตลอดจนการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปกับโครงสร้าง EBG ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ดังนั้นในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศแถวลำดับต้นแบบขึ้น เพื่อทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่า  $S_{11}$  อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio หรือ SWR) แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ (impedance หรือ Z) และอัตราขยาย โดยมีตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศแถวลำดับต้นแบบซึ่งในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้นได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8720C สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

#### 5.1 วิธีการสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จนได้ขนาดและรูปแบบของแถวลำดับของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปตามที่ต้องการแล้ว ซึ่งจะแบ่งระบบสายอากาศออกเป็นสามส่วน ได้แก่ (1) สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม และตัวสะท้อนด้านหลัง โดยสายอากาศจะถูกจากสร้างวัสดุที่เป็น FR4 และแผ่นตัวสะท้อนด้านหลังถูกสร้างจากแผ่นเหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (perfect electric conductor หรือ PEC) มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 และแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 (2) โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้งดังรูปที่ 5.2 โดยโครงสร้าง EBG ถูกสร้างจากอะลูมิเนียมที่เป็นแท่งสี่เหลี่ยมมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.2 และ (3) ตัวแบ่งกำลังงานแบบเข้า 1 พอร์ต แล้วออก 12 พอร์ต ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้แก่ระบบสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยตัวแบ่งกำลังงานนี้ทำงานในช่วงความถี่ 0.8 GHz ถึง 2.2 GHz มีค่าการสูญเสียภายใน (insertion loss หรือ  $L_i$ ) เท่ากับ 1.2 dB และค่า SWR เท่ากับ 1.25 และรูปที่ 5.4 แสดงระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่เมื่อนำองค์ประกอบทั้งสามส่วนของสายอากาศมารวมกันทั้งสามชุด

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลมและแผ่นตัวสะท้อน

พารามิเตอร์	ขนาด ( $\lambda$ )	ขนาด (มิลลิเมตร)
รัศมีของแพทช์วงกลม (circular patch of the radius หรือ $a$ )	0.034	4.86
ความกว้างของระนาบกราวด์ (width of ground plane หรือ $W$ )	0.42	60
ความยาวของระนาบกราวด์ (length of ground plane หรือ $L$ )	0.42	60
ความกว้างของร่องระนาบกราวด์ (width of wide-slot ground plane หรือ $W_p$ )	0.287	41
ความยาวของร่องระนาบกราวด์ (length of wide-slot ground plane หรือ $L_p$ )	0.166	23.72
ความยาวของเส้นไมโครสตริป (microstrip line length หรือ $L_2$ )	0.07	10
ความกว้างของแผ่นตัวสะท้อน (width of reflector หรือ $W_r$ )	2.1	300
ความยาวของแผ่นตัวสะท้อน (length of reflector หรือ $L_r$ )	3.5	500



รูปที่ 5.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลมและตัวสะท้อนด้านหลัง

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงรีแบบโค้ง

พารามิเตอร์	ขนาด ( $\lambda$ )	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความหนาของแท่ง (diameter หรือ $w$ )	0.053	7.53
รัศมีวงนอก (outer radius หรือ $R_1$ )	3.45	493.11
รัศมีวงใน (inner radius หรือ $R_2$ )	3.34	477.14
ความสูง (height หรือ $h$ )	2.61	372.5
จำนวนของชั้นต่อหนึ่งวงโค้ง (number of curved filaments/ring หรือ $N_c$ )	12	
จำนวนของแท่ง (number of radial filaments หรือ $N_{rad}$ )	3	
จำนวนวงโค้ง (number of rings of the curved หรือ $N_{ring}$ )	2	



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านบน

รูปที่ 5.2 โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงรีแบบโค้ง



รูปที่ 5.3 ตัวแบ่งกำลังงาน



(ก) ด้านหน้า

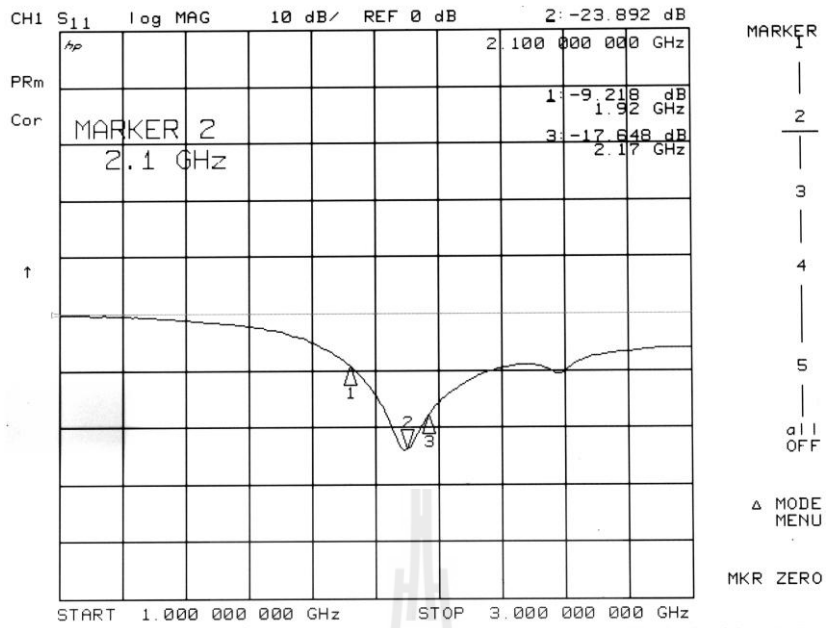
(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 5.4 ระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ

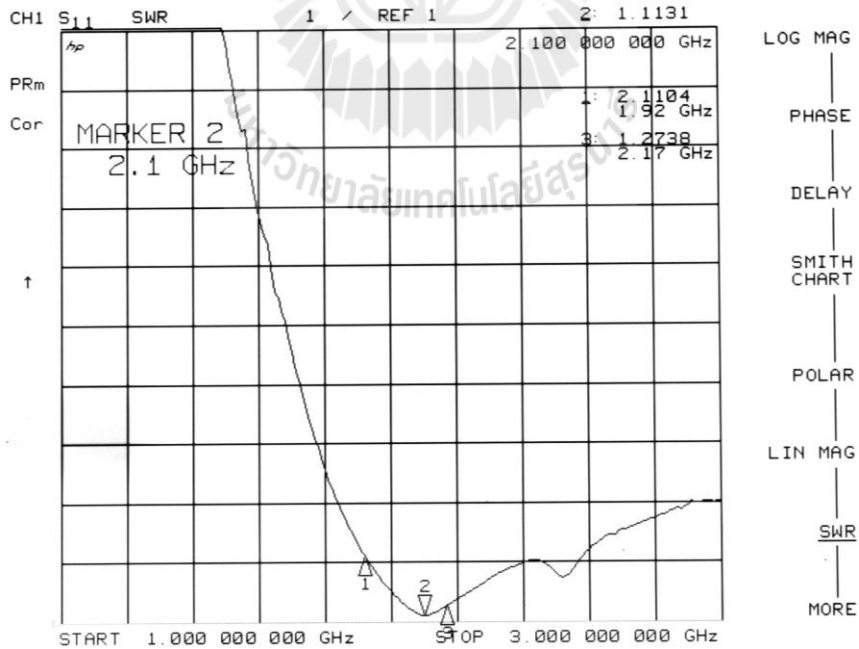
## 5.2 ผลการวัดทดสอบกำลังการสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความกว้างแถบ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมทซ์อิมพีแดนซ์ด้านเข้าคือ ค่า  $S_{11}$  และ SWR ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  หมายถึง การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้าของสายอากาศซึ่งขนาดของ  $S_{11}$  อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมทซ์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมทซ์ที่สมบูรณ์ดีที่สุด และสำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมทซ์ที่สมบูรณ์ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมทซ์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ (ริงสรรค์ และ ชูวงศ์, ม.ป.ป) ในการใช้งานด้านวิศวกรรมสายอากาศค่าของ  $S_{11}$  ที่ยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงจะยอมรับได้ว่าสายอากาศนั้นมีการแมทซ์ที่ดี รูปที่ 5.5 แสดงกราฟค่า  $S_{11}$  ของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบทั้ง 3 ชุด เมื่อป้อนกำลังให้สายอากาศทำงานพร้อมกัน จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz สายอากาศแฉวลำดับต้นแบบมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -23.892 dB ซึ่งสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 1.1131 แสดงดังรูปที่ 5.6 จึงสรุปได้ว่าสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบมีการแมทซ์ที่ดี และรูปที่ 5.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า  $S_{11}$  ระหว่างผลจากการวัดทดสอบ และผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

สำหรับความกว้างแถบหรือแบนด์วิดท์ (bandwidth หรือ BW) คือ ความกว้างของแถบคลื่นความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ ซึ่งดูได้จากการแมทซ์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม จากกราฟ  $S_{11}$  รูปที่ 5.5 สามารถอ่านค่าความกว้างแถบของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบได้ คือ มีค่า  $S_{11} \leq -10$  dB ตั้งแต่ 1.92 - 2.33 GHz หรือ 0.41 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์จะมีค่าเท่ากับ 19.3% ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz ได้

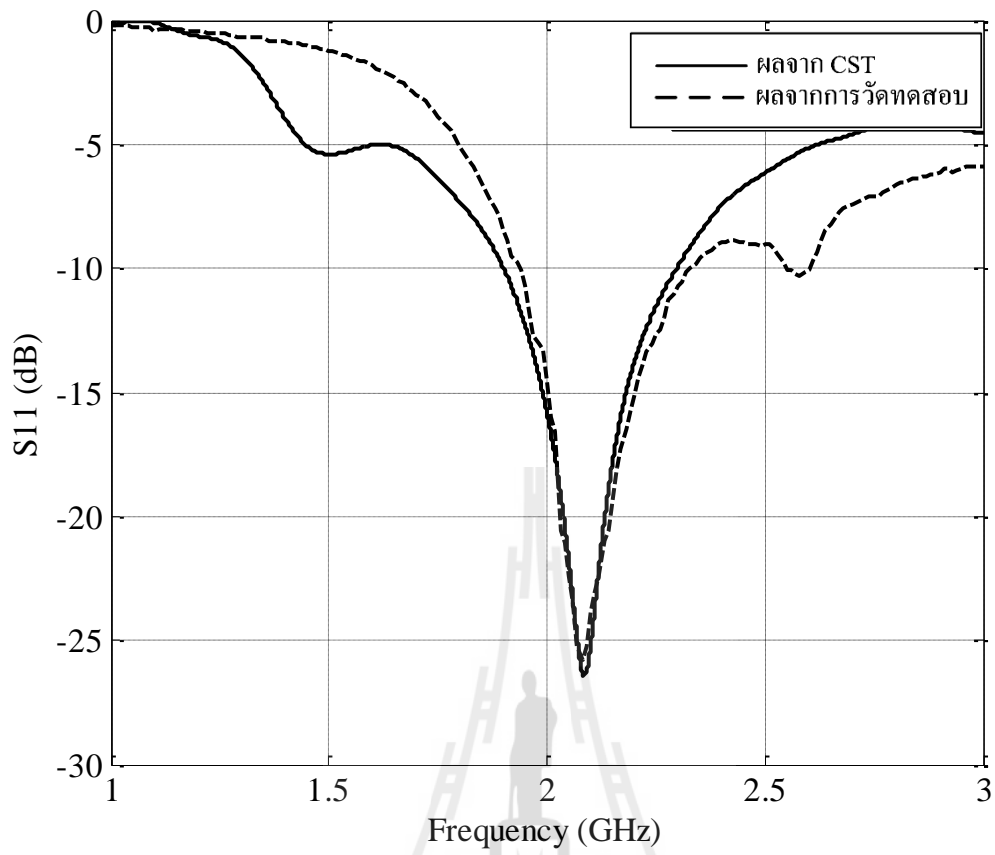


รูปที่ 5.5 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบจากการวัดทดสอบ



รูปที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบจากการวัดทดสอบ

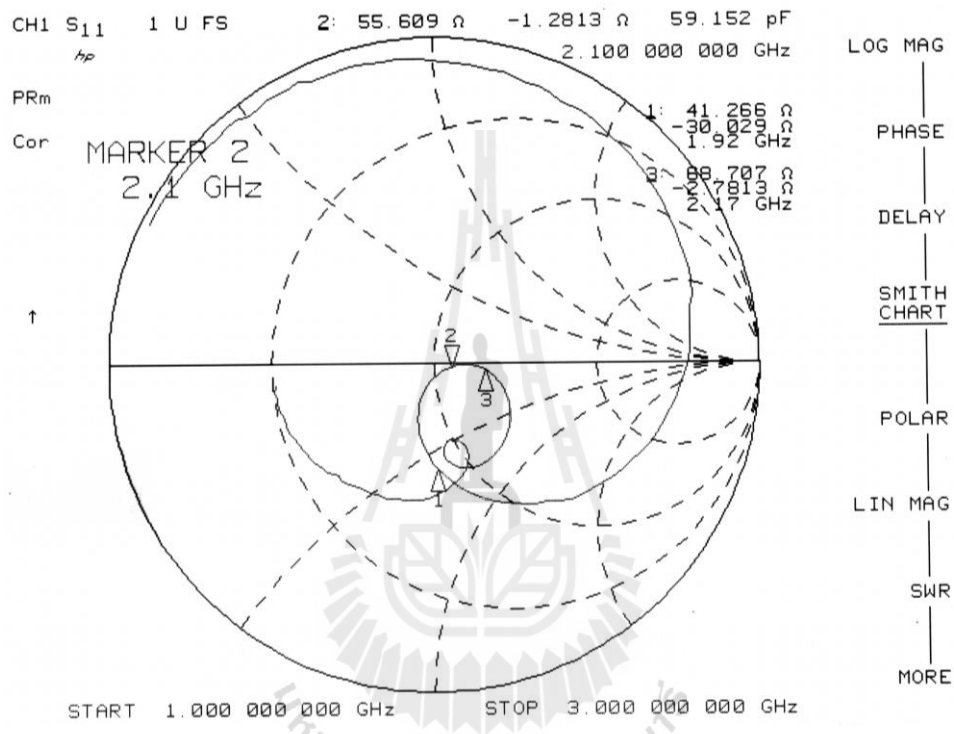




รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังการสะท้อนระหว่างผลจากการวัดทดสอบและจากการจำลอง

### 5.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

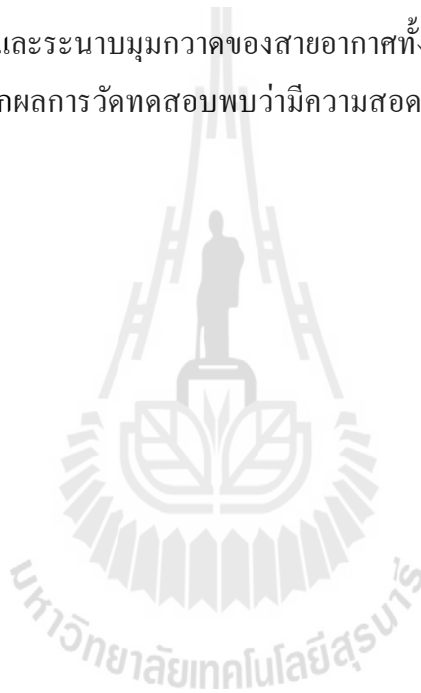
จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบทั้ง 3 ชุด เมื่อป้อนกำลังให้สายอากาศทำงานพร้อมกัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $55.609 - j1.281 \Omega$  ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับได้ คือ  $50 \Omega$

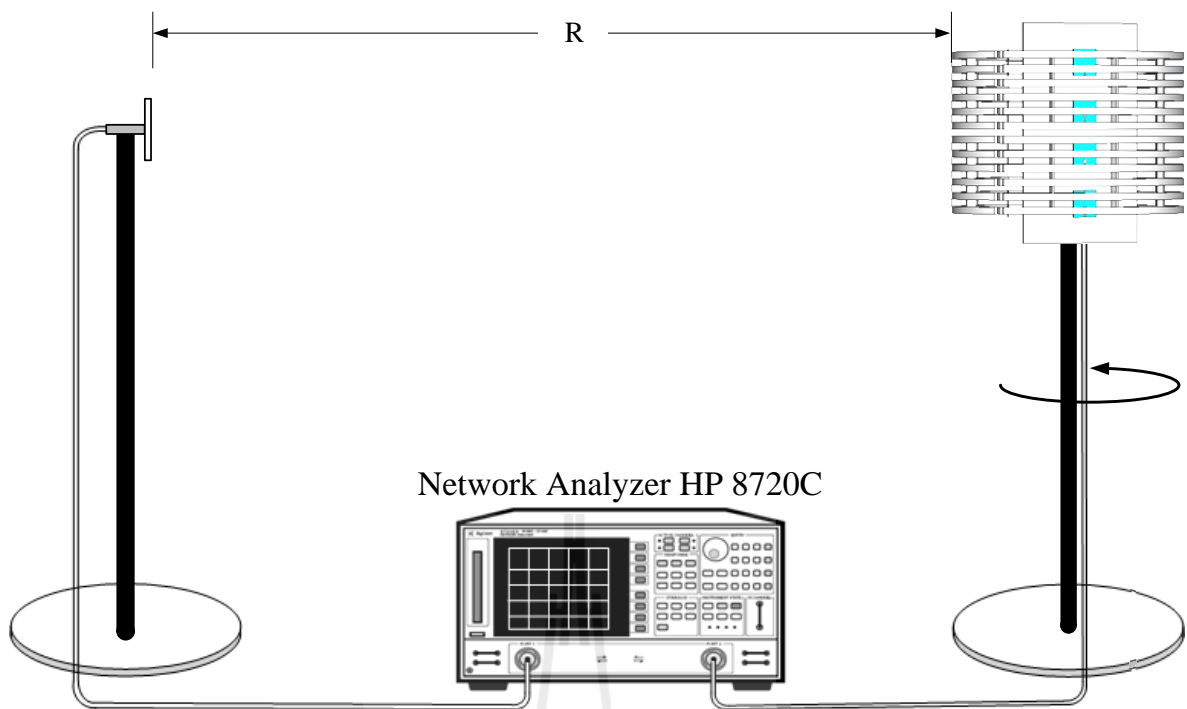


รูปที่ 5.8 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบจากการวัดทดสอบ

#### 5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในพื้นที่โล่งภายนอกอาคาร (outdoor) สำหรับระยะ  $R$  ในการติดตั้งสายอากาศวัดทดสอบและสายอากาศอ้างอิงจะเท่ากับสนามระยะไกล คือ  $R \geq 2D^2 / \lambda$  โดยที่  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบที่ยาวที่สุด คือ 0.59 เมตร ดังนั้น  $R \geq 4.87$  เมตร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะ  $R = 5$  โดยใช้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป มีความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.1 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแกลวลำดับต้นแบบที่นำมาวัดทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับดังรูปที่ 5.9 ซึ่งจะมีการหมุนสายอากาศภาครับรอบแนวแกนหมุนเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม  $0^\circ$  ถึง  $360^\circ$  ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับต้นแบบในระนาบมุมเงย โดยได้ทำการวัดทดสอบเพียงชุดที่ 1 และระนาบมุมกวาดของสายอากาศทั้ง 3 ชุด ซึ่งเป็นระนาบที่นำมาใช้งานจริง แสดงดังรูปที่ 5.10 จากผลการวัดทดสอบพบว่ามีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



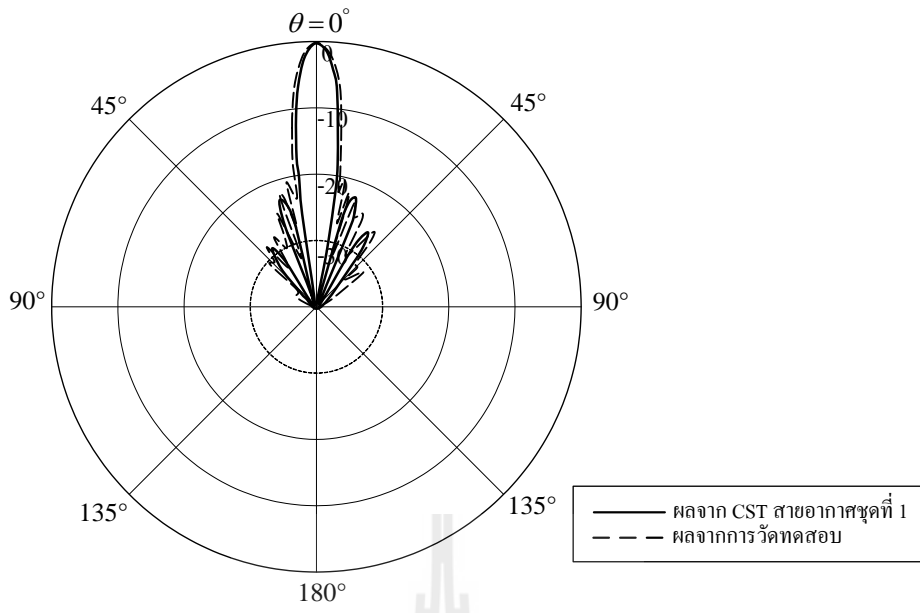


(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

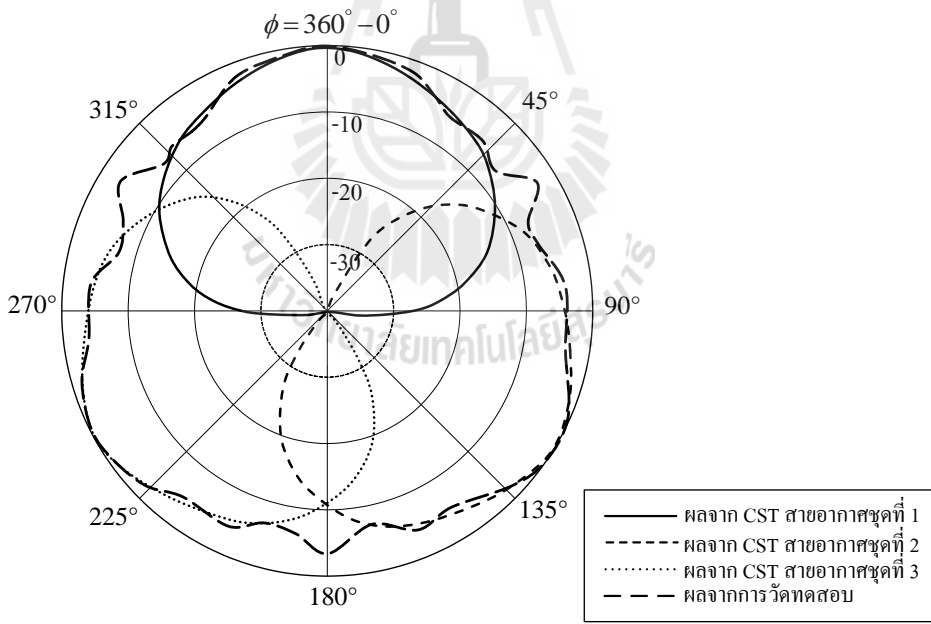


(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

รูปที่ 5.9 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน



(ก) ระนาบมุมเงย



(ข) ระนาบมุมกวาด

รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับต้นแบบ

### 5.5 ผลการวัดทดสอบอัตรายาย

สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบนั้นแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ (1) การวัดอัตรายายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป เพื่อหาอัตรายายของสายอากาศอ้างอิงสำหรับการวัด แสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวที่หนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ และ (2) การวัดอัตรายายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ โดยกำหนดให้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปเป็นสายอากาศภาคส่ง และสายอากาศแถวลำดับต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับแสดงดังรูปที่ 5.12

สำหรับการคำนวณค่าอัตรายายของสายอากาศจะใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาอัตรายายของสายอากาศ โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้ คือ

$$G_{r,dB} + G_{t,dB} = P_{r,dB} - P_{t,dB} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.1)$$

โดยที่	$P_t$	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง
	$P_r$	คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ
	$G_{dB}$	คือ อัตรายายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเมื่อสายอากาศตัวทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
	$G_t$	คือ อัตรายายของสายอากาศภาคส่ง
	$G_r$	คือ อัตรายายของสายอากาศภาครับ
	$R$	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

จากวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบเพื่อหาอัตรายายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปเพียงตัวเดียว จึงสามารถจัดรูปแบบสมการ (5.1) ได้ดังนี้

$$G_{r,dB} = G_{t,dB} = \frac{1}{2} \left[ P_{r,dB} - P_{t,dB} + 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \right] \quad (5.2)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz จะได้อัตรายายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป เท่ากับ

$$G_{r,dB} = \frac{1}{2} \left[ (-53.085) - (-10) + 20 \log \left( \frac{4\pi(5)}{\lambda} \right) \right] = 4.89 \text{ dB}$$

สำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณาในส่วนของการสูญเสียที่เกิดจากสายส่ง (transmission line loss หรือ  $L_t$ ) มีค่าเท่ากับ 21.13 dB และการสูญเสียที่เกิดจากตัวแบ่งกำลัง (insertion loss of the power divider หรือ  $L_i$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 dB ดังนั้นจากสมการ (5.1) จึงจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$G_{r,dB} = P_{r,dB} - P_{t,dB} + 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) - G_{i,dB} - L_{t,dB} - L_{i,dB} \quad (5.3)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz ได้ดังนี้

สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1

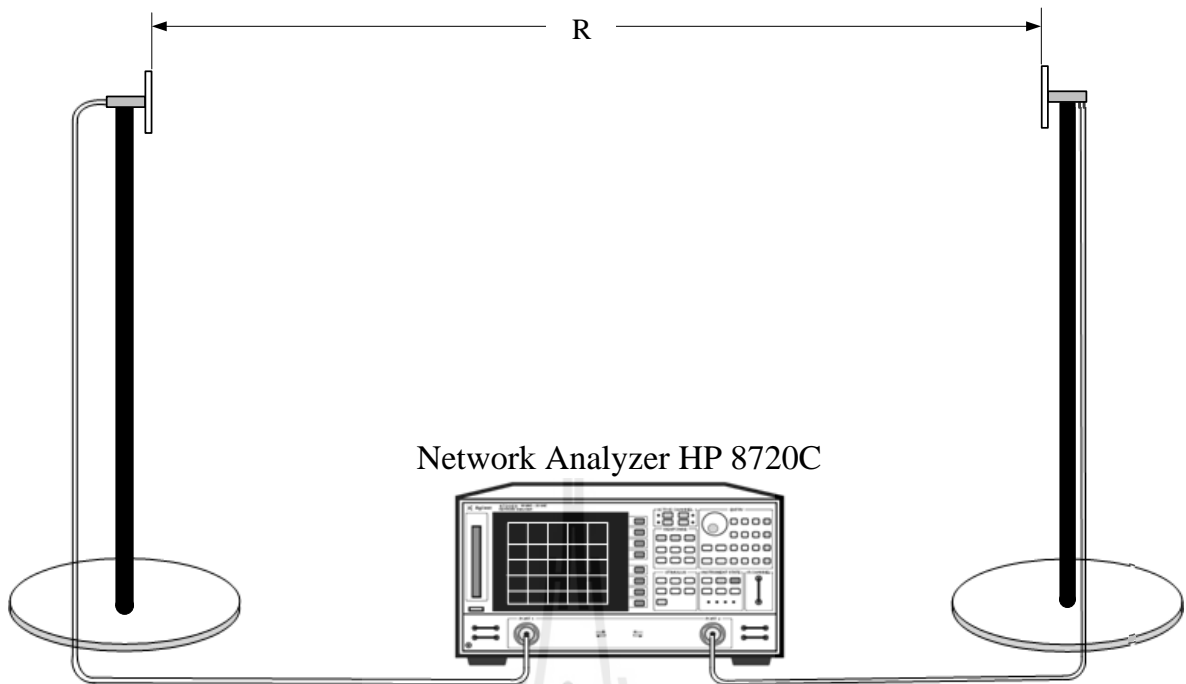
$$G_{r,dB} = (-18.945) - (-10) + 20\log\left(\frac{4\pi(5)}{\lambda}\right) - (4.89) - (21.13) - (1.2) = 16.7 \text{ dB}$$

สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 2

$$G_{r,dB} = (-19.045) - (-10) + 20\log\left(\frac{4\pi(5)}{\lambda}\right) - (4.89) - (21.13) - (1.2) = 16.6 \text{ dB}$$

สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 3

$$G_{r,dB} = (-19.145) - (-10) + 20\log\left(\frac{4\pi(5)}{\lambda}\right) - (4.89) - (21.13) - (1.2) = 16.5 \text{ dB}$$



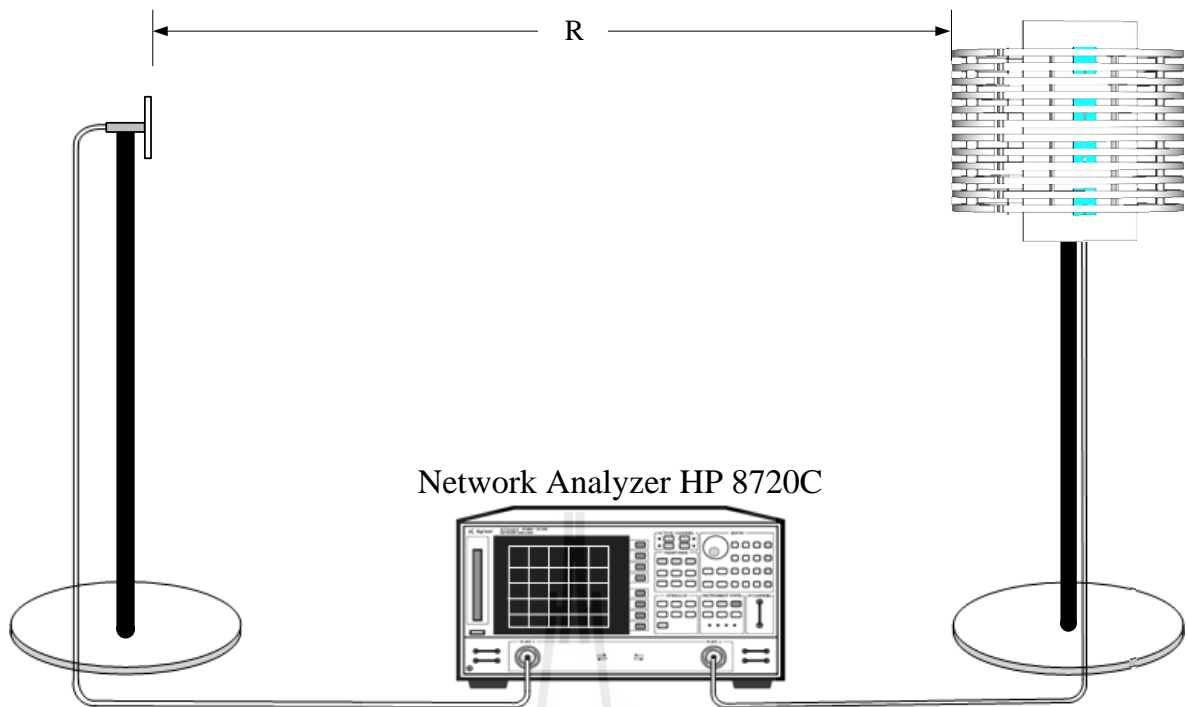
(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป

รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป





(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเสาลำดับต้นแบบ



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเสาลำดับต้นแบบ

รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเสาลำดับต้นแบบ

### 5.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกัน

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

พารามิเตอร์	สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1		สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 2		สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 3	
	ผลจาก CST	ผลจากวัดทดสอบ	ผลจาก CST	ผลจากวัดทดสอบ	ผลจาก CST	ผลจากวัดทดสอบ
$S_{11}$ (dB)	-25.26	-23.892	-23.86	-23.892	-23.71	-23.892
BW (%)	18.89	19.3	19.07	19.3	18.81	19.3
อัตราขยาย (dB)	17.2	16.7	17.1	16.6	17.1	16.5
HPBW (AZ:EL)	$62.6^{\circ}:8.6^{\circ}$ (7.3:1)	$63.2^{\circ}:8.9^{\circ}$ (7.1:1)	$62.8^{\circ}:8.6^{\circ}$ (7.3:1)	$63.4^{\circ}$	$62.8^{\circ}:8.6^{\circ}$ (7.3:1)	$63.5^{\circ}$



### 5.7 เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

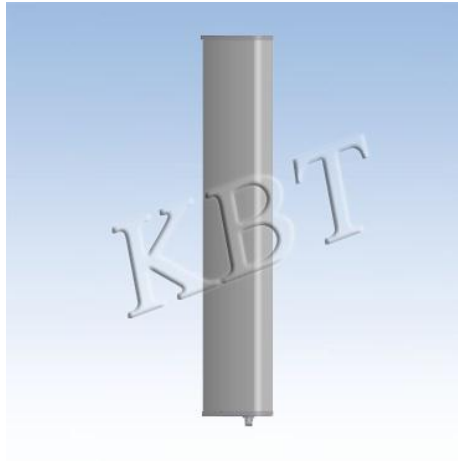
ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมากับสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G ที่มีขายทั่วไปแสดงดังรูปที่ 5.13 และจากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแถวลำดับต้นแบบมีขนาดความสูงที่สั้นกว่ามาก แต่สามารถให้อัตราขยายที่และ HPBW ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G ได้

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

พารามิเตอร์	สายอากาศแถวลำดับต้นแบบชุดที่ 1	สายอากาศชนิดที่ 1 *	สายอากาศชนิดที่ 2 **
ช่วงความถี่ใช้งาน (GHz)	1.92 – 2.17	1.92 – 2.17	1.92 – 2.17
อัตราขยาย (dB)	16.7	21	14
HPBW (AZ:EL)	63.2°:8.9° (7.1:1)	31°:16° (1.9:1)	65°:17° (3.8:1)
ขนาด (มิลลิเมตร) ความสูง×ความกว้าง×ความลึก	500×370×147	1320×280×80	650×180×90
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	8	12.5	6

\* Kenbotong Technology Co., LTD (KBT)

\*\* BoBoTo Telecom (H.K.) Co., LTD



(ก) สายอากาศชนิดที่ 1 (Kenbotong Technology Co., LTD)



(ข) สายอากาศชนิดที่ 2 (BoBoTo Telecom (H.K.) Co., LTD)

### รูปที่ 5.13 สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

#### 5.8 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศ แถวลำดับต้นแบบ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และจากการวัดทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่ากำลังการสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกลทั้งในระนาบมุมกวาด อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่าผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกัน

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

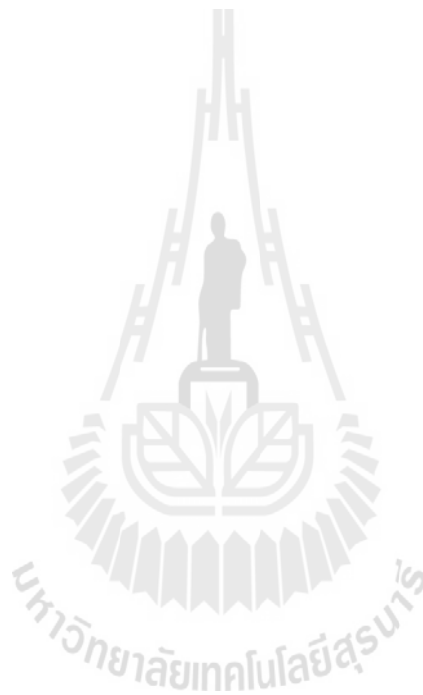
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบคุณลักษณะของสายอากาศ แถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้าง EBG ซึ่งได้นำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป แพทช์วงกลม มาออกแบบให้ทำงานในระบบโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz (1.92 – 2.17 GHz) เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับ สถานีฐาน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX โดยได้นำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมาจัดแถวลำดับแบบ 1×4 เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ แล้วเพิ่มแผ่นตัวสะท้อนด้านหลังเพื่อควบคุมแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับให้เป็นแบบมีทิศทาง จากนั้นได้นำเทคโนโลยีใหม่มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับ คือ โครงสร้าง EBG เพื่อปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของการขจัดคลื่นผิว ลดระดับโพลบด้านข้าง และหลัง และเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ทำหน้าที่เป็นวงจรรีโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1 GHz เมื่อวางไว้ด้านหน้าของสายอากาศแถวลำดับ โดยโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของการจัดแถวลำดับแบบ 1×4 ของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป คือ โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบโค้ง พบว่าสายอากาศแถวลำดับมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB หรือหนึ่งเท่าตัว และมีระดับโพลบด้านข้างที่ลดลง และต่อจากนั้นได้นำสายอากาศแถวลำดับที่เพิ่มแผ่นตัวสะท้อนด้านหลังและโครงสร้าง EBG มาจัดเป็นโพรงแบบสามเหลี่ยม โดยใช้สายอากาศแถวลำดับทั้งหมด 3 ชุด โดยแต่ละด้านของโพรงแบบสามเหลี่ยมจะมีสายอากาศแถวลำดับ 1 ชุด ครอบคลุมพื้นที่ใช้งาน 120°

#### 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปจะพบว่าในงานวิจัยนี้ โครงสร้าง EBG ที่ถูกคำนวณและออกแบบให้มีรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะรัศมีความโค้งของโครงสร้าง EBG ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง EBG จะทำหน้าที่เป็นเหมือนเรโซเนเตอร์ที่นำมาวางอยู่ด้านหน้าสายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้นเมื่อมีความโค้งที่เหมาะสมกับความถี่ปฏิบัติการเท่านั้น สำหรับการจัดวางตัวของโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบระนาบ แบบทรงกระบอก และแบบโค้ง ส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของค่า HPBW และระดับโพลบด้านข้าง จากคุณสมบัตินี้เอง เราจึงสามารถนำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกึ่งวงกลมที่จัดรูปแบบที่แตกต่างกัน

ไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ ที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งสามารถปรับปรุงและพัฒนาต่อไปได้อีก  
ขึ้นอยู่กับความสนใจและการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ  
รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ เป็นแนวทางที่ดี  
ให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของการประยุกต์สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป  
ร่วมกับโครงสร้าง EBG สำหรับสถานีฐานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์



## เอกสารอ้างอิง

- นันทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. (2552). **วัสดุเหนือธรรมชาติ**. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 หน้า 133-149
- นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. (2553). **อภิวัดดู (Metamaterials)**. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 หน้า 52-60
- รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สรรคร์. (2555). **วิศวกรรมสายอากาศ**. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ์ อัครเอกตาณิน. (2554). **อภิวัดดูสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (Metamaterials for Antenna Applications)**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 หน้า 472-482
- A. Axelrod, M. Kisliuk, and J. Maoz, "Broadband Microstrip-Fed Slot Radiator," **Microwave Journal**, Vol. 32, 1989, pp. 81-94.
- A.R. Weily, L. Horvath, K.P. Esselle, B. Sanders, and T. Bird, "A planar resonator antenna based on woodpile EBG material," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 53, No. 1, 2005, pp. 216-223.
- D. M. Pozar, "Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline," **Electronics Letters**, Vol. 21, No. 2, 1985, pp. 49-50.
- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with electromagnetic bandgap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 51, No. 10, 2003, pp. 2936-2946.
- F. Yang and Y. Rahmat-Samii, **Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering**. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- F. Yang, X. Zhang, X. Ye, and Y. Rahmat-Samii, "Wide band E-shaped patch antennas for wireless communications," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 49, No. 7, 2001, pp. 1094-1100.
- G. Kumar and K. C. Gupta, "Directly coupled multiple resonator wide-band microstrip antenna," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 33, No. 6, 1985, pp. 588-593.

- I-Fong Chen, Chia-Mei Peng, Sheng-Chieh Liang, "Single Layer Printed Monopole Antenna for Dual ISM-Band Operation," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol 53, No.2, 2005, pp. 1270-1273.
- Illuz, Z., R. Shavit and R. Bauer, "Micro-strip Antenna Phased Array with Electromagnetic Band-Gap Substrate," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 52, No. 6, 2004, pp. 1446–1453.
- J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, **Photonic Crystals: Molding the Flow of Light**. Princeton University Press, New Jersey, 1995.
- J.J. Bahl and P. Bhartia, **Mircostrip Antennas**. Artech House, 1980.
- N. Llombart, A. Neto, G. Gerini, and P. de Maagt, "Planar circularly symmetric EBG structures for reducing surface waves in printed antennas," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 53, No. 10, 2005, pp. 3210–3218.
- P. Bhartia, InderBahl, R. Garg, and A. Ittipipoon, **Mircostrip Antennas Design Handbook**. Artech House, 2000.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Beamwidth Improvement of MSA Array for Base Station Using Covered with Curved Woodpile EBG," **Thailand-Japan MicroWave 2012 (TJMW 2012)**, Bangkok, Thailand, August 2012.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement of MSA Array for Base Station using Covered EBG," **The 2012 Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP 2012)**, Singapore, August 2012, pp. 193-194.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement of MSAs Array by Using Curved Woodpile EBG and U-shaped Reflector," **The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2014)**, Pattaya City, Thailand, March 2014.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "High-Gain Antenna for Base Station Using MSA and Triangular EBG Cavity," **The 2012 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2012)**, Kuala Lumpur, Malaysia, March 2012, pp. 534-537.
- R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipipoon, **Mircostrip Antennas Design Handbook**, Artech House Publishers, 2001.
- R. Gonzalo, P. de Maagt, and M. Sorolla, "Enhanced path-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 47, No. 11, 1999, pp. 2131–2138.



- R. Wongsan, P. Krachodnok, and P. Kamphikul, "A Sector Antenna for Mobile Base Station using MSA Array with Curved Woodpile EBG," **Open Journal of Antennas and Propagation (OJAPr)**, Vol.2, No.1, 2014, pp. 1-8.
- T. Huynh and K. F. Lee, "Single-layer single-patch wide band microstrip antenna," **Electronics Letters**, Vol. 31, No. 16, 1995, pp. 1310-1312.
- T. K. Lo, C.-O. Ho, Y. Hwang, E. K. W. Lam, and B. Lee, "Miniature aperture coupled microstrip antenna of very high permittivity," **Electronics Letters**, Vol. 33, No. 1, 1997, pp. 9-10.
- Y. Chawanonphithak and C. Phongcharoenpanich, "An Ultra-wideband Circular Microstrip Antenna fed by Microstrip Line above Wide-Slot Ground Plane," **The 2007 Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2007)**, Bangkok, Thailand, October 2007.
- Y. Lee, X. Lu, Y. Hao, S. Yang, J.R.G. Evans, and C.G. Parini, "Low profile directive millimeter-wave antennas using free formed three-dimensional (3D) electromagnetic band gap structures," **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 57, No. 10, 2009, pp. 2893–2903.
- Y. Lee, X. Lu, Y. Hao, S. Yang, J.R.G. Evans, and C.G. Parini, "Narrow-beam azimuthally omnidirectional millimetre-wave antenna using free formed cylindrical woodpile cavity," **IET Microwaves, Antennas and Propagation**, Vol. 4, No. 10, 2010, pp. 1491–1499.
- Y. Yoshimura, "A Microstrip Line Slot Antenna," **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Vol. 20, No. 11, 1972, pp. 760-762.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

### รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "High Gain Mobile Base Station Antenna Using Curved Woodpile EBG Technique," **World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)**, Vol.8, No.7, 2014, pp. 910-916.
- R. Wongsan, P. Krachodnok, and P. Kamphikul, "A Sector Antenna for Mobile Base Station using MSA Array with Curved Woodpile EBG," **Open Journal of Antennas and Propagation (OJAPr)**, Vol.2, No.1, 2014, pp. 1-8.

### รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement of MSAs Array by Using Curved Woodpile EBG and U-shaped Reflector," **The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)**, March, 2014, pp. 1-4.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Beamwidth Improvement of MSA Array for Base Station Using Covered with Curved Woodpile EBG," **The 2012 Thailand-Japan MicroWave (TJMW)**, August, 2012.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "Gain Improvement of MSA Array for Base Station using Covered EBG," **The 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)**, 2012, pp. 193-194.
- P. Kamphikul, P. Krachodnok, and R. Wongsan, "High-gain Antenna for Base Station Using MSA and Triangular EBG Cavity," **The 2012 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS)**, 2012, pp. 534-537.

## ประวัติผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อำเภอกะเลง จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปีพ.ศ. 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2537 ต่อมาปีพ.ศ. 2541 ได้รับการรับรองด้านวิศวกรรมอวกาศ (Certification in Space Engineer) โดย International Space University, France (SSP'98 at Cleveland State University, Ohio, USA) ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอกวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2546 สำหรับประวัติการทำงานในอดีต ปีพ.ศ. 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2532 ถึง 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ ปีพ.ศ. 2535 ถึง 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีพ.ศ. 2546 ถึง 2548 ได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ปีพ.ศ. 2553 ถึง 2553 เป็นรองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นนายกสโมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นคณะกรรมการจัดทำมาตรฐานด้านเทคนิคในกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ 5/2555