รหัสโครงการ SUT7-709-56-12-35



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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-56-12-35



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

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

> **ผู้ร่วมวิจัย** นางสาวเภาภัทรา คำพิกุล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถคำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556 สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเภาภัทรา คำพิกุล ผู้ร่วมวิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง ด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์

บทคัดย่อ

ระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ (cellular phone system) ใด้มีการปรับปรุงและพัฒนาให้เหมาะสม ้กับการใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถให้บริการมัลติมีเคียในลักษณะที่สามารถโต้ตอบได้ ้มีความกว้างแถบที่กว้างเพียงพอให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วที่สูง และสามารถใช้งาน ใด้ทั่วโลก ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์กำลังมุ่งเน้นพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่ยุค 3.9G และสูงกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบสายอากาศแบบรอบตัวสำหรับรองรับเทคโนโลยีดังกล่าว สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐาน (base station) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยใช้เทคโนโลยีใหม่ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ แถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot array antenna) ให้สูงขึ้น ด้วยการนำโพรงช่องว่าง แถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) มาทำการวิจัยและออกแบบให้ใช้งาน ร่วมกับสายอากาศดังกล่าว โดยระบบสายอากาศจะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ้ดังนี้ (1) สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ที่มีการปรับปรุงความกว้างแถบให้เหมาะสมกับ การใช้งานในระบบ 3.9G (2) โครงสร้าง EBG ที่ได้ทำการวิจัยและออกแบบ และ (3) ระบบป้อน กำลังงาน (feed system) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology) ในการ ้ออกแบบและจำลองผล จากนั้นทำการสร้างสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ เพื่อนำไปวัดทดสอบ คุณลักษณะเปรียบเทียบความแม่นตรงกับผลการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป 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

กิ
ข
ค
খ
น
¥
1
2
2
2
2
3
4
4
8
12
13
14
16
17
17
23
26

สารบัญ (ต่อ)

3.3	สรุป	27
บทที่ 4 การวิเศ	าราะห์และออกแบบสายอากาศ	
4.1	ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศ	
	แบบร่องไมโครสตริปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	28
	4.1.1 สายอากาศแบบร่องใมโครสตริปแพทช์วงกลม	28
	4.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป	
	แพทช์วงกลม	29
4.2	ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศ	
	แถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง	
	ร่วมกับโครงสร้าง EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	35
4.3	สรุป	39
บทที่ 5 ผลการ	วัดทดสอบ	
5.1	วิชิการสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ	40
5.2	ผลการวัดทดสอบกำลังการสะท้อน อัตราส่วนกลื่นนิ่ง	
	และความกว้างแถบ	44
5.3	ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์	47
5.4	ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน	48
5.5	ผลการวัดทดสอบอัตรางยาย	51
5.6	เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง	55
5.7	เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G	56
5.8	สรุป	57
บทที่ 6 บทสรุร	ปและข้อเสนอแนะ	
6.1	บทสรุป	58
6.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	58
เอกสารอ้างอิง .		60
ภาคผนวก ก บา	ทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	63
ประวัติผู้วิจัย		65

สารบัญตาราง

ตารางที่	3.1	ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไม โครสตริป	
		เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ	13
ตารางที่	3.2	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวค์	
		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	
		ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง	42
ตารางที่	5.3	การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลอง	
		ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST	55
ตารางที่	5.4	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G	56

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1	สายอากาศแถวถำคับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไคโพล	5
รูปที่ 2.2	สายอากาศแบบปลอก	6
รูปที่ 2.3	สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยม	6
รูปที่ 2.4	สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป (Chawanonphithak and	
	Phongcharoenpanich, 2007)	8
รูปที่ 2.5	สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันได	
	(Yang and Rahmat-Samii, 2001)	9
รูปที่ 2.6	สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็น โครงสร้าง EBG	
	(Yang and Rahmat-Samii, 2001)	10
รูปที่ 2.7	สายอากาศไมโครสตริปวางบนโครงสร้าง EBG	
	(Qu Shafai และ Foroozesh, 2006)	11
รูปที่ 2.8	สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับที่ถูกแทรกด้วยโครงสร้าง 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	หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบราบที่มีสิ่ชั้น	
	(Weily et al., 2005)	23
รูปที่ 3.8	โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010)	24
รูปที่ 3.9	โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบโค้ง	25
รูปที่ 4.1	สายอากาศแถวถำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับ	
	แบบร่องไมโครสตริป	30
รูปที่ 4.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับ	
	แบบร่องไมโกรสตริป	31
รูปที่ 4.4	สายอากาศแถวลำคับแบบร่อง ใม โครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนค้านหลัง	32
รูปที่ 4.5	ผลของค่ากำลังการสะท้อนต่อความถี่เมื่อระยะห่างระหว่าง	
	แผ่นสะท้อนด้านหลังและสายอากาศแถวลำดับมีก่าแตกต่างกัน	33
รูปที่ 4.6	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป	
	เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง	33
รูปที่ 4.7	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป	
	เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง	34
รูปที่ 4.8	ระบบสายอากาศ	36
รูปที่ 4.9	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับชุคที่ 1 ถึง 3	37
รูปที่ 4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับชุคที่ 1 ถึง 3	38
รูปที่ 5.1	สายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม	
	และตัวสะท้อนด้านหลัง	41
รูปที่ 5.2	โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบโค้ง	42
รูปที่ 5.3	ตัวแบ่งกำลังงาน	42
รูปที่ 5.4	ระบบสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ	43
รูปที่ 5.5	ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ	
	จากการวัคทคสอบ	45
รูปที่ 5.6	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ	
	จากการวัคทคสอบ	45
รูปที่ 5.7	กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังการสะท้อนระหว่างผลจากการวัดทดสอบ	
-	และจากการจำลอง	46
รูปที่ 5.8	ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแถวถำดับต้นแบบ	
	จากการวัดทดสอบ	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.9	วิธีการวัดทคสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน	49
รูปที่ 5.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ	50
รูปที่ 5.11	วิธีการวัดทดสอบอัตรางยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป	53
รูปที่ 5.12	วิธีการวัดทดสอบอัตรางยายของสายอากาศแถวถำดับต้นแบบ	54
รูปที่ 5.13	สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G	57

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การสื่อสารไร้สายนับได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถ ้เชื่อมต่อเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใคก็ได้ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความ สะควกมากขึ้นในการเชื่อมต่อเครือข่าย ปัจจบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile phone system) หรือ ระบบโทรศัพท์เซลลลาร์ (cellular phone system) ได้ถกพัฒนาขึ้นมาให้เหมาะสมกับการใช้งานใน ระบบสื่อสารวิทยโทรศัพท์เคลื่อนที่ และยังสามารถครอบคลมพื้นที่ให้บริการได้กว้างมากขึ้น ขยาย ้งอบเขตการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้ต่อเนื่องอย่างไม่มีขีดจำกัด กล่าวคือ ในเขตพื้นที่ที่มีประชากร หนาแน่น เช่น เขตในเมือง มีความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากก็สามารถออกแบบให้มี ้จำนวนเซลล์มากขึ้นเพื่อรองรับอัตราการใช้บริการให้มากขึ้น ส่วนในเขตพื้นที่ที่มีประชากรเบาบาง เช่น ในเขตต่างจังหวัด มีความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นจำนวนน้อยก็ออกแบบให้เซลล์มี ้งนาดใหญ่ขึ้นเพื่อความเหมาะสม แต่ละเซลล์ที่ติดกันจะใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกัน เพื่อป้องกันการ รบกวนซึ่งกันและกัน ส่วนเซลล์ที่อยู่ห่างออกไปจะนำความถี่เดิมมาใช้ เรียกว่า การนำความถี่กลับมา ใช้อีก (frequency reuse) โดยไม่เกิดการสอดแทรกและสูญหายของสัญญาณ และเมื่อต้องการใช้ ้โทรศัพท์เคลื่อนที่เพิ่มขึ้นก็แบ่งจำนวนเซลล์ออกเป็นเซลล์ย่อยให้มากขึ้นได้ตามต้องการ ทำให้การ ้ทำงานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์สามารถนำความถี่มาใช้งานอย่างคุ้มค่า จากข้อคีของระบบ ์ โทรศัพท์เซลลูลาร์ดังกล่าว ส่งผลให้มีการพัฒนาเทกโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ ้อย่างกว้างขวาง ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายยุค สำหรับประเทศไทยกำลังมุ่งเน้นพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่ยุค 3.9G ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบสายอากาศสำหรับรองรับเทคโนโลยีในยุค 3.9G ซึ่ง สามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้กว้างมีอัตราขยายสูง มีกำลังการควบคุม (power handling) ของ ้สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐาน (base station) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยระบบสายอากาศประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ หลัก ดังนี้ (1) สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) เป็นสายอากาศแบบแพทษ์ (patch) ที่มี ้ข้อดีหลายประการ อาทิเช่น รากาถูก มีโครงสร้างที่ง่าย น้ำหนักเบา ออกแบบ สร้างและติดตั้งเพื่อใช้ งานได้ง่าย (2) โพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap หรือ EBG) สามารถ พัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของการขจัคคลื่นผิวและการเพิ่ม ้อัตราขยายของสายอากาศ และ (3) ระบบป้อนกำลังงาน (feed system) ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงาน ให้แก่สายอากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์และโครงสร้าง
EBG สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์

1.2.2 ออกแบบและจำลองผลระบบสายอากาศสำหรับระบบ โทรศัพท์เซลลูลาร์
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST (Computer Simulation Technology)

 1.2.3 สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลของการวัคทคสอบ และ ผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์กุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ และโครงสร้าง EBG

1.3.2 ออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ และโครงสร้าง EBG

1.3.3 สร้างระบบสายอากาศตั้นแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและ ผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

1.4 สมมุติฐานของการวิจัย

1.4.1 โครงสร้าง EBG จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปแบบ แพทช์โดยการขจัดคลื่นผิว การลดระดับพูกลื่นด้านข้างและด้านหลังของการแผ่พลังงาน และการเพิ่ม อัตราขยายของสายอากาศ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

1.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

- ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ ใมโครสตริปแบบแพทช์และโครงสร้าง EBG

- ศึกษาการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST ทำการออกแบบสายอากาศ ใมโครสตริปแบบแพทช์และ โครงสร้าง EBG จำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และวิเคราะห์ สมรรถนะของสายอากาศ เพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์

- สร้างระบบสายอากาศต้นแบบ วัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST รวมทั้งสรุปผลงานวิจัย

2

- จัดทำบทกวามสำหรับนำเสนอผลการวิจัยและส่งตีพิมพ์
- จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5.2 สถานที่ทำการทคลอง / เก็บข้อมูล

อาการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทกโนโลยี 4 (F4) มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป และเป็นบริการความรู้แก่สถาบันการศึกษาและ หน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ หน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่คำเนินธุรกิจ เกี่ยวกับการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและโทรคมนาคม

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม

วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบและสร้างระบบสายอากาศสำหรับรองรับ เทคโนโลยีการสื่อสารระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ในยุค 3.9G ซึ่งพัฒนามาจากสายอากาศไมโครสตริป และโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษา ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการ ดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้ง ไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกัน อย่างกว้างขวาง ได้แก่ ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE และนอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้น งานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการ สืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง ประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบการสื่อสาร ใร้สาย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะโครงสร้างชนิดต่าง ๆ การออกแบบ และการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมกับแต่ละโครงสร้าง

2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2.1.1 สายอากาศสำหรับการสื่อสารไร้สาย

สายอากาศไดโพล (dipole antenna) สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และ สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) สายอากาศทั้งสี่แบบนี้เป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สาย (Fujimoto and James, 1994; Katsibas, 1996; Katsibas et al., 1998) สายอากาศแบบแรก คือ สายอากาศไดโพล เป็น สายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ รูปที่ 2.1 แสดงสายอากาศแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไดโพล ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ ใดโพลจำนวนสิบสองอิลิเมนต์ โดยแต่ละข้างของแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมจะมีสายอากาศ ใดโพลจำนวนสิบสองอิลิเมนต์ โดยแต่ละข้างของแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมจะมีสายอากาศ ใดโพลจำนวนสิ่อิลิเมนต์ รวมเป็นสามเซ็กเตอร์ โดยแต่ละเซ็กเตอร์จะที่กรอบคลุมมุมเซ็กเตอร์ 120° ของพื้นที่ผู้ใช้งาน สายอากาศแถวลำดับไดโพลนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานในสถานีฐานของระบบ โทรศัพท์เซลลูลาร์ ในขณะที่สายอากาศโมโนโพล (Chen, Peng, and Liang, 2005) จะนิยมนำมาใช้ งานสำหรับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่า เคลื่อนที่ได้สะดวกกว่า เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular telephone) โทรศัพท์ไร้สาย (cordless telephones) และยานพาหนะ (automobiles) ทั้งนี้เนื่องจาก สายอากาศโมโนโพลมีน้ำหนักเบา คุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (broadband characteristics) และมี โครงสร้างไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง สายอากาศไคโพลและโมโนโพล ถ้ามีการ ออกแบบที่ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานแล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงมาก ใน ขณะเดียวกันสายอากาศทั้งสองชนิดนี้ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน คือ มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง เปราะบาง แตกหักได้ง่าย ราคาสูง และอาจเกิดความเสียหายจากการใช้งานของผู้ใช้ เนื่องจากโครงสร้างไม่มีที่ กำบังสายอากาศ



รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบสามเหลี่ยมของสายอากาศไดโพล

สายอากาศชนิดที่สาม คือ สายอากาศแบบปลอก (Taguchi, Egashira, and Tanaka, 1991) มีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตรของตัวนำ ที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกลัดวงจรกับลวดถักที่อยู่รอบ ๆ สายโคแอคเซียลแสดงดังรูปที่ 2.2 สายอากาศแบบปลอกนี้มีคุณลักษณะเหมือนสายอากาศโมโนโพลแบบที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์ แต่ การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสีย คือ เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็น โลหะทำให้อัตราขยายลดลง และแบบสุดท้าย คือ สายอากาศไมโครสตริป (Richards, 1988; James and Hall, 1989) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือแพทช์ (patch) ที่เป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่าง เป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระนาบกราวนด์ (ground plane) ที่ มีความบาง (เป็นเศษส่วนของความยาวคลื่น) และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าวัสดุฐานรอง ใดอิเล็กตริก (dielectric substrate) แสดงดังรูปที่ 2.3 ไมโครสตริปได้รับความนิยมอย่างมากในการ ใช้งานทางด้านสายอากาศ เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ด้านลมและสามารถติดกับผิวของ ยานพาหนะได้ และยังมีข้อดีในแง่ของราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะควกในการสร้างและการ ติดตั้ง แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อจำกัดเช่นกัน เมื่อเปรียบเที่ยบกับสายอากาศ ไมโครเวฟชนิดอื่น ๆ ในเรื่องของความกว้างแถบ (bandwidth) ที่แคบ ซึ่งสามารถแก้ไขข้อจำกัดนี้ได้ โดยการเซาะร่องบนระนาบกราวด์เพื่อเพิ่มความกว้างแถบของสายอากาศ เรียกเทคนิคนี้ว่า สายอากาศ แบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot antenna) โดยทำการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริปเหนือร่อง บนระนาบกราวด์ (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007) แสดงดังรูปที่ 2.4 ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำสายอากาศสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมาประยุกต์และปรับปรุง เพื่อให้ได้ สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานสำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์



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)

ในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นไปตามทิศทางของ ระนาบกราวด์ โดยจะมีการแผ่พลังงานไปยังอากาศว่าง ซึ่งคลื่นผิวนี้จะลดประสิทธิภาพและ อัตราขยายของสายอากาศ การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวจะเพิ่มการแผ่พลังงานของพูคลื่นด้ำนหลัง (back lobe) ให้มากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ที่ไม่ดี ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ EBG ร่วมกับโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อลดหรือขจัดคลื่นผิว นอกจากนี้ EBG ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศได้ในส่วนของอัตราขยาย และลดระดับ การแผ่พลังงานของพูคลื่นด้านข้างและด้านหลัง และการเชื่อมต่อร่วม (mutual coupling) สำหรับ สายอากาศแถวลำดับ (Yang and Rahmat-Samii, 2009)

Yang and Rahmat-Samii (2001) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบวัสดุฐานรองที่ เป็นแบบขั้นบันได (step-like substrate) และวัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG ที่ถูกนำมา ประยุกต์ใช้กับสายอากาศแบบแพทช์แสดงดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ เพื่อเพิ่มค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองให้สูงขึ้น (high dielectric constant substrate) โดยไม่มีผลกระทบต่อ ลักษณะโครงสร้างภายนอก ขนาด และความกว้างแถบของสายอากาศ จากการเปรียบเทียบพบว่าวัสดุ ฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันไดสามารถช่วยลดคลื่นผิวได้ โดยควบกุมระยะห่างระหว่างแพทช์และ ขั้นบันไดให้มีความเหมาะสม ถ้ามีระยะแคบเกินไปจะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ เปลี่ยนไปและความกว้างแถบก็จะลดลงด้วย แต่ถ้ามีระยะกว้างเกินไปก็จะไม่สามารถลดคลื่นผิวได้ ในขณะที่วัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG จะถูกออกแบบให้โพรงช่องว่างของคลื่นผิวครอบคลุม ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ ทำให้กลื่นผิวที่ถูกกระตุ้นโดยแพทช์จะถูกขจัดออกจากการ แพร่กระจายพลังงานโดยโครงสร้าง EBG Yang and Rahmat-Samii (2001) ได้สรุปว่าวัสดุฐานรองที่ เป็นโครงสร้าง EBG สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศแบบ แพทซ์ได้ดีกว่า โดยไม่มีผลต่อขนาดและความกว้างแถบของสายอากาศ



(ค) สายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบแพทช์บนวัสคุฐานรองที่เป็นแบบขั้นบันได

(Yang and Rahmat-Samii, 2001)



ร**ูปที่ 2.6** สายอากาศแบบแพทช์บนวัสดุฐานรองที่เป็นโครงสร้าง EBG (Yang and Rahmat-Samii, 2001)

Fan และคณะ (2003) และ Qu Shafai และ Foroozesh (2006) ได้นำเสนอ การเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริปด้วยการนำมาวางบนโครงสร้าง EBG ที่มี อิมพีแดนซ์สูงแทนที่ระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 2.7 เพื่อปรับปรุงสนามระยะใกล้ของสายอากาศ ส่งผลให้ความกว้างแถบ อัตราขยาย และ โพลาไรเซซันไขว้ดีขึ้น ด้วยการปรับตำแหน่งการป้อนกำลัง งาน ความกว้างแพทซ์ ขนาดของระนาบกราวด์ และระยะห่างของ EBG ที่เหมาะสม นอกจากนี้ได้มี การนำโครงสร้าง EBG มาประยุกต์ใช้ร่วมกับสายอากาศไมโครสตริปแถวลำคับ โดยวางแทรก ระหว่างสายอากาศทั้งสองอิลิเมนต์ (Yang and Rahmat-Samii, 2003) แสดงดังรูปที่ 2.8 เพื่อลดการ เชื่อมต่อร่วมในระนาบสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากสำหรับการออกแบบสายอากาศ แถวลำดับ

10



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



ร**ูปที่ 2.8** สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับที่ถูกแทรกด้วยโครงสร้าง EBG (Yang and Rahmat-Samii, 2003)

EBG สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อเพิ่มอัตรางยาย ของสายอากาศได้มากถึง 20 dBi ในอดีตเป็นที่เข้าใจกันว่าสายอากาศอัตรางยายสูงจะต้องเป็น สายอากาศพาราโบลิกหรือสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามพบว่าพื้นผิวความโด้งของ สายอากาศพาราโบลิกนั้นมีความยากในเรื่องของมุมและมาตราส่วนสำหรับแพลตฟอร์ม โทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile platform) ในขณะเดียวกันสายอากาศแถวลำดับขนาดใหญ่ก็จะเกิดการ สูญเสียพลังงานจากวงจรข่ายการป้อนกำลังงาน (feeding networks) ดังนั้นจึงได้มีการใช้โครงสร้าง EBG เพื่อแก้ปัญหานี้ อาทิเช่น การใช้โพรง EBG แบบ 3 มิติในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อน อัตราขยายสูง (A. R. Weily et al., 2005) โดยนำโพรง EBG ที่มีลักษณะเป็นแบบกองฟืน (woodpile EBG) มาล้อมรอบสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.9 และจากการวัดทดสอบพบว่าสายอากาศมีอัตราขยาย มากถึง 19 dBi



รูปที่ 2.9 โพรง EBG ในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนอัตรางยายสูง

จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้นำโพรง EBG แบบ 3 มิติมาประยุกต์ใช้ งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ สายอากาศให้ดียิ่งขึ้น สำหรับรองรับเทคโนโลยีโทรศัพท์เซลลูลาร์ และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX

2.2 สรุป

สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมีลักษณะคล้ายแผ่นพิมพ์ที่ใช้ในงาน อิเล็กทรอนิกส์ชนิคที่มีแผ่นทองแคงประกบอยู่ทั้งสองด้านและมีใดอิเล็กตริกที่เป็นวัสคุฐานรองทำ จากวัสดุชนิคต่าง ๆ กั่นกลางอยู่ การศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปนี้มีการ พัฒนาการเซาะร่องบนระนาบกราวค์เพื่อเพิ่มความกว้างแถบให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ งานจริงร่วมกับโครงสร้าง EBG สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบ สายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริปและโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการ ประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองหัวข้อ คือ หัวข้อแรกกล่าวถึงลักษณะโครงสร้าง พื้นฐาน การป้อนกำลังงาน และการจัดแถวลำคับของสายอากาศไมโครสตริป และหัวข้อที่สอง กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของโพรงช่องว่างแถบแม่เหล็กไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ สายอากาศ และสรุป

3.1 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการ ใช้งานในระบบสื่อสารสมัยใหม่ สายอากาศไมโครสตริปนับว่ามีข้อดีหรือข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศ ไมโครเวฟ ทำให้สายอากาศไมโครสตริปถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งครอบคลุมช่วง ความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 100 GHz แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปก็มีข้อจำกัดเช่นกันเมื่อ เปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟดังตารางที่ 3.1 แสดงข้อได้เปรียบที่เป็นจุดเด่นของสายอากาศ ไมโครสตริปและข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไมโครเวฟ มีดังต่อไปนี้

	803 811218 211		
	ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป		ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
	น้ำหนักเบา ปริมาตรน้อย มีโครงสร้างรูปร่างที่		มีความกว้างแถบที่แคบ
	บาง ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงมุมและมาตรา	•	มีอัตราขยายที่ก่อนข้างต่ำ (≈6dB)
	ส่วนได้อย่างชัดเจน	•	มีความต้านทานการสูญเสียมากและมีความ
•	ราคาถูก		ซับซ้อนของโครงสร้างการป้อนกำลังงาน
•	ง่ายต่อการป้อนกำลังงานสำหรับโพลาไรซ์ที่		สำหรับสายอากาศแถวลำคับ
	เป็นแบบเส้นตรงและวงกลม	•	เกิดการแผ่กระจายคลื่นภายนอกจากจุดป้อน
•	ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสำหรับ		กำลังงานและจุดเชื่อมต่อ
	สายอากาศที่เป็นแบบความถี่คู่และ โพลาไรซ์คู่	•	เกิดการกระตุ้นของคลื่นบนผิวหน้า

ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศ ใมโครเวฟ

ตารางที่ 3.1	เ ข้อใด้เปรียบและข้อจำกัดของส	ายอากาศไมโครสตริปเ	มื่อเปรียบเทียบกับส	ทายอากาศ
	ไมโครเวฟ (ต่อ)			

	ข้อได้เปรียบของสายอากาศไมโครสตริป	ข้อจำกัดของสายอากาศไมโครสตริป
	สามารถอินทิเกรตร่วมกับวงจรไมโกรเวฟ	
•	การทำเส้นป้อนกำลังงานและการแมทช์	
	สายอากาศสามารถออกแบบและสร้ำงในเวลา	
	เดียวกันกับโครงสร้างของสายอากาศ	

โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปได้สามส่วน ได้แก่ (1) ส่วนบนจะเป็นแผ่นหรือแพทซ์ (patch) เป็นตัวนำที่ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น (2) ส่วนที่เป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (dielectric sheet) หรือซับสเตรต (substrate) ซึ่งคั่นกลาง ระหว่างระนาบกราวด์และแผ่นตัวนำ และ (3) ระนาบกราวด์ (Balanis, 2005) แสดงดังรูปที่ 2.3 (ในบทที่ 2) ซึ่งสายอากาศดังกล่าวมีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board หรือ PCB) โดยที่แพทซ์จะถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำ หน้าที่เป็นแผ่นกราวด์ สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ วัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในการออกแบบสายอากาศ ไมโครสตริปมีพารามิเตอร์ที่งำเป็นที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ความถี่ปฏิบัติงานของสายอากาศ (operating frequency : f_c) ค่าคงที่ไดเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง (dielectric constant : ε_r) และความสูง ของวัสดุฐานรอง (high : h)

3.1.1 สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป

โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปถูกพัฒนามาจากสายอากาศ แบบร่อง (slot antenna) ที่ถูกกระคุ้นหรือป้อนกำลังเข้าที่เส้นสตริป (strip line) (Garg et al., 2001) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะเหมือนกับสายอากาศไมโครสตริป แต่แตกต่างจากสายอากาศไมโครสตริปตรงที่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะมีการเซาะร่องบน ระนาบกราวด์ แสดงดังรูปที่ 2.4 (ในบทที่ 2) นอกจากนี้รูปร่างของร่องสามารถออกแบบให้เป็นแบบ ใดก็ได้ แต่ที่นิยม คือ ออกแบบให้มีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างแพทซ์ไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับข้อดีของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป คือ เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ สองทิศทาง (bidirectional radiation) ที่ให้ความกว้างแถบกว้างมาก (ultra wide band) และนอกจากนี้ ยังสามารถออกแบบสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเดียว (directional radiation) ได้ด้วยการเพิ่มแผ่นสะท้อน (reflector plate) ที่ด้านใดด้านหนึ่งของร่อง โดยที่ สายอากาศยังมีคุณสมบัติเป็นสายอากาศแถบกว้างอยู่



ร**ูปที่ 3.1** รูปร่างของแพทช์ใมโครสตริป

ในการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปจะใช้วิธีการ เช่นเดียวกันกับสายอากาศไมโครสตริป คือ การป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป (microstrip-line feed) หรือการป้อนกำลังด้วยท่อนำคลื่นบนระนาบเดียวกัน (coplanar waveguide) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีการป้อนกำลังด้วยเส้นไมโครสตริป เนื่องจากง่ายต่อการเชื่อมต่อและสะดวกในการ ออกแบบและสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปสายส่งสัญญาณแบบเส้นไมโครสตริปนี้จะประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้า แบบแพทช์วางอยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างเป็นระนาบกราวด์ที่มี สายอากาศแบบร่องอยู่บนระนาบกราวด์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งออกจากเส้นไมโครสตริปผ่านวัสดุ ฐานรองที่อยู่ระหว่างกลางไปสู่ระนาบกราวด์ ค่าความต้านทานคุณสมบัติ (characteristic impedance) จะขึ้นอยู่กับความกว้างของเส้นไมโครสตริปและความหนาของวัสดุฐานรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การป้อนกำลังให้แก่ร่อง สตริปตัวนำต้องเป็นวงจรลัด (short-circuited) ยาวไปตลอดบนวัสดุฐานรอง ที่เป็นใดอิเล็กตริกจนถึงขอบของร่องแสดงดังรูปที่ 3.2(ก) หรืออีกวิธีการหนึ่ง คือ ที่ปลายของสตริป ตัวนำต้องเป็นวงจรเปิดแบบสตับ (open-circuited stub) ที่มีความยาวมากกว่าขอบของร่องด้วยความ ยาวเท่ากับ L_m แสดงดังรูปที่ 3.2(ข) (Yoshimura, 1972) โดยความยาว L_m นี้มีค่าประมาณหนึ่งในสื่ ของความยาวกลิ่น ($\lambda/4$) ข้อดีของการป้อนกำลังด้วยวิธีนี้ คือ ทำให้เกิดการโพลาไรซ์ไขว้ (crosspolarization) ที่ต่ำ (ประมาณ -35 dB) (Axelrod, Kisliuk, and Maoz, 1989)



(ก) วงจรลัคที่ปลายไมโครสตริป

(ข) วงจรเปิดที่ปลายไมโครสตริป

รูปที่ 3.2 การป้อนกำลังให้แก่สายอากาศแบบร่องใมโครสตริป (Yoshimura, 1972)

3.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป

สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป (microstrip slot antenna array) ประกอบขึ้นจากการนำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปหลาย ๆ อิลิเมนต์มาประกอบหรือเรียงลำดับ กันให้มีรูปร่างเชิงเรขาคณิต เพื่อเพิ่มขนาดขององค์ประกอบที่ใช้ในการแผ่คลื่นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (วงศ์สรรค์, 2555) สนามรวมที่เกิดจากแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปจะเกิดจากการทับซ้อนเชิง เวกเตอร์ของสนามที่แผ่ออกมาจากร่องแต่ละอิลิเมนต์ การที่จะได้แบบรูปการแผ่คลื่นในทิศทางที่ กำหนดให้มีก่าสูงกว่าในทิศทางอื่นนั้น ต้องทำให้สนามที่เกิดจากแต่ละอิลิเมนต์มีเฟสที่เสริมกันใน ทิศทางที่ต้องการ และในขณะเดียวกันสนามที่เกิดจากแต่ละอิลิเมนต์ก็ต้องหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ ด้องการด้วย เราสามารถควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแผ่กำลังงานรวมของสายอากาศได้ โดยการ ควบคุม ดังต่อไปนี้

- รูปร่างของแถวลำคับจะต้องมีลักษณะที่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต 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 วัตถุที่ขัดขวางหรือสนับสนุนการแพร่กระจายของกลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแถบความลี่ที่ เฉพาะเจาะจงสำหรับทุก ๆ มุมตกกระทบ และทุก ๆ สถานะของการโพลาไรซ์ โดยปกติแล้ว EBG จะประกอบด้วยวัตถุที่เป็น ใดอิเล็กตริกและตัวนำที่เป็นโลหะ สามารถแบ่งประเภทของ EBG ตามลักษณะโกรงสร้าง EBG ได้ 3 ประเภทได้แก่ (1) EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ เช่น เส้นไมโครสตริปกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (Radisic et al., 1998) และเส้นส่งผ่านพลังงานที่ ประกอบด้วยว่อมูลมีกับช่องกลมบนระนาบกราวด์ (Radisic et al., 1998) และเส้นส่งผ่านพลังงานที่ ประกอบด้วยส่วนทางขวามือและทางซ้ายมือ (Caloz and Itoh, 2005) แสดงดังรูปที่ 3.3(ก) และ (ข) ตามลำดับ (2) EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ จะมีลักษณะเป็นผิวหน้ากล้ายดอกเห็ด (mushroomlike) (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 มีโครงสร้างเป็นลักษณะ แบบกองฟืน (woodpile) ซึ่งประกอบด้วยแถบสี่เหลี่ยมของไดอิเล็กตริก (Ozbay et al., 1994) และมี โครงสร้างเป็นแถวลำดับแบบม้านั่งที่มี 3 ขา (tripod array) ซึ่งจะเป็นโลหะหลาย ๆ ชั้นซ้อนกันอยู่ (Barlevy and Rahmat-Samii, 2001) แสดงดังรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) ตามลำดับ



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



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

ร**ูปที่ 3.3** EBG เส้นส่งผ่านพลังงานแบบ 1 มิติ



ร**ูปที่ 3.4** EBG ระนาบบนผิวหน้าแบบ 2 มิติ



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



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

ร**ูปที่ 3.5** EBG โครงสร้างปริมาตรแบบ 3 มิติ

สำหรับพารามิเตอร์ของ EBG เพื่อง่ายแก่การทำความเข้าใจในวิธีดำเนินการ ของ EBG ผู้วิจัยจะนำเสนอโครงสร้างอย่างง่าย คือ โครงสร้าง EBG ที่มีผิวหน้าคล้ายดอกเห็ดแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โครงสร้าง EBG แบบ 2 มิตินี้ ประกอบด้วยสี่ส่วนดังนี้ (1) แผ่นกราวด์ โลหะ (metal ground plane) (2) วัสดุฐานรองใดอิเล็กตริก (dielectric substrate) (3) แผ่นโลหะวาง เป็นคาบบนใดอิเล็กตริกหรือแพทช์ และ (4) ตัวเชื่อมแนวตั้งระหว่างแผ่นโลหะด้านบนกับแผ่น กราวด์โลหะหรือเวีย (vias) ซึ่งดูมีรูปทรงเรขาคณิตกล้ายดอกเห็ด



(ก) พารามิเตอร์ของ EBG (ข) วงจร *LC* ภายในโครงสร้าง

รูปที่ 3.6 พารามิเตอร์และรูปแบบของก่าเหนี่ยวนำและก่ากวามจุของโกรงสร้าง EBG

จากรูปที่ 3.6(ก) แสดงโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้าง

EBG ประกอบด้วย ก่าต่าง ๆ ดังนี้

W	คือ ความก	เว้างของแ	ผ่นตัวเ	นำด้านบน

- g กือ ช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน
- *h* คือ ความสูงของฐานรองไดอิเล็กตริก
- *ɛ_r* คือ ค่าคงที่สภาพยอมของไดอิเล็กตริก
- r คือ รัศมีของเวีย
- (W+g) คือ ระยะคาบเล็กที่เปรียบเทียบการดำเนินการความยาวคลื่น

สามารถอธิบายรูปแบบสื่อกลางของโครงสร้าง EBG ได้ด้วยวงจรสมมูล ของวงจรที่ประกอบไปด้วยค่าเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) ดังรูปที่ 3.6(ข) โดยค่าความจุที่เกิดขึ้น เป็นผลจากช่องว่างระหว่างแผ่นตัวนำด้านบน และค่าเหนี่ยวนำเกิดจากกระแสที่ไหลไปตามตัวนำที่ อยู่ใกล้กัน ซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการ (3.1)

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

ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรคำนวณใด้จากสมการ (3.2)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{3.2}$$

ที่ความถี่ต่ำค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นการเหนี่ยวนำและรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของสนามแม่เหล็กตาม ขวาง (TM surface wave) โดยจะเปลี่ยนเป็นค่าความจุที่ความถี่สูงรองรับคลื่นระดับพื้นผิวของ สนามไฟฟ้าตามขวาง (TE surface wave) และเมื่อเข้าใกล้ความถี่เรโซแนนซ์ (ω_0) EBG จะไม่รองรับ คลื่นระดับพื้นผิวใด ๆ เนื่องจากอยู่ในภาวะที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ๆ และการที่อิมพีแดนซ์ระดับ พื้นผิวสูงมากส่งผลให้แน่ใจว่าคลื่นระดับพื้นผิวจะสะท้อนกลับโดยไม่กลับเฟสที่เกิดขึ้นบน PEC โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุสามารถพิสูจน์โดยใช้การส่งคงรูป (conformal mapping) ซึ่งเป็นเทคนิคการ คำนวณการกระจายสนามไฟฟ้าสถิต 2 มิติ หาค่าได้จากสมการ (3.3)

$$C = \frac{W\varepsilon_0(1+\varepsilon_r)}{\pi}\cosh^{-1}(\frac{W+g}{g})$$
(3.5)

ก่าความเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากวงจรกระแสดังแสดงในรูปที่ 3.6(ข) ประกอบด้วยเวียและแผ่น โลหะ สำหรับกระแสโซลินอยด์ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กสามารถกำนวณด้วยกฎของแอมแปร์ จากวงจร สมมูลตัวเหนี่ยวนำกำนวณจากพลังสนามแม่เหล็กสะสมและกระตุ้นด้วยกระแส จะได้ก่ากวาม เหนี่ยวนำจากสมการ (3.4)

$$L = \mu h \tag{3.4}$$

จากโครงสร้าง EBG สำหรับการประยุกต์ใช้งาน EBG ร่วมกับสายอากาส เพื่อออกแบบให้สายอากาสมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพ จึงเป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่ เป็นความต้องการสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายที่ทันสมัย ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลบนโครงสร้างของระนาบกราวค์ที่เป็นดัวนำไฟฟ้าสมบรูณ์ (Perfect Electric Conductor หรือ PEC) และ EBG พบว่าในกรณีที่ 1 เมื่อกระแสไฟฟ้ามีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งฉากกับ ระนาบกราวด์ PEC กระแสจินตภาพ (*J*) ก็จะมีทิศพุ่งขึ้นในแนวตั้งฉากกับระนาบกราวด์ PEC เช่นเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาสมีการแผ่พลังงานที่มีประสิทธิภาพดี แต่สายอากาสจะมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สายอากาสมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน จึงได้กำหนดตำแหน่งของสายอากาสให้อยู่ใน แนวนอนหรือขนานไปกับระนาบกราวด์ PEC พบว่าสายอากาสมีการแผ่พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมิทิศทางตรงข้ามกัน ดังเช่นกรณีที่ 2 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะกระแสที่ไหลผ่านระนาบกราวด์ PEC จะมีการกลับเฟส ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วย การนำ EBG มาใช้ทดแทนระนาบกราวด์ PEC เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน EBG จะไม่มีการกลับเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าและกระแสจินตภาพมีทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานที่มี ประสิทธิภาพดี และนอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ดังกรณีที่ 3

ทิศทางการใหลของกระแส	ประสิทธิภาพ	โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน
J A PEC	\checkmark	×
J→ PEC ◀-	×	\checkmark
	\checkmark	\checkmark

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่ใหลบนโครงสร้างของระนาบกราวค์ที่เป็น PEC และ EBG

3.2.2 โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืน โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบ

ราบ (planar woodpile EBG structures) (Weily et al., 2005; Lee et al., 2009) จะมีโครงสร้างทาง กายภาพที่มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (layer-by-layer) ประกอบด้วยแท่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลมหรือ สี่เหลี่ยมจัตุรัสก์ได้ มาจัดวางเรียงตัวกัน รูปที่ 3.7 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกอง พื้นแบบราบที่มีสี่ชั้น ซึ่งถูกกำหนดด้วยค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าคงที่แลคทิช (lattice constant) หรือ ความยาวซ้ำในระนาบแนวนอน (repeat distance in the horizontal plane: *a*) ความกว้างของแท่ง (rod width: *w*) และความสูงรวมของหนึ่งหน่วยเซลล์ (total height of the unit cell: *b*) โดยความต่อเนื่อง ของชั้น คือ การตั้งฉากของแต่ละชั้นและแท่งที่วางขนานจะถูกชดเชยด้วยการวางในชั้นที่สี่ ที่จะต้อง วางตรงตำแหน่งกึ่งกลางของแลคทิช



ร**ูปที่ 3.7** หนึ่งหน่วยเซลล์ของโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบราบที่มีสี่ชั้น (Weily et al., 2005)

นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอก (cylindrical woodpile EBG structures) (Lee et al., 2010) สำหรับการเรโซแนนซ์ในโหมดแม่เหล็ก ตามขวาง (TM mode resonances) ในโพรงทรงกระบอก (cylindrical cavity) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ไม่ ต้องการช่องว่างแถบ (band gap) ทั้ง 3 มิติ คือ ด้านกว้าง ยาว และลึก แต่ต้องการช่องว่างแถบใน ทิศทางเดียวกับรัศมีของทรงกระบอกเท่านั้น ดังนั้น โพรงทรงกระบอกจึงถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า ในแนวตั้งเท่านั้น จากรูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างเรขาคณิตของโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบ ทรงกระบอกที่มีสองวงแหวน (filament rings) ซึ่งมีขนาดต่างกัน และสิบหกแท่งวางตามแนวรัศมี (radial filaments) สำหรับโครงสร้างของโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอกประกอบด้วย ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง (filament thickness หรือ diameter: w) ความสูงหรือความ ยาว (height หรือ length: h) จำนวนแท่งวางตามแนวรัศมี (number of radial filaments: N_{rad}) จำนวน วงแหวนของทรงกระบอก (number of rings of the cylinder: N_{ring}) และรัศมีของแต่ละวงแหวน (radii of each ring: R_1, R_2, \ldots, R_n , เมื่อ $n = N_{ring}$)



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



(ข) โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบทรงกระบอกสูงหกชั้น

รูปที่ 3.8 โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะ กองฟืนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ซึ่งได้นำแนวคิดจาก โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบราบ และแบบทรงกระบอก มาแก้ไขคัดแปลงให้เป็นแบบโค้ง (curved woodpile EBG structures) แสดงคังรูปที่ 3.9 ที่มี N_{ring} = 2 และ N_{rad} = 3 โดยกำหนดพารามิเตอร์ตาม โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอก



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



- (ข) โพรงเป็นลักษณะกองฟื้นแบบโค้งสูงหกชั้น
 - รูปที่ 3.9 โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง
3.2.3 โครงสร้าง EBG และอภิวัสดุ

อภิวัสดุ (metamaterials) คือ วัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ที่ถูกออกแบบและ สร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตาม ธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านั้นปกติเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่ เหมือนกัน (inhomogeneous) (อังควิศิษฐพันธ์, 2553; ชัยมูล และ อัครเอกฒาลิน, 2554) คุณสมบัติ ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ว่าดังกล่าว คือ ค่าสภาพขอมทางไฟฟ้า (electric permittivity: ε) ค่าความซึมซาบ ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ) และก่าดัชนีการหักเหของแสง (refractive index: n) ดังนั้นอภิวัสดุสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝึงของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไปยังใน ตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนดซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้อย่างอิสระ ได้แก่ คุณสมบัติด่าง ๆ ของตัวกลาง ขนาด รูปร่างและส่วนประกอบที่จะใส่เข้าไปไม่ว่าจะเป็นความ หนาแน่นหรือการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถ เกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป เช่น ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กเป็นอบ และก่าดัชนีการหัก เหของแสงเป็นลบ ด้วยเหตุผลนี้วัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้จึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วัสดุเหนือ ธรรมชาติ (วงศ์เกษมและมาตรา, 2552)

โครงสร้าง EBG ซึ่งเป็นหนึ่งในอภิวัสดุ (Yang and Rahmat-Samii, 2009) ซึ่งมีกุณสมบัติทั้งผิวที่มีอิมพีแดนซ์สูง (high impedanc surface หรือ HIS) และมีค่าสภาพขอมทาง ไฟฟ้าที่เข้าใกล้ศูนย์ (epsilon near zero หรือ ENZ) โดยทั่วไปโครงสร้าง EBG จะประกอบด้วย โลหะ รูปต่าง ๆ ที่เป็นรายคาบวางบนระนาบกราวค์ที่แยกด้วยชั้นรองใดอิเล็กตริก และอาจจะเชื่อมต่อ (via) หรือไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวค์ก็ได้ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถใช้ EBG ในการออกแบบเพื่อลด งนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ นอกจากนี้ EBG ยังช่วยในการกำจัด คลื่นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศเพิ่มมากขึ้น

3.3 สรุป

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องของสายอากาศไมโครสตริป โดยเริ่มศึกษาจาก โครงสร้างของสายอากาศก่อน การปรับปรุงสายอากาศไมโครสตริปให้มีความกว้างแถบที่กว้างด้วย การเซาะร่องบนระนาบกราวค์ จนได้เป็นสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป รูปร่างของร่องที่เหมาะสม สำหรับการนำมาใช้งาน เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ต่อมาได้ศึกษาในส่วน ของการป้อนกำลังให้แก่สายอากาศ โดยได้เลือกวิธีการป้อนกำลังงานด้วยเส้นไมโครสตริปเนื่องจาก เป็นวิธีที่ง่าย ทั้งการออกแบบและการแมทช์สายอากาศ และในส่วนสุดท้ายได้ศึกษาการจัดแถวลำดับ เพื่อให้ได้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปที่มีอัตราขยายที่สูง สำหรับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิดิ ใด้เน้นที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่อง ใมโครสตริป ซึ่งได้นำแนวคิดจากโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบราบ และแบบทรงกระบอก มาแก้ไข ดัดแปลงให้เป็นแบบโก้งที่มีความเหมาะสมสำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบ

บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ

ในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป กับโครงสร้าง EBG ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศสำหรับ การประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX ที่ความถึ่ 2.1 GHz โดยระบบสายอากาศประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ดังนี้ (1) สายอากาศแถวลำดับ แบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม (2) โครงสร้าง EBG และ (3) ระบบป้อนกำลังงาน โดยใน ขั้นตอนแรกได้ทำการออกแบบและจำลองผลสายอากาศสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความกว้างแถบที่เหมาะสม จากนั้นได้เพิ่มโครงสร้าง EBG เพื่อปรับปรุง ประสิทธิภาพของสายอากาศให้ดีขึ้นในส่วนของการขจัดกลื่นผิวและการเพิ่มอัตราขยายของ สายอากาศ

สึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

4.1.1 สายอากาศแบบร่องใมโครสตริปแพทช์วงกลม

สายอากาศแบบร่อง ไมโครสตริปแพทช์วงกลม (Chawanonphithak and Phongcharoenpanich, 2007) ถูกออกแบบให้ทำงานในระบบโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (Universal Mobile Telecommunications System หรือ UMTS) ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz (1.92 GHz ถึง 2.17 GHz) เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศตุ้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศตุ้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศตุ้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศตุ้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศตุ้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับสถานีฐาน โดย สายอากาศถูกพิมพ์ลงบนแผ่น FR4 ($\varepsilon_r = 4.5, tan\delta = 0.02$) ที่มีขนาด 60 มิลลิเมตร × 60 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบร่อง ใมโครสตริปแพทช์วงกลม ได้แก่ รัศมีของแพทช์วงกลม (radius of circular patch: a) ระยะห่างของ ช่องว่างระหว่างแพทช์วงกลมและเส้นไมโครสตริป (distance of gap: t) ความยาวของเส้น ใมโครสตริป (microstrip line length: L_2) ความกว้างของระนาบกราวด์ (width of ground plane: W) ความยาวของระนาบกราวด์ (length of ground plane: L) และขนาดของช่องที่ระนาบกราวด์ (wideslot ground plane: Size $W_1 \times L_1$) แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยได้มีการออกแบบให้สายอากาศแมทช์ที่ 50 โอห์ม และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมีอัตราขยายเท่ากับ 5 dB ที่ความถิ่ 2.1 GHz

4.1.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม

ในการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ วิธีที่ง่ายและนิยม คือ การจัดแถว ลำดับ งานวิจัยนี้จึงได้นำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปมาจัดแถวลำดับแบบเชิงเส้น แบบ 1×4 โดย มีระยะห่างของแต่ละอิลิเมนต์เท่ากับ 3λ/4 แสดงดังรูปที่ 4.1 และจากผลการจำลองผลพบว่า สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลมมีค่ากำลังการสะท้อน (reflected power หรือ S₁₁) ที่ -17.24 dB มีอัตราขยายเท่ากับ 11.05 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz และมีความกว้างลำครึ่งกำลัง (half-power beamwidth หรือ HPBW) ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็น อัตราส่วนมุมกวาดต่อมุมเงย (ratio of azimuth pattern to evaluation pattern หรือ AZ:EL) เท่ากับ 17°:98° แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม



รูปที่ 4.2 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป



(ข) ระนาบมุมกวาด

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไม โครสตริป

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลังของระนาบกราวด์ของ สายอากาสแถวถำดับแบบร่องไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ 4.4 เพื่อปรับให้สายอากาสแถวถำดับมี แบบรูปการแผ่พลังงานที่เป็นแบบทิสทางเดียว เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานใน สถานีฐานระบบโทรสัพท์เซลลูลาร์ ซึ่งแผ่นสะท้อนด้านหลังมีขนาดความกว้างเท่ากับ 300 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับ 500 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนด้านหลังและสายอากาสแถว ลำดับเท่ากับ λ/4 โดยพบว่าระยะห่างนี้มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาสแถวลำดับ แสดงดัง รูปที่ 4.5 และจากผลการจำลองผลพบว่าสายอากาสแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปที่มีแผ่นสะท้อน ด้านหลังมี S₁₁ เท่ากับ -30.64 dB มีอัตราขยายเท่ากับ 14 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz และมี HPBW ใน ระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้แสดงเป็นอัตราส่วน AZ:EL เท่ากับ 16.5°:89.6° แสดง ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ







รูปที่ 4.4 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง



ร**ูปที่ 4.5** ผลของค่ากำลังการสะท้อนต่อความถี่เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนด้านหลัง และสายอากาศแถวลำดับมีค่าแตกต่างกัน



ร**ูปที่ 4.6** ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง



(ข) ระนาบมุมกวาด

ร**ูปที่ 4.7** แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป เพิ่มแผ่นสะท้อนด้านหลัง

ดังที่กล่าวในบทที่ 3 งานวิจัยนี้ได้นำโครงสร้างของ EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็น ลักษณะกองฟืนมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่น สะท้อนด้านหลัง ซึ่งได้นำแนวกิดจากโพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบราบ (Weily et al., 2005; Lee et al., 2009) และแบบทรงกระบอก (Lee et al., 2010) มาแก้ไขคัดแปลงให้เป็นแบบโค้ง (curved woodpile EBG structures) แสดงคังรูปที่ 3.9 (ในบทที่ 3) โดยเลือกใช้แท่งอะลูมิเนียม ($\epsilon_r = 8.4$ และ $tan\delta = 0.002$) ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากในการออกแบบ และได้กำหนดพารามิเตอร์ตามโพรง เป็นลักษณะกองฟืนแบบทรงกระบอก (Wongsan et al., 2014)

จากรูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองสาขอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปเพิ่มแผ่น สะท้อนด้านหลังร่วมกับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง โดยได้นำ สาขอากาศแถวลำดับมาวางจัดเป็นสามเหลี่ยมและนำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ มาวางไว้ด้านหน้า ของสาขอากาศแถวลำดับในลักษณะเป็นโพรงสามเหลี่ยม (triangular EBG cavity) ซึ่งแต่ละค้านจะ ประกอบด้วยโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ สาขอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปจำนวน 4 อิลิเมนต์ และแผ่นสะท้อนด้านหลัง การจัดวางสาขอากาศในลักษณะนี้จะทำให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้ งานได้ 360[°]รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงก่ากำลังการสะท้อนและแบบรูปการแผ่พลังงานของสาขอากาศ แถวลำดับชุดที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ สำหรับก่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสาขอากาศแถวลำดับแสดงเป็น ผลสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมไว้ที่ด้านหน้าของ สาขอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปทำให้สาขอากาศแถวลำดับมีอัตราขขายเพิ่มขึ้นถึง 3 dB หรือหนึ่งเท่าตัว โดยไม่ได้เพิ่มจำนวนของอิลิเมนต์ในการจัดแถวลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก โครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์กลิ่นที่ความถี่ 2.1 GHz ส่งผลให้ระบบสาขอากาศมี อัตราขขายเพิ่มขึ้น และมีระดับโหลบด้านข้าง (side lobe level หรือ SLL) ที่ลดลง



(ก) ด้านหน้า

.





ตารางที่ 4.1	ผลการจำลองจ	ากโปรแก	ารมสำเร็จรูป	CST
--------------	-------------	---------	--------------	-----

สายอาอาศ	อัตราขยาย	S ₁₁	DW (9/)	HPBW	SLL (dB)
ត សេច ៣ ខេត	(dB)	(dB)	DVV (70)	AZ:EL	(E-plane/H-plane)
สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง	11.05	15.04	41.1	98 [°] :17 [°]	10.7/
ไมโครสตริป 1×4 อิลิเมนต์	11.05	-17.24	41.1	(5.8:1)	-12.//-
สายอากาศแถวลำดับแบบร่อง					
ไมโครสตริปเพิ่มแผ่นสะท้อน	14	-30.64	19.7	89.6 :16.5	-12.8/-39.6
ด้านหลัง				(5.4:1)	
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1	17.0	25.26	10.0	62.6 [°] :8.6 [°]	15.0/ 20.0
	17.2	-25.26	18.9	(7.3:1)	-15.8/-29.0
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 2	17.1	22.96	10.1	62.8 [°] :8.6 [°]	15.7/ 00.2
	17.1	-23.80	19.1	(7.3:1)	-15.//-29.5
สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 3	17.1	22.71	19.0	62.8 [°] :8.6 [°]	15 (/ 20.0
	1/.1	-23./1	18.9	(7.3:1)	-13.0/-28.8



รูปที่ 4.9 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำคับชุคที่ 1 ถึง 3



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับชุดที่ 1 ถึง 3

4.3 สรุป

สำหรับบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับ แบบร่องไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ซึ่งในขั้นแรกได้ทำการศึกษาโครงสร้างของ สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อให้ได้ สาขอากาศแบบร่องไมโครสตริปต้นแบบที่มีความกว้างแถบครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.92 GHz ถึง 2.17 GHz สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในสถานีฐานระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ โดยทำการจัด แถวลำดับแบบ 1×4 เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศในเบื้องต้น มีระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์เท่ากับ 3λ/4 จากนั้นได้นำแผ่นตัวสะท้อนมาวางด้านหลังสายอากาศแถวลำดับ เพื่อควบคุมให้เป็นสายอากาศ แบบมีทิศทาง แล้วสร้างแบบจำลองขึ้นมาอีกสองชุด โดยวางทำมุมกัน 120[°]เพื่อให้ระบบสายอากาศ ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้ครบทั้ง 360[°] และในขั้นตอนสุดท้ายได้นำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่ โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง ซึ่งได้มีการกำนวณและออกแบบขนาดที่เหมาะสมมาวางด้านหน้า สายอากาศทั้งสามชุด เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สูงยิ่งขึ้น โดยได้ทำการจำลองผลด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป CST ก่อน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของระบบสายอากาศสำหรับการนำไปสร้าง สายอากาศต้นแบบต่อไป

บทที่ 5 ผลการวัดทดสอบ

จากทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตลอดจนการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่ สำคัญของสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริปกับโครงสร้าง EBG ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และ 4 ดังนั้นในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงการสร้างสายอากาศแถวลำคับต้นแบบขึ้น เพื่อทำการวัด ทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่า S_n อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio หรือ SWR) แบบ รูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ (impedance หรือ Z) และ อัตราขยาย โดยมีตัวแบ่งกำลังงาน (power divider) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจาก เครื่องส่งไปยังสายอากาศแถวลำคับต้นแบบซึ่งในการวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้นได้จากเครื่อง วิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8720C สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจาก การวัดทดสอบและจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

5.1 วิธีการสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 จนได้ ขนาดและรูปแบบของแถวลำดับของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปตามที่ต้องการแล้ว ซึ่งจะแบ่ง ระบบสายอากาศออกเป็นสามส่วน ได้แก่ (1) สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลม และตัวสะท้อนด้านหลัง โดยสายอากาศจะถูกจากสร้างวัสดุที่เป็น FR4 และแผ่นตัวสะท้อนด้านหลังถูก สร้างจากแผ่นเหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบรูณ์ (perfect electric conductor หรือ PEC) มี ก่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 และแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 (2) โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรง เป็นลักษณะกองฟื้นแบบโค้งดังรูปที่ 5.2 โดยโครงสร้าง EBG ถูกสร้างจากอะลูมิเนียมที่เป็นแท่ง สี่เหลี่ยมมีก่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.2 และ (3) ตัวแบ่งกำลังงานแบบเข้า 1 พอร์ต แล้วออก 12 พอร์ต ทำหน้าที่ในการป้อนกำลังงานให้แก่ระบบสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยตัวแบ่งกำลังงานนี้ ทำงานที่ช่วงความถี่ 0.8 GHz ถึง 2.2 GHz มีก่าการสูญเสียภายใน (insertion loss หรือ *L*,) เท่ากับ 1.2 dB และก่า SWR เท่ากับ 1.25 และรูปที่ 5.4 แสดงระบบสายอากาศแถวลำดับต้นแบบที่เมื่อนำองก์ประกอบ ทั้งสามส่วนของสายอากาศมารวมกันทั้งสามชุด

พารามิเตอร์	ขนาด	ขนาด	
	(λ)	(มิลลิเมตร)	
รัศมีของแพทช์วงกลม	0.024	1.00	
(circular patch of the radius หรือ <i>a</i>)	0.034	4.86	
ความกว้างของระนาบกราวด์	0.42	60	
(width of ground plane หรือ <i>W</i>)	0.42		
ความขาวของของระนาบกราวด์	0.42	60	
(length of ground plane หรือ L)	0.42		
ความกว้างของร่องระนาบกราวด์	0.207	41	
(width of wide-slot ground plane หรือ W_{l})	0.287	41	
ความยาวของร่องระนาบกราวด์	0.1.44		
(length of wide-slot ground plane ทรีอ L_1)	0.166	23.72	
ความยาวของเส้นไมโครสตริป	0.07	10	
(microstrip line length หรือ L_2)	0.07		
ความกว้างของแผ่นตัวสะท้อน	2.1	200	
(width of reflector หรือ W_r)	2.1	300	
ความยาวของของแผ่นตัวสะท้อน	2.5	500	
(length of reflector หรือ หรือ L_r)	3.3		

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบร่องไม โครสตริปแพทช์วงกลมและแผ่นตัวสะท้อน



รูปที่ 5.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริปแพทช์วงกลมและตัวสะท้อนด้านหลัง

พารามิเตอร์	ขนาด (<i>X</i>)	ขนาด (มิลลิเมตร)
	0.052	7.52
	0.035	7.55
รัศมีวงนอก (outer radius หรือ $R_{_I}$)	3.45	493.11
รัศมีวงใน (inner radius หรือ R_2)	3.34	477.14
ความสูง (height หรือ <i>h</i>)	2.61	372.5
จำนวนของชั้นต่อหนึ่งวงโค้ง (number of curved filaments/ring หรือ N_c)	12	2
จำนวนของแท่ง (number of radial filaments หรือ N _{rad})	3	
จำนวนวงโค้ง (number of rings of the curved หรือ N_{ring})	2	

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง





(ก) ด้านหน้า รูปที่ 5.2 โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบโค้ง



รูปที่ 5.3 ตัวแบ่งกำลังงาน





(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านข้าง



5.2 ผลการวัดทดสอบกำลังการสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความกว้างแถบ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมทช์อิมพีแคนซ์ค้านเข้าคือ ้ค่า S₁₁ และ SWR ในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ S₁₁ หมายถึง การสะท้อนกลับของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า ของสายอากาศซึ่งขนาดของ S₁₁ อาจจะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity dB) ถ้ามีค่า ้เท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมทช์อย่างสมบรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมทช์ที่สมบรณ์ ดีที่สุด และสำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า ้สายอากาศนั้นมีการแมทช์ที่สมบูรณ์ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่ พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์ หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมทช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายได้ (รังสรรค์ และ ชูวงค์, ม.ป.ป) ในการใช้งานด้าน วิศวกรรมสายอากาศก่าของ S₁₁ ที่ยอมรับได้ถ้ามีก่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดกล้องกับก่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า จึงจะยอมรับได้ว่าสายอากาศนั้นมีการแมทช์ที่ดี รูปที่ 5.5 แสดงกราฟก่า $\mathbf{S}_{_{11}}$ ของสายอากาศแถวถำดับต้นแบบทั้ง 3 ชุด เมื่อป้อนกำลังให้สายอากาศทำงานพร้อมกัน จากรูป ้จะสังเกตได้ว่าที่ความถิ่ปฏิบัติการ 2.1 GHz สายอากาศแถวลำดับต้นแบบมีค่า S₁₁ เท่ากับ -23.892 dB ซึ่งสอคคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 1.1131 แสดงคังรูปที่ 5.6 จึงสรุปได้ว่าสายอากาศแถวลำคับ ์ ต้นแบบมีการแมทซ์ที่ดี และรูปที่ 5.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่า S₁₁ ระหว่างผลจากการวัดทดสอบ และผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST ของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบจะเห็นได้ว่า กราฟทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

สำหรับความกว้างแถบหรือแบนด์วิดท์ (bandwidth หรือ BW) คือ ความกว้างของ แถบคลื่นความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ ซึ่งดูได้จากการแมทช์ของสายอากาศที่ 50 โอห์ม จากกราฟ S₁₁ รูปที่ 5.5 สามารถอ่านค่าความกว้างแถบของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบได้ คือ มีค่า S₁₁ ≤ -10 dB ตั้งแต่ 1.92 - 2.33 GHz หรือ 0.41 GHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์จะมีค่าเท่ากับ 19.3% ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz ได้



รูปที่ 5.5 ค่ากำลังการสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบจากการวัดทดสอบ



รูปที่ 5.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบจากการวัดทคสอบ



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังการสะท้อนระหว่างผลจากการวัดทดสอบและจากการจำลอง

5.3 ผลการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

จากการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวถำดับค้นแบบทั้ง 3 ชุด เมื่อ ป้อนกำลังให้สายอากาศทำงานพร้อมกัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 มีก่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ55.609 – *j*1.281 Ω ซึ่งใกล้เคียงกับก่าที่ยอมรับได้ คือ 50 Ω



รูปที่ 5.8 ค่าอิมพีแคนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบจากการวัดทดสอบ

5.4 ผลการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในพื้นที่โล่งภายนอกอาคาร (outdoor) สำหรับระยะ *R* ในการติดตั้งสายอากาศวัดทดสอบและสายอากาศอ้างอิงจะเท่ากับสนาม ระยะไกล คือ $R \ge 2D^2 / \lambda$ โดยที่ *D* คือ ขนาดของสายอากาศวัดทดสอบที่ยาวที่สุด คือ 0.59 เมตร ดังนั้น $R \ge 4.87$ เมตร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะ R = 5 โดยใช้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริป มีกวามถิ่ปฏิบัติการอยู่ที่ 2.1 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศแถวลำดับด้นแบบที่นำมาวัดทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศแถวลำดับด้นแบบที่นำมาวัดทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับดังรูปที่ 5.9 ซึ่ง จะมีการหมุนสายอากาศภาครับรอบแนวแกนหมุนเพื่อรับคลื่นจากสายอากาศภาคส่งตั้งแต่มุม 0° ถึง 360° ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบในระนาบมุมเงย โดยได้ ทำการวัดทดสอบเพียงชุดที่ 1 และระนาบมุมกวาดของสายอากาศทั้ง 3 ชุด ซึ่งเป็นระนาบที่นำมาใช้ งานจริง แสดงดังรูปที่ 5.10 จากผลการวัดทดสอบพบว่ามีความสอดกล้องกับผลที่ได้จากการจำลอง ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST



(ก) แบบจำลองการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

รูปที่ 5.9 วิธีการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน



(ก) ระนาบมุมเงย



(ข) ระนาบมุมกวาด

รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ

5.5 ผลการวัดทดสอบอัตรางยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบนั้นแบ่งออกเป็นสอง ขั้นตอน ได้แก่ (1) การวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป เพื่อหาอัตราขยายของ สายอากาศอ้างอิงสำหรับการวัด แสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวที่หนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ ภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ และ (2) การวัดอัตราขยายของสายอากาศ แถวลำดับต้นแบบ โดยกำหนดให้สายอากาศแบบร่องไมโครสตริปเป็นสายอากาศภาคส่ง และ สายอากาศแถวลำดับต้นแบบเป็นสายอากาศภาครับแสดงดังรูปที่ 5.12

สำหรับการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สมการการส่งผ่านของฟริส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศ โดยสมการ การส่งผ่านของฟริสที่นำมาใช้ คือ

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

โดยที่ *P*. คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง

P. คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ

- G_{ab} คือ อัตราขยายรวมของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเมื่อ สายอากาศตัวทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
- *G*, คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
- G, คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
- *R* คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

จากวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัวที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบเพื่อหา อัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริปเพียงตัวเคียว จึงสามารถจัดรูปแบบสมการ (5.1) ได้ ดังนี้

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

เมื่อแทนก่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz จะได้อัตราขยายของสายอากาศแบบร่อง ใมโครสตริป 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_t) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 dB ดังนั้นจากสมการ (5.1) จึงจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

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

ดังนั้นสามารถกำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแถวถำดับต้นแบบที่ความถี่ปฏิบัติการ 2.1 GHz ได้ดังนี้

สายอากาศแถวถำคับชุคที่ 1

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

สายอากาศแถวลำคับชุคที่ 2

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

สายอากาศแถวลำคับชุคที่ 3

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



(ก) แบบจำถองการวัดทดสอบอัตรางยายงองสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป รูปที่ 5.11 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป



(ก) แบบจำลองการวัคทคสอบอัตรางยายของสายอากาศแถวลำคับต้นแบบ



(ข) การติดตั้งจริงสำหรับการวัดทดสอบวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ รูปที่ 5.12 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้นแบบ 5.6 เปรียบเทียบผลจากการวัดทดสอบและการจำลอง

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองเพื่อ ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียง และสอดคล้องกัน

พาราริเตอร์	สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 1		สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 2		สายอากาศแถวลำดับชุดที่ 3	
M 1 9 1998610 9	ผลจาก CST	ผลจากวัด	ผลจาก CST	ผลจากวัด	ผลจาก CST	ผลจากวัด
		ทดสอบ		ทดสอบ		ทดสอบ
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	62.6 [°] :8.6 [°]	63.2 [°] :8.9 [°]	62.8 [°] :8.6 [°]	63.4 [°]	62.8 [°] :8.6 [°]	63.5 [°]
(AZ:EL)	(7.3:1)	(7.1:1)	(7.3:1)		(7.3:1)	

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST

5.7 เปรียบเทียบสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

ตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแถวถำคับต้นแบบที่ได้ สร้างขึ้นมากับสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3Gที่มีขายทั่วไปแสดงคังรูปที่ 5.13 และจากตาราง ที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแถวลำคับต้นแบบมีขนาดความสูงที่สั้นกว่ามาก แต่สามารถให้ อัตราขยายที่และ HPBW ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับสถานี ฐานระบบ 3G ได้

พารามิเตอร์	สายอากาศแถวลำดับ ต้นแบบชุดที่ 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	63.2 [°] :8.9 [°]	31°:16°	65 [°] :17 [°]	
(AZ:EL)	(7.1:1)	(1.9:1)	(3.8:1)	
ขนาด (มิลลิเมตร)	500×370×147	1320×280×80	650×180×90	
ความสูง×ความกว้าง×ความลึก	500^570^147	1320^280^80		
น้ำหนัก	0	10.5	6	
(กิโลกรัม)	0	12.3	0	

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

*Kenbotong Technology Co., LTD (KBT)

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



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



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

ร**ูปที่ 5.13** สายอากาศสำหรับสถานีฐานระบบ 3G

5.8 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการสร้าง และการวัดทดสอบคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศ แถวลำดับต้นแบบ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST และจากการวัดทดสอบว่ามีความสอดกล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ ได้ทำการวัดทดสอบได้แก่ ค่ากำลังการสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ แบบรูปการแผ่ พลังงานของสายอากาศในสนามระยะไกลทั้งในระนาบมุมกวาด อิมพีแดนซ์ และอัตราขยาย พบว่า ผลที่ได้มีความคล้ายกลึงกัน

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบคุณลักษณะของสายอากาศ แถวลำคับแบบร่องไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้าง EBG ซึ่งได้นำสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป แพทช์วงกลม มาออกแบบให้ทำงานในระบบโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล ที่ย่านความถี่ 2.1 GHz (1.92 – 2.17 GHz) เป็นสายอากาศต้นแบบสำหรับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับ สถานีฐาน ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE802.16e mobile WiMAX โดยได้นำสายอากาศแบบร่อง ใมโครสตริปมาจัดแถวลำดับแบบ 1×4 เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ แล้วเพิ่มแผ่นตัวสะท้อน ้ด้านหลังเพื่อควบคุมแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับให้เป็นแบบมีทิศทาง จากนั้นได้ ้นำเทคโนโลยีใหม่มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำคับ คือ โครงสร้าง EBG เพื่อปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศให้คียิ่งขึ้น ในส่วนของการขจัคกลื่นผิว ลดระคับโหลบค้านข้าง และหลัง และเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ ทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2.1 GHz เมื่อวาง ้ไว้ด้านหน้าของสายอากาศแถวถำดับ โดยโครงสร้าง EBG ที่เหมาะสมกับถักษณะโครงสร้างของการ ้จัดแถวลำดับแบบ 1×4 ของสายอากาศแบบร่องไมโครสตริป คือ โครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรง ้เป็นลักษณะกองฟื้นแบบโค้ง พบว่าสายอากาศแถวลำคับมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB หรือ หนึ่งเท่าตัว และมีระดับ โหลบด้านข้างที่ลดลง และต่อจากนั้นได้นำสายอากาศแถวลำดับที่เพิ่มแผ่น ้ตัวสะท้อนด้านหลังและ โครงสร้าง EBG มาจัดเป็น โพรงแบบสามเหลี่ยม โดยใช้สายอากาศแถวลำดับ ทั้งหมด 3 ชุด โดยแต่ละด้านของโพรงแบบสามเหลี่ยมจะมีสายอากาศแถวลำดับ 1 ชุด ครอบคลุม พื้นที่ใช้งาน 120

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปจะพบว่าในงานวิจัยนี้ โครงสร้าง EBG ที่ถูกคำนวณและออกแบบให้มี รูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับสายอากาศแถวลำคับแบบร่องไมโครสตริป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะรัศมีความโค้งของโครงสร้าง EBG ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้าง EBG จะทำหน้าที่เป็นเหมือนเรโซเนเตอร์ที่นำมาวางอยู่ด้านหน้า สายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้นเมื่อมีความโค้งที่เหมาะสมกับความถี่ปฏิบัติการ เท่านั้น สำหรับการจัดวางตัวของโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนแบบต่าง ๆ ใด้แก่ แบบระนาบ แบบทรงกระบอก และแบบโค้ง ส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยาย และแบบรูป การแผ่พลังงานที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของก่า HPBW และระดับโหลบด้านข้าง จากคุณสมบัตินี้เอง เราจึงสามารถนำโครงสร้าง EBG แบบ 3 มิติ ที่โพรงเป็นลักษณะกองฟืนที่จัดรูปแบบที่แตกต่างกัน ไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ ที่มีความเหมาะสมได้ ซึ่งสามารถปรับปรุงและพัฒนาต่อไปได้อีก ขึ้นอยู่กับความสนใจและการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าแนวความคิด วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงผลการวิเคราะห์และผลการทคลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ เป็นแนวทางที่ดี ให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษาและค้นคว้าในเรื่องของการประยุกต์สายอากาศแถวลำดับแบบร่องไมโครสตริป ร่วมกับโครงสร้าง EBG สำหรับสถานีฐานในระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์

เอกสารอ้างอิง

- นั้นทกานต์ วงศ์เกษม และ คณิศร์ มาตรา. (2552). **วัสดุเหนือธรรมชาติ**. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 หน้า 133-149
- นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์. (2553). อภิวัสดุ (Metamaterials). วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 หน้า 52-60
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รังสรรค์ วงศ์สรรค์. (2555). **วิศวกรรมสายอากาศ**. สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศราวุธ ชัยมูล และ ประยุทธ อัครเอกฒาลิน. (2554). อภิวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ (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 millimeterwave 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

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 คร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำประแสร์ อำเภอแกลง จังหวัคระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรม ศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปีพ.ศ. 2532 จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำเร็จ การศึกษาเมื่อปีพ.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) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารถาดกระบัง สำเร็จ การศึกษาเมื่อปีพ.ศ. 2546 สำหรับประวัติการทำงานในอดีต ปีพ.ศ. 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนก อิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีพ.ศ. 2532 ถึง 2533 เป็น อาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีประทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ ปีพ.ศ. 2535 ถึง 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ้ปีพ.ศ. 2546 ถึง 2548 ได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต ขอนแก่น ปีพ.ศ. 2553 ถึง 2553 เป็นรองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็น นายกสโมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็น รองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี และเป็นคณะอนุกรรมการจัดทำมาตรฐานด้านเทคนิคในกิจการกระจายเสียงและ ้กิจการโทรทัศน์ ตามคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการ โทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ที่ 5/2555