

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง

STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF WIDEBAND

ANTANNA FOR ULTRA WIDEBAND SYSTEMS



T104346



นายวลัญช์	จิตต์บรรเทิง	รหัสนักศึกษา	46015679
นายบัณฑิต	ตระกูลอัสว	รหัสนักศึกษา	48010472
นายชัชวาลย์	อ่องละออ	รหัสนักศึกษา	49015409
นายเอกรัตน์	บุญรอดน้อย	รหัสนักศึกษา	49015440

เลขหมู่.....104346  
 เลขทะเบียน.....  
 วัน,เดือน,ปี... ๕. ๒. ๒๕๕๒

b.....  
 i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF WIDEBAND  
ANTANNA FOR ULTRA WIDEBAND SYSTEMS**



Mr. Walanch	Jiddbantirng	ID 46015679
Mr. Bandit	Trakul-Assava	ID 48010472
Mr. Chutchavan	Angraor	ID 49015409
Mr. Akerut	Boonrodnoy	ID 49015440


**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

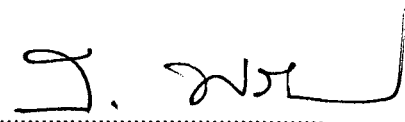
หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับระบบแถบกว้าง ยิ่ง		
ชื่อนักศึกษา	นายวัลลภ	จิตต์บรรเทิง	รหัสนักศึกษา 46015679
	นายบัณฑิต	ตระกูลอัสว	รหัสนักศึกษา 48010472
	นายชัชวาลย์	อ่องละออ	รหัสนักศึกษา 49015409
	นายเอกรัตน์	บุญรอดน้อย	รหัสนักศึกษา 49015440
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. พิชญ	สุพรรณกุล	
	อาจารย์สถาพร	พรหมวงค์	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2551		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ  
ให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต



( ผศ. พิชญ สุพรรณกุล )

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์



( อาจารย์สถาพร พรหมวงค์ )

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อปริญญานิพนธ์** การศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับระบบแถบกว้าง  
ยิ่ง

<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายวัลลภ	จิตต์บรรเทง	รหัสนักศึกษา	46015679
	นายบัณฑิต	ตระกูลอัสว	รหัสนักศึกษา	48010472
	นายชัชวาลย์	อ่องละออ	รหัสนักศึกษา	49015409
	นายเอกรัตน์	บุญรอดน้อย	รหัสนักศึกษา	49015440

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ. พิชญ์ สุพรรณกุล

อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

**ภาควิชา** วิศวกรรมสารสนเทศ

**ปีการศึกษา** 2551

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอ การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบตอบสนองย่านความถี่กว้างยิ่ง โดยคุณสมบัติของสายอากาศ อันได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นการโพลาไรซ์อิมพีแดนซ์ด้านเข้า สามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่ที่ออกแบบ จากนั้นจะสร้างสายอากาศต้นแบบที่สามารถส่งและรับในย่านความถี่ดังกล่าว ซึ่งสามารถใช้งานได้ในระบบการสื่อสารครอบคลุมหลายระบบ เช่น ระบบโทรศัพท์พกพาส่วนบุคคล โทรศัพท์ไร้สายและเคลื่อนที่ระบบระบุตำแหน่ง และ ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายและทำการทดสอบเพื่อยืนยันการใช้งานได้ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Study on Design and Fabrication of Wideband Antenna for Ultra – Wideband and Systems

**Student** Mr. Walanch Jiddbantirng ID 46015679  
 Mr. Bandit Trakul-Assava ID 48010472  
 Mr. Chutchavan Angraor ID 49015409  
 Mr. Akerut Boonrodnoy ID 49015440

**Advisor** Asst. Prof. Pichaya Supanakoon  
 Mr. Sathaporn Promwong

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2008

**ABSTRACT**

This pre-project proposes the design and fabrication of the ultra-wide band(UWB) antenna. The antenna properties such as the radiation pattern, polarization and input impedance are investigated over the operating bandwidth. Subsequently, the antenna prototype is fabricated to transmit and receive the signal in the operating band to cover the various applications such as the Personal Communication Telephone (PCT), the cordless and mobile Telephone, Global Positioning System (GPS) and Wireless Local Area Network (WLAN). The experimental results confirm the actual applications of the antenna.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้

จากท่านอาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และหัวหน้ากลุ่มงานวิจัยที่ให้คำแนะนำ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคอยฝึกฝนอบรมสั่งสอนให้มีผู้วิจัยมีความสามารถในการทำวิจัยได้ดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและแนะนำเกี่ยวกับการใช้งานด้านโปรแกรมต่างๆและที่คอยตรวจทานบทความงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาห้องปฏิบัติการงานวิจัย UWB ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ทุกคนที่ช่วยเหลือในการทดลองและคำแนะนำต่าง ๆ มาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจคอยดูแลห่วงใยเอาใจใส่ จนสามารถทำให้ผู้วิจัยต่อสู้กับอุปสรรคที่มากมายจนมาถึงวันนี้ได้

ขอขอบคุณสำหรับกำลังใจพิเศษ ที่ทำให้ผู้วิจัยต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆจนมาถึงจุดนี้ได้ และได้รับมาเสมอจนถึงทุกวันนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ให้ชีวิตให้โอกาสและคอยดูแลให้กำลังใจให้คำปรึกษาอบรมสั่งสอนในทุกๆเรื่อง ในการดำเนินชีวิตมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยมาถึงวันนี้ได้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอบพระคุณแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายวัลลภชัย จิตต์บรรเทิง

นายบัณฑิต ตระกูลอัสว

นายชัชวาลย์ อ่องละออ

นายเอกรัตน์ บุญรอดน้อย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ .....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 แนวความคิดและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตและลักษณะของโครงการ .....	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	2
1.7 โครงประกอบของปริยญานินพนธ์ .....	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี .....	4
2.1 ทฤษฎีสายอากาศและพื้นฐานพารามิเตอร์ .....	5
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น .....	5
2.1.2 อินพุทอิมพีแดนซ์ .....	9
2.1.3 ความกว้างลำ .....	14
2.1.4 ประสิทธิภาพลำคลื่น .....	14
2.1.5 โพลาริเซชัน .....	14
2.1.6 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น .....	17
2.1.7 สภาพเจาะจงทิศทาง .....	18
2.1.8 อัตราการขยาย .....	19
2.2 การแมตซ์สายอากาศ .....	19
2.2.1 การแมตซ์ด้วยช่วงนำสายสัญญาณยาว(1/4) $\lambda$ .....	20
2.2.2 การแมตซ์ด้วยสตีบ .....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

2.2.3	บาซูก้าบาลัน .....	21
2.2.4	บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ บาลันชนิดตัวนำขนาดความยาว(1/4) $\lambda$ .....	22
2.2.5	บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ.....	23
2.2.6	ที-แมตซ์ .....	24
2.2.7	แกมม่าแมตซ์.....	25
2.2.8	โอเมก้าแม็กซ์ .....	27
2.3	สายอากาศแบบรายคาบลิ้อก .....	28
2.3.1	ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแบบรายคาบลิ้อก .....	31
2.3.2	การป้อนสัญญาณแก่สายอากาศแบบรายคาบลิ้อก.....	36
2.4	สายอากาศแบบหุกระต่าย .....	39
2.4.1	ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศชนิดหุกระต่าย .....	39
2.5	เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง .....	40
2.5.1	ประวัติความเป็นมาของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง .....	40
2.5.2	การนำเทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้งาน.....	42
2.5.3	ข้อดีข้อเสียของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง.....	44
บทที่ 3	ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป .....	46
3.1	สายอากาศไมโครสตริป.....	46
3.1.1	รูปร่างลักษณะต่างๆ ของไมโครสตริป .....	46
3.1.2	คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นไมโครสตริป .....	49
3.1.3	การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป.....	50
3.2	การวิเคราะห์สายอากาศ .....	52
3.2.1	การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองควาตี.....	52
3.2.2	การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์.....	65
3.2.3	ควอไซกรีนฟังก์ชัน .....	66
บทที่ 4	การออกแบบและการสร้างสายอากาศ .....	69
4.1	สายอากาศแบบรายคาบลิ้อก .....	69
4.1.1	ขั้นตอนการคำนวณและการออกแบบ .....	70
4.2	สายอากาศแบบหุกระต่าย .....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 ผลการทดลอง .....	76
5.1 สายอากาศแบบรายคาบลิ้อก .....	76
5.1.1 เปลี่ยนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	76
5.1.2 ผลการวัดทดสอบจากสายอากาศต้นแบบ .....	85
5.2 สายอากาศแบบหุกระด้าย .....	90
5.2.1 เปลี่ยนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	90
5.2.2 การวัดทดสอบจากสายอากาศต้นแบบ .....	94
บทที่ 6 บทสรุป .....	98
6.1 สรุปผลจากการออกแบบและการเปลี่ยนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	98
6.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ .....	98
6.3 ข้อเสนอแนะ .....	98
เอกสารอ้างอิง .....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงขนาดของแต่ละอิเลิเมนต์.....	72
5.1 แสดงขนาดของแต่ละอิเลิเมนต์ของสายอากาศตัวแรกที่ทำกรทคลอง.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	นิยามการทำงานของสายอากาศ (ก) ในภาคส่ง (ข) ในภาครับ ..... 4
2.2	ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ ..... 5
2.3	แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง (ออตินิไดเรกชันแนล) ..... 6
2.4	แบบรูปหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร ..... 7
2.5	(ก) โลบต่างๆ และ บีมีวิตซ์ของแพทเทอร์นสายอากาศ ..... 8
2.5	(ข) แพทเทอร์นในแบบลิเนียร์ ..... 8
2.6	วงจรมุมลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง ..... 11
2.7	วงจรมุมลย์อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ ..... 13
2.8	ลักษณะโพลาริเซชันของสายอากาศ ..... 15
2.9	ลำดับที่ใช้ในการแมตซ์ ..... 21
2.10	บาชูก้าบาลัน ..... 22
2.11	บาลันชนิดตัวนำขนาดความยาว(1/4) λ ..... 23
2.12	บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ ..... 24
2.13	ที-แมตซ์และวงจรมุมลย์ ..... 25
2.14	แกมม่าแมตซ์ ..... 26
2.15	โอเมก้าแมตซ์ ..... 27
2.16	การเปลี่ยนแปลงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อก ..... 29
2.17	สายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อกชนิดต่างๆ ..... 30
2.18	สายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อกชนิดไดโพล ..... 32
2.19	โครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อกชนิดไดโพลในรูปแบบที่ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูง ..... 32
2.20	ระนาบ E และระนาบ H ต่อค่าฮาล์ฟเวเวอร์บีมีวิตซ์ ..... 34
2.21	แอมพลิจูดสัมพัทธ์ของกระแสฐานในบริเวณแอกทีฟต่อจำนวนอิลีเมนต์ ..... 35
2.22	สายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อก ที่มีการสร้างมุมแผดเพื่อใช้เป็นตัวฟีดเดอร์ ..... 36
2.23	รายละเอียดของจุดที่ทำการป้อนแบบสมมาตร ..... 36
2.24	วิธีการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศแบบรายคาบสี่อ็อกชนิดไดโพลในกรณีการออกแบบในย่านความถี่ VHF และ UHF ..... 38
2.25	สายอากาศแบบหุกระด้าย แบบแผ่น (ก) และสายอากาศไดโพลโครงสร้างกรวยคู่แบบสายเปิด (ข) ..... 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมและย่านความถี่ของ UWB เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน .....	42
3.1 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (MPA).....	47
3.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบ Traveling Wave .....	48
3.3 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบช่อง.....	48
3.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริป .....	49
3.5 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป.....	50
3.6 วงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 3.5.....	51
3.7 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป .....	53
3.8 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	54
3.9 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	58
3.10 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	59
3.11 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูล.....	61
3.12 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับแผ่นไมโครสตริป ร่องเดี่ยว และทั้งสองร่อง .....	61
3.13 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	62
3.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานร่อง.....	66
4.1 โครงสร้างสายอากาศแบบรายคาบล็อกแบบไมโครสตริป.....	69
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $T$ (Scaling factor) และ $\sigma$ (Spacing factor) .....	70
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ .....	72
4.4 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบล็อก .....	73
4.5 โครงสร้างสายอากาศแบบหุกระด้ายแบบไมโครสตริป.....	74
4.6 แสดงขนาดของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ.....	75
5.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแบบรายคาบล็อกโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	78
5.3 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	78
5.4 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	79
5.5 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	79
5.6 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	80
5.7 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบรายคาบลือกจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	80
5.8 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกที่ความถี่ 3 GHz.....	81
5.9 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ x-z ( $\phi=0^\circ$ ) ที่ความถี่ 3 GHz.....	82
5.10 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ y-z ( $\phi=90^\circ$ ) ที่ความถี่ 3 GHz.....	82
5.11 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกที่ความถี่ 5.5 GHz.....	83
5.12 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ x-z ( $\phi=0^\circ$ ) ที่ความถี่ 5.5 GHz.....	84
5.13 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบลือกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ y-z ( $\phi=90^\circ$ ) ที่ความถี่ 5.5 GHz.....	84
5.14 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของสายอากาศชนิดรายคาบลือก.....	85
5.15 แสดงการเชื่อมต่อของสายอากาศชิ้นงานจริงเข้ากับเครื่องมือเพื่อทดสอบวัดทดสอบหาคุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือก.....	86
5.16 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือก.....	87
5.17 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบลือก.....	87
5.18 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลือก.....	88
5.19 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบลือก.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบลึอก .....	89
5.21 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบลึอก .....	89
5.22 แสดงขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแบบหุกระต่ายโดยการเลียนแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	90
5.23 แสดงการกำหนดขนาดส่วนต่างๆ ของสายอากาศแบบหุกระต่าย .....	91
5.24 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	92
5.25 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	92
5.26 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	93
5.27 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	93
5.28 แสดงชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของชิ้นงานจริง ของสายอากาศต้นแบบแบบหุกระต่าย .....	94
5.29 แสดงขั้นตอนในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบ แบบหุกระต่าย .....	95
5.30 $S_{11}$ คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายที่ได้จากการวัด .....	95
5.31 มุมเฟสของสายอากาศแบบหุกระต่ายที่ได้จากการวัด .....	96
5.32 แสดงรูปชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบแบบรายคาบลึอกที่นำมาใช้ในการทดสอบ .....	96
5.33 แสดงรูปชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบแบบหุกระต่ายที่นำมาใช้ในการทดสอบ .....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คณะกรรมการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission)	FCC
โดเมนความถี่ (Frequency Domain)	FD
ช่องทางเพื่อการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั่วไป (General Purpose Interface Bus)	GPIB
สถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	IEEE
ฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	IFFT
สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union)	ITU
ระดับแนวสายตา (Line of Sight)	LOS
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)	PC
ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงาน (Power Delay Profile)	PDP
การมอดูเลตทางตำแหน่งของพัลส์ (Pulse Position Modulation)	PPM
โดเมนเวลา (Time Domain)	TD
ระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)	UWB
เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (Vector Network Analyzer)	VNA
แอมแปร์ (Ampere)	A
เดซิเบล (Decibel)	dB
เฮิร์ตซ์ (Hertz)	Hz
กิกะเฮิร์ตซ์ (Gigahertz)	GHz
เมตร (meter)	<i>m</i>
วินาที (Second)	<i>s</i>
นาโนวินาที (Nanosecond)	<i>ns</i>
วัตต์ (Watt)	W
มิลลิวัตต์ (Milliwatt)	mW
สัดส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth)	$B_f$
ความเร็วแสง (Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8, m/s$	<i>c</i>
ระยะทาง (Distance), <i>m</i>	<i>d</i>
ความถี่ (Frequency), <i>Hz</i>	<i>f</i>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ค่าความถี่บนของระบบการสื่อสาร	$f_H$
ค่าความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร	$f_L$
อัตราขยายของสายอากาศรับ (Receiver gain), $dB$	$G_R$
อัตราขยายของสายอากาศส่ง (transmitter gain), $dB$	$G_T$
ฟังก์ชันถ่ายโอนทางความถี่ (Frequency transfer function)	$H(\omega)$
กำลังงานที่รับได้ (Receive power), $W$	$P_R$
กำลังงานที่ส่ง (Transmitt power), $W$	$P_T$
เครื่องรับ (Receiver)	Rx
สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)	$S_{21}$
เวลา (Time), $s$	$t$
เครื่องส่ง (Transmitter)	Tx
ค่าคงที่การลดทอน (Attenuation constant), $Np \cdot m^{-1}$ หรือ $dB \cdot m^{-1}$	$\alpha$
ความยาวคลื่น (Wavelength), $m$	$\lambda$
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)	$\epsilon_r$
ความซึมซาบได้ (Permeability), $\mu = \mu_0 \mu_r, Hm^{-1}$	$\mu$
ความซึมซาบได้ของอวกาศว่าง (Permeability of free space), $\mu_0 \approx 400\pi \times 10^{-9}, Hm^{-1}$	$\mu_0$
ค่าเฉลี่ยเวลาประวิง (Mean excess delay), $s$	$\tau_m$
ค่าการแผ่ประวิง (RMS delay spread), $s$	$\tau_{rms}$
ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)	$\rho(d)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการรับ-ส่งข้อมูล และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้าด้วยกันไม่ว่าจะเป็นแล็ปท็อปคอมพิวเตอร์, โทรศัพท์มือถือ, เครื่องเสียงภายในบ้าน หรือเป็นการเชื่อมต่อภายในอาคารสำนักงาน ส่วนใหญ่แล้วเป็นการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายพื้นที่ท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless local area network; WLAN) หรือเป็นการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลแบบไร้สาย (Wireless Personal Area Network; WPAN) เช่น การรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบบลูทูธ (Bluetooth), ไว-ไฟ (WI-FI) เป็นต้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเหล่านี้ได้มีการพัฒนาไปเรื่อยๆ จึงเกิดกระแสขึ้นเกี่ยวกับการส่งข้อมูลด้วยระบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra wideband; UWB) เพราะเนื่องจากระบบนี้มีความกว้างของแบนด์วิดท์ (Bandwidth) มาก และมีความหนาแน่นกำลังในการส่งต่ำ เพราะเหตุนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลทำได้เร็วมาก และส่งข้อมูลที่ละมากๆ ได้ ดีกว่าระบบที่มีอยู่อย่างบลูทูธ และไว-ไฟ ดังนั้นทางคณะผู้ทำการวิจัยจึงได้แนวคิดที่จะออกแบบและวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศที่ดีที่สุดสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ ทั้งนี้เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงระบบสื่อสารข้อมูลในอนาคตอันใกล้

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแถบกว้างเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยระบบแถบกว้างยิ่ง
- 2 ศึกษาเครื่องมือวัดและทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศของระบบแถบกว้างยิ่ง
- 3 ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศก่อนนำไปใช้งาน ได้จริงตามที่ได้ออกแบบไว้

### 1.3 ขอบเขตและลักษณะของโครงการ

- 1 ศึกษาเทคโนโลยีระบบแถบกว้างยิ่ง และเทคโนโลยีสายอากาศ
- 2 ออกแบบสายอากาศโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 3 สร้างสายอากาศแถบกว้างสำหรับย่านความถี่แถบกว้างยิ่ง (3.1 GHz ~ 10.6 GHz)
- 4 ทดสอบคุณสมบัติสายอากาศแถบกว้างยิ่ง
- 5 ทำการประเมินผลประสิทธิภาพและคุณสมบัติของสายอากาศ
- 6 สรุปรายงาน ทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 สามารถออกแบบสายอากาศแบบแถบกว้างยิ่งได้
- 2 สามารถใช้เครื่องมือวัดได้
- 3 สามารถรู้ถึงประสิทธิภาพของระบบแถบกว้างยิ่งได้
- 4 สามารถนำไปใช้งานได้จริงในอนาคตอันใกล้

## 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

ลำดับ	ขั้นตอน	2551							2552	
		ม.ย	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1	ศึกษาข้อมูลที่เป็นและออกแบบ									
2	ออกแบบ									
3	ทำฮาร์ดแวร์									
4	ทำการทดลอง บันทึกผล									
5	ทำเอกสาร									

## 1.6 อุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดลอง

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ
- เครื่อง 8150C Vector network analyzer (VNA)
- เครื่อง 8514B S-parameter Test set (45 MHz - 20 GHz)
- เครื่อง 8360 Series synthesized sweeper (10 MHz - 20 GHz)
- ชุดปรับเทียบค่า 85052B (Calibration 85052B 3.5 mm)

## 1.7 โครงประกอบของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยมีบทนำอยู่ในบทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงแนวความคิด วัตถุประสงค์ ขอบเขตและลักษณะของโครงการ ส่วนรายละเอียดของบทต่างๆ อีก 5 บทมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎี มีการอธิบายถึงพารามิเตอร์ การแผ่รังสีของสายอากาศและทฤษฎีของสายอากาศแบบรายคาบล็อกและแบบหุกระต่าย รวมไปถึงเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย ประวัติความเป็นมา การประยุกต์ใช้งาน ข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงลักษณะและรูปแบบของสายอากาศแบบไมโครสตริป รวมถึงคุณสมบัติพื้นฐาน การป้อนสัญญาณของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปและการวิเคราะห์สายอากาศแบบต่างๆ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแบบรายคาบล็อกและแบบหุกระต่าย ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการคำนวณและการออกแบบสายอากาศแบบรายคาบล็อก

บทที่ 5 เป็นผลจากการจำลองการทำงานของสายอากาศโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยประกอบด้วย ขั้นตอนการทดสอบ ผลการทดลองซึ่งเป็นแพทเทิร์นการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่า  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศและอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing-wave ratio; SWR) จากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

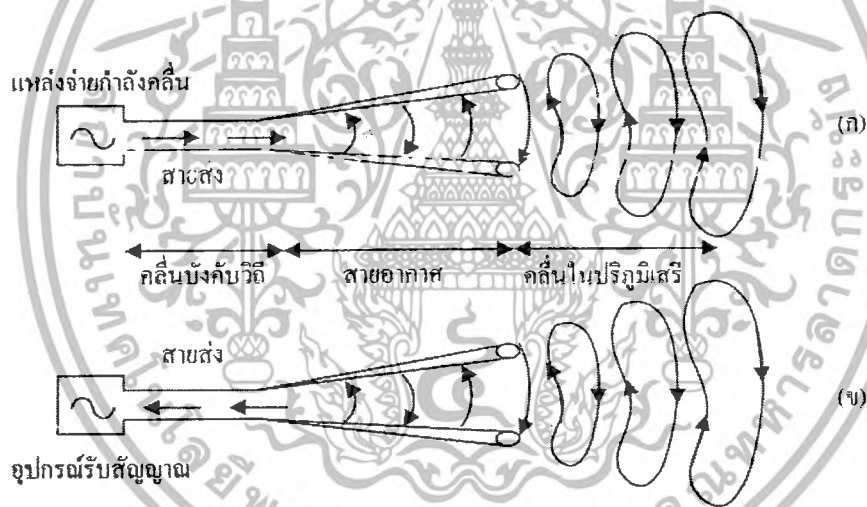
บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ปัญหาที่พบ และแนวทางในการแก้ปัญหาจากการดำเนินโครงการ



## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎี

หน้าที่หลักที่สำคัญของสายอากาศ คือ การแปรรูปพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างพลังงานในลักษณะคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและพลังงานคลื่นในอวกาศว่าง (Free space) สายอากาศจะเปลี่ยนรูปพลังงานจากลักษณะคลื่นบังคับวิถีไปเป็นคลื่นในอวกาศว่างที่แพร่กระจายไปในทิศทางที่ต้องการเมื่อปฏิบัติงานเป็นสายอากาศส่ง เมื่อเป็นสายอากาศรับ สายอากาศจะเปลี่ยนคลื่นในอวกาศว่างที่มาจากทิศทางของสถานีอื่นฟังประสงค์หรือรวมทั้งบรรดาคลื่นรบกวนทั้งหลายเป็นคลื่นบังคับวิถีในสายส่งและเข้าสู่เครื่องรับในที่สุด นอกจากนี้ยังอาจกล่าวอีกในหนึ่งได้ว่าสายอากาศคือส่วนที่เป็นภาคเชื่อมต่อระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ (คลื่นบังคับวิถี) กับ โฟตรอน (คลื่นในอวกาศว่าง) รูปที่ 2.1 แสดงนิยามของสายอากาศตามที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.1 นิยามการทำงานของสายอากาศ (ก) ในภาคส่ง (ข) ในภาครับ [14]

จุดเด่นของการเป็นสายอากาศมิได้หยุดอยู่เพียงการมีความสามารถในการรับหรือแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศต้องสามารถเลือกรับหรือส่งพลังงานจากต้นกำเนิดหรือสู่ปลายทางที่กำหนดได้ ด้วยเหตุนี้การออกแบบสายอากาศเพื่อให้สามารถปฏิบัติการที่กำหนดได้ จึงมีความหมายยิ่งนัก เมื่อนำผลลัพธ์จากการออกแบบไปวิเคราะห์ทำให้สามารถหาทางปรับเปลี่ยนการออกแบบ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น ได้ล่วงหน้า

## 2.1 ทฤษฎีสายอากาศและพื้นฐานพารามิเตอร์

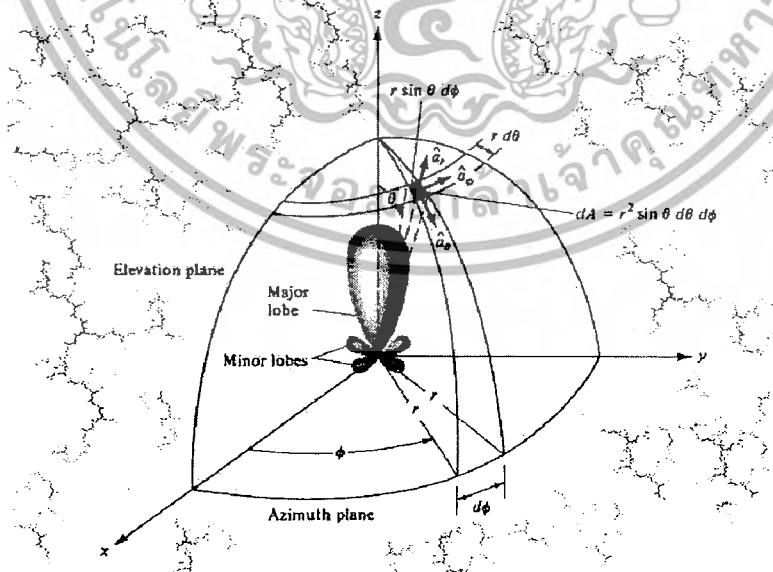
ในการจะกล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์และสังเคราะห์สายอากาศ เราจำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับศัพท์ต่างๆที่ใช้ในทฤษฎีสายอากาศ ตลอดจนความหมายของศัพท์เหล่านั้นไว้ก่อน ดังนั้นในบทนี้จะเริ่มแนะนำศัพท์ต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาในบทต่อไป

### 2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far field)

การอธิบายคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) หรือ โพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งมีคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูป 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นกำลังงาน (Power pattern) ของสายอากาศ และ กราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า แพทเทิร์นสนาม (Field pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.2 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 แบบรูปแบบไอโซทรอปิก ไคเรชันแนล และ ออมนิไคเรชันแนล

ตัวแพร่คลื่น ไอโซทรอปิก (Isotropic radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างจริงได้ แต่มักใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบอมนิไคเรชันแนล (Omnidirectional antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง (อมนิไคเรชันแนล) [21]

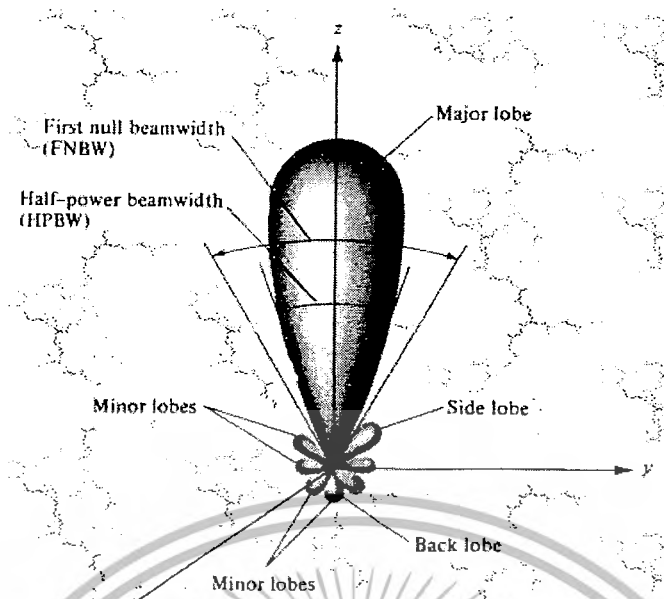
ตามรูปจะเห็นว่ารูปแบบการกระจายแบบนี้ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth plane)  $[f(\phi), (\theta) = \pi/2]$  แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation plane)  $[f(\phi), (\theta) = k]$  รูปแบบการแพร่กระจายชนิดนี้ออกแบบสำหรับอมนิไคเรชันแนลเป็นกรณีพิเศษของรูปแบบการแพร่กระจายแบบชี้ทิศทาง

### 2.1.1.2 แบบรูปหลัก

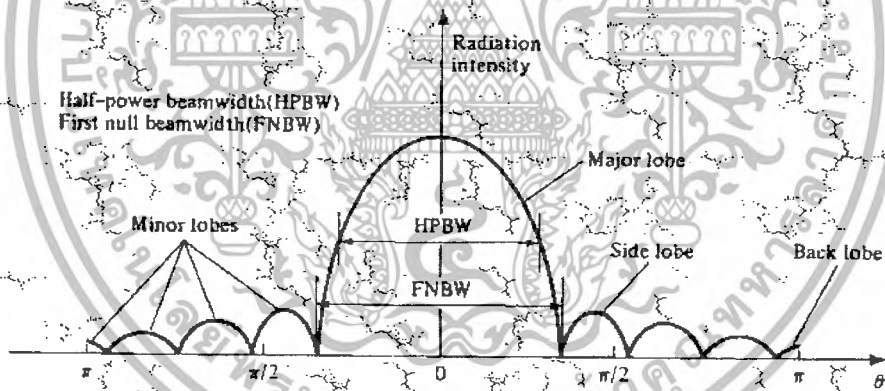
เราจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (Principal pattern) ของสนามไฟฟ้า  $E$  และ สนามแม่เหล็ก  $H$  สำหรับสายอากาศโพลาไรเซชัน (Linearly polarization) แบบรูปในระนาบ  $E$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และ ทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ  $H$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และ ทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลักมีดังแสดงในรูป 2.4 โดยมีระนาบ  $XZ$  ( ระนาบอาซิมุท;  $q = p/2$  ) เป็นระนาบ  $H$  หลัก



รูปที่ 2.4 แบบรูปหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร [21]



รูปที่ 2.5 (ก) โลบต่างๆ และ บีมวิดท์ของแบบรูปของสายอากาศ [21]



รูปที่ 2.5 (ข) แบบรูปในแบบลิเนียร์ [21]

แบบรูปของการกระจายคลื่น โดยทั่วไปจะมี 2 แบบ คือ

1. ถ้าเขียนจากสนามไฟฟ้า  $[D(\theta, \phi)]$  จะเรียกว่า “แบบรูปฟิลด์ (Field pattern)”

ดังรูปที่ 2.5 (ก)

2. ถ้าเป็นแบบรูปที่เขียนจากกำลังคลื่น  $[D(\theta, \phi)^2]$  จะเรียกว่า “แบบรูปเพาเวอร์

(Power pattern)” ดังรูปที่ 2.5 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.3 แบบรูปโอบของการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปของการกระจายคลื่น โดยทั่วไปแล้วจะมีรูปร่างทำนองเดียวกับรูปที่ 2.5 ชื่อเรียกลักษณะสำคัญในแบบรูปมีดังนี้

โอบหลัก (Major lobe) หรือ เมนบีม (Main beam) คือโอบส่วนที่มีกำลังคลื่นกระจายออกไปมากที่สุดและโดยทั่วไปจุดสูงสุดของแบบรูปจะอยู่ในโอบหลักนี้ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีโอบหลักมากกว่า 1 โอบ เช่น สายอากาศแยกบีม (Split – beam antenna)

โอบย่อย (Minor lobe) ได้แก่โอบอื่นๆนอกเหนือไปจากโอบหลัก

โอบข้าง หรือ ไซด์โอบ (Side lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ติดกับโอบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับโอบหลัก

โอบหลัง (Back lobe) เป็นโอบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับโอบหลักปกติแล้วโอบย่อยจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัดโอบเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด

ระดับของโอบย่อยมักแสดงด้วยอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในโอบที่กำลังติดต่อความหนาแน่นของพลังงานในโอบหลัก ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนของไซด์โอบ (Side Lobe Level; SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้น มักจะต้องการให้ระดับของไซด์โอบน้อยกว่า -20 dB

### 2.1.2 อินพุทอิมพีแดนซ์ (Input impedance)

อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้นๆ อาจจะเป็นอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ขั้วสายอากาศนั้นคือ อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็น

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R_A$  = ความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

$X_A$  = รีแอกแตนซ์ที่ขั้วสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

โดยทั่วไปความต้านทานที่ขั้วสายอากาศ ( $R_A$ ) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.2)$$

เมื่อ  $R_r$  = ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาริใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R_L$  = ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม  
 ถ้าให้สายอากาศต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ภายในเป็นดังนี้

$$Z_g = R_g + jX_g \tag{2.3}$$

เมื่อ  $R_g$  = ความต้านทานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ มีหน่วยเป็น โอห์ม  
 $X_g$  = รีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ มีหน่วยเป็น โอห์ม

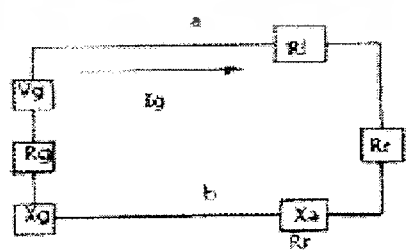
พิจารณารูปที่ 2.6 สามารถหากระแสที่ไหลภายในลูปได้ คือ

$$I_g = \frac{V_g}{Z_t} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \tag{2.4}$$

(แอมป์)

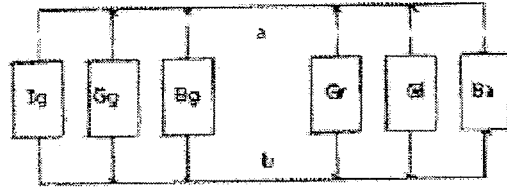
$$I_g = \frac{V_g}{(R_r + R_L + R_g) + j(X_A + X_g)} \tag{2.5}$$

(แอมป์)



(ข) Thevenin equivalent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) Norton equivalent

รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการส่ง [4]

ขนาดของกระแสมีค่าดังนี้

$$|I_g| = \frac{|V_g|}{\sqrt{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2}} \quad \text{(แอมป์)} \quad (2.6)$$

กำลังงานที่ดูกลุ่มาขังสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าดังนี้

$$P_r = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r$$

$$P_r = \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \frac{R_r}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad \text{(วัตต์)} \quad (2.7)$$

กำลังงานที่สูญเสียกลายเป็นความร้อนมีค่าดังนี้

$$P_L = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L$$

$$P_L = \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \frac{R_L}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad \text{(วัตต์)} \quad (2.8)$$

กำลังงานส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่สูญเสียเป็นความร้อนในความต้านทานที่ขั้ว  $R_g$  ของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งมีค่า

$$P_g = \frac{|V_g|^2}{2} \cdot \frac{R_g}{(R_r + R_L + R_g)^2 + (X_A + X_g)^2} \quad (\text{วัตต์}) \quad (2.9)$$

จะเห็นว่ากำลังงานที่ถูกนำมายังสายอากาศ จะมีค่ามากที่สุด เมื่อเกิดการคอนจูเกตแมตช์ (Conjugate Match) นั่นคือจะเกิดเมื่อ

$$R_g = R_r + R_L$$

และ

$$X_A = -X_g$$

ซึ่งจะทำให้

$$P_g = P_r + P_L = \frac{|V_g|^2}{8} \cdot \frac{R_g}{(R_r + R_L)^2} \quad (2.10)$$

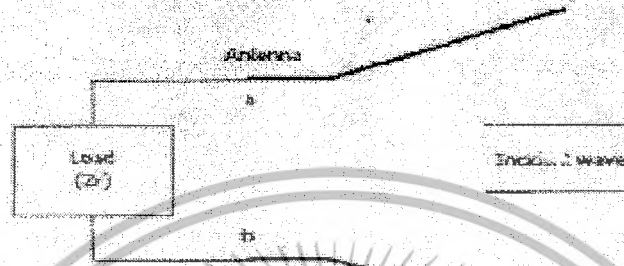
ดังนั้นกำลังที่เครื่องกำเนิดสัญญาณต้องจ่ายเมื่อเป็นคอนจูเกตแมตช์ จะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{2} V_g I_g^* \\ &= \frac{1}{2} V_g \frac{V_g^*}{2(R_r + R_L)^2} \\ &= \frac{|V_g|^2}{4} \cdot \frac{1}{R_r + R_L} \end{aligned} \quad (2.11)$$

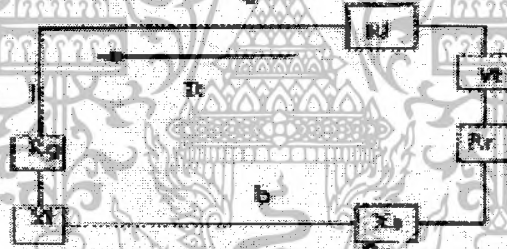
จำนวนกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่ายทั้งหมด  $P_g$  ครึ่งหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อน ภายในความต้านทานภายใน ( $R_g$ ) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกนำมายังสายอากาศซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเป็นคอนจูเกตแมตช์เท่านั้น ในส่วนของกำลังงานที่มายังสายอากาศส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายออกไปผ่านกลไกที่เกิดจากความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น  $P_r$  อีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีการสูญเสีย ( $e_{cd} = 1$ ) ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่เครื่องกำเนิดสัญญาณจ่าย จะแพร่กระจายออกเมื่อเป็นคอนจูเกตแมตช์ สมมติว่าเป็นการแมตช์ที่สมบูรณ์ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง ( $e_r = 1$ ) ถ้ามีการใช้สายอากาศเป็นสายอากาศรับ ดังรูปที่ 2.7 ถ้ามีคลื่นตกกระทบเข้ามายังสายอากาศ จะเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้า  $V_r$  ซึ่งเทียบได้กับ  $V_g$  ในโหมดของการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

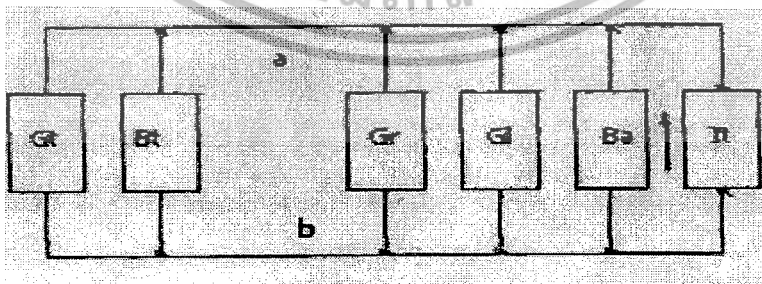
โดยปกติอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และจะเหมาะสมกับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่หนึ่งๆ เท่านั้น นอกจากนี้อินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นกับเฟคเตอร์ต่างๆ อีกได้แก่ รูปทรง, วิธีการป้อนสัญญาณ และสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลองวัด



(ก) Antenna in transmitting mode



(ข) Thevenin equivalent



(ค) Norton equivalent

รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดการรับ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ความกว้างลำ (Beamwidth)

ความกว้างของลำ เป็นค่าที่มีผลต่อการพิจารณาความสามารถในการกำหนดรายละเอียด การตรวจวัดข้อมูลในการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล หรือพื้นที่ครอบคลุมของลำสัญญาณในการ ให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยทั่วไปมีนิยามของความกว้างลำสองแบบที่นิยมใช้ กัน ได้แก่

- ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half – power beamwidth) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้ม ของการแพร่กระจายคลื่น ใน โลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด ดังแสดงดังรูปที่ 2.5

- ความกว้างลำ ณ จุดศูนย์คู่แรก (First - null beamwidth) เป็นขนาดเชิงมุมของ โลบหลักที่ วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู่แรก

### 2.1.4 ประสิทธิภาพลำคลื่น

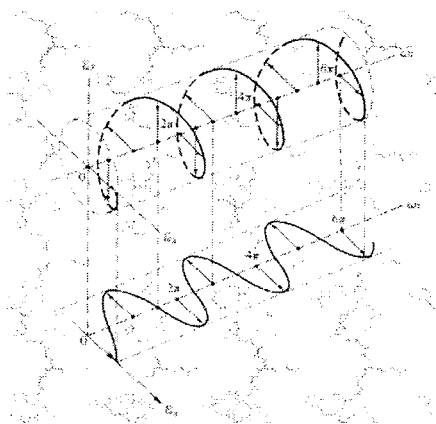
ค่านี้เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของพื้นที่ลำคลื่นหลัก (Main beam area) กับพื้นที่ลำคลื่น (beam area) ของสายอากาศซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_b = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (2.12)$$

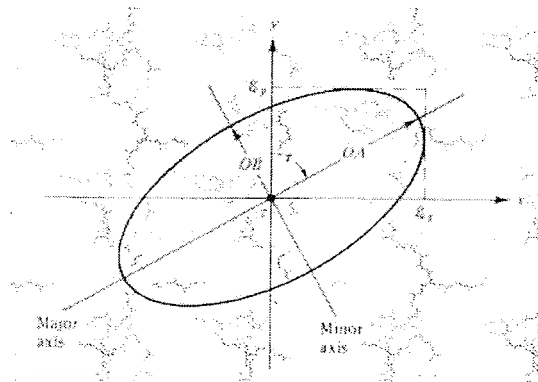
เมื่อ  $\eta_b$  = ประสิทธิภาพของลำคลื่น  
 $\Omega_M$  = พื้นที่ลำคลื่นหลัก  
 $\Omega_A$  = พื้นที่ลำคลื่นของสายอากาศ

### 2.1.5 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแบบที่ใช้แสดงคุณสมบัติของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป สามารถอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่ง แปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาริเซชันจะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลา ต่างๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางตาม ไป ดังรูปที่ 2.8



(ก) การหมุนของคลื่น



(ข) วงรีโพลาไรเซชัน

### รูปที่ 2.8 ลักษณะ โพลาไรเซชันของสายอากาศ [21]

สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายอากาศส่ง) หรือเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่เข้าของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึงทิศทางที่สายอากาศมีแอมพลิจูดมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะแตกต่างกัน

การแบ่งชนิดโพลาไรเซชัน สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการหมุนของยอดของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ ติเนียร์โพลาไรเซชัน (Linearly polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circularly polarization) และโพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptically polarization)

จะเขียนสมการชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศทาง  $-z$  ได้ว่า

$$E(z,t) = a_x E_x(z;t) + a_y E_y(z;t) \quad (2.13)$$

ส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$E_x(z,t) = E_x \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.14)$$

$$E_y(z,t) = E_y \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.15)$$

### 2.1.5.1 ลิเนียร์โพลาริเซชัน

คลื่นซึ่งเป็นลิเนียร์โพลาริเซชัน ความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนามจะมีค่า ดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

### 2.1.5.2 โพลาริเซชันแบบวงกลม

จะเกิดโพลาริเซชันแบบวงกลมได้ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ  $\pi/2$  นั่นคือ

$$|E_x| = |E_y| \rightarrow E_x = E_y \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \phi_y - \phi_x &= +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & n = 1, 2, 3, \dots \text{ CW} \\ &= -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & n = 1, 2, 3, \dots \text{ CCW} \end{aligned} \quad (2.18)$$

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงข้าม (คือทิศทาง  $+z$ ) เฟสใน (2.18) ที่ทำให้เกิด CW (Clockwise) และ CCW (Counter clock wise) จะต้องสลับกัน

### 2.1.5.3 โพลาริเซชันแบบวงรี

โพลาริเซชันแบบวงรีจะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ  $\pi/2$  แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสไม่เป็นจำนวนคี่ของ  $\pi/2$  นั่นคือ

$$|E_x| \neq |E_y| \rightarrow E_x \neq E_y$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \Delta\phi = \phi_y - \phi_x &= +\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & n = 1, 2, 3, \dots \text{ CW} \\ &= -\left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi & n = 1, 2, 3, \dots \text{ CCW} \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n}{2}\pi > 0 \quad \text{CW}$$

$$< 0 \quad \text{CCW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

คำจำกัดความของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่ออกจากสายอากาศต่อมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศเกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นกับผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \tag{2.20}$$

เมื่อ  $U$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)  
 $W_{rad}$  = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m<sup>2</sup>)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |\bar{E}(r, \theta, \phi)|^2 = \frac{1}{2\eta} [E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2] \tag{2.21}$$

เมื่อ  $\bar{E}$  = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล  
 $E_\theta, E_\phi$  = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล  
 $\eta$  = อินทรินสิคิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นรูปแบบของการแผ่กระจายคลื่นของควัดังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน กำลังทั้งหมดค้นหาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นจากสมการ (2.9) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \oiint U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \tag{2.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ไดเรกทีฟเนสในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้อ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงจะใช้ไอโซทรอปิกพอยท์ (Isotropic point source)

สภาพเจาะจงทิศทาง คือ ค่าของไดเรกทีฟเนสในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือสภาพเจาะจงทิศทางของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซทรอปิกคือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของ ไอโซทรอปิกพอยท์เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.23)$$

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.24)$$

เมื่อ	$D_g$	= ไดเรกทีฟเนส	(ไม่มีหน่วย)
	$D_0$	= สภาพเจาะจงทิศทาง	(ไม่มีหน่วย)
	$U$	= ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น	(W/หน่วยมุมตัน)
	$U_{\max}$	= ค่าของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น	(W/หน่วยมุมตัน)
	$U_0$	= ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซทรอปิก	(W/หน่วยมุมตัน)
	$P_{\text{rad}}$	= กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด	(W)

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะทราบไดเรกทีฟเนส และสภาพเจาะจงทิศทางของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่งเพราะว่ามันมีการแผ่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากันคือ  $U$ ,  $U_{\max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากันแต่ต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ

สภาพเจาะจงทิศทางของไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแผ่กระจายกำลังงานออกไปในทุกทิศทางด้วยความถี่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่นๆ นั้นย่อมมีสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ และค่าไดเรกทีฟเนสจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับสภาพเจาะจงทิศทาง  $0 \leq D_g \leq D_0$

### 2.1.8 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศไม่ได้บอกถึงความสามารถในการขยายสัญญาณเช่นเดียวกับกรณีของวงจรขยาย ในกรณีของสายอากาศนั้นอัตราขยายจะคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่สนใจกับความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นโดยเฉลี่ย ในการคำนวณความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นโดยเฉลี่ย พิจารณาว่ากำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้กับสายอากาศได้รับการแพร่ออกไปอย่างเท่าเทียมกันรอบทิศทางไม่มีการสูญเสีย สูตรสำหรับการคำนวณอัตราขยายเป็นดังนี้

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $G$  = อัตราขยาย  
 $U(\theta, \phi)$  = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น  
 $P_{in}$  = กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ

เนื่องจากการคำนวณอัตราขยายจะคำนึงถึงผลของการสูญเสียด้วย ดังนั้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางและอัตราขยายจึงมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$G = \eta D \quad (2.26)$$

### 2.2 การแมตช์สายอากาศ

สาเหตุที่มีการการแมตช์ การรับ – ส่งของระบบสายอากาศย่านความถี่หนึ่งๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะทางความถี่ (Frequency characteristic) ของการต่อสายต่อสายส่งเข้ากับอิมพีแดนซ์ด้วย ในทางปฏิบัติค่าของอิมพีแดนซ์ของสายส่งเป็นค่าจริงและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นค่าเชิงซ้อน และการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติทั้งสองเป็นแบบฟังก์ชัน ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบวงจรคัปปลิง (Coupling matching network) ขึ้นมาเพื่อจะได้ทำการแมตช์ค่าคุณลักษณะทั้งสองในย่านความถี่ที่ต้องการ

### 2.2.1 การแมตช์ด้วยช่วงนำสายสัญญาณยาว $(1/4) \lambda$

วิธีการแมตช์ด้วยวิธีนี้นับว่าง่ายดีเพราะใช้ความยาวสายที่พอเหมาะ แล้วต่อเชื่อมกันโดยตรงโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นใดประกอบด้วย ตามที่เราทราบมาแล้วหากตัดความยาวของสายนำสัญญาณ ให้มีขนาดความยาวเพียง  $(1/2)$  ของความยาวคลื่น และถ้าให้ปลายด้านหนึ่งลัดวงจร ค่าอิมพีแดนซ์ของสายจะมีค่านันต์และจะไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอีกด้วย อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าใช้ค่าลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ และอิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งกำเนิดสัญญาณมาต่อเชื่อม ก็จะทำให้หน้าที่เป็นตัวแมตช์ได้นั่นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายที่นำมาทำเป็นตัวแมตช์จะมีสูตรดังนี้

$$Z_{ms} = \sqrt{Z_a Z_1} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $Z_{ms}$  = ลักษณะสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของสายที่เป็นตัวแมตช์

$Z_a$  = อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ

$Z_1$  = อิมพีแดนซ์ของตัวเครื่องส่ง

ความยาวของสายที่มีขนาด  $(1/4) \lambda$  สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความยาวของสายที่มีขนาด}(1/4) \lambda = \frac{(246 \cdot V_c)}{f} \quad (\text{หน่วยเป็นฟุต}) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $f$  = ความถี่ของสัญญาณ

$V_c$  = ค่าคงตัวของความเร็ว

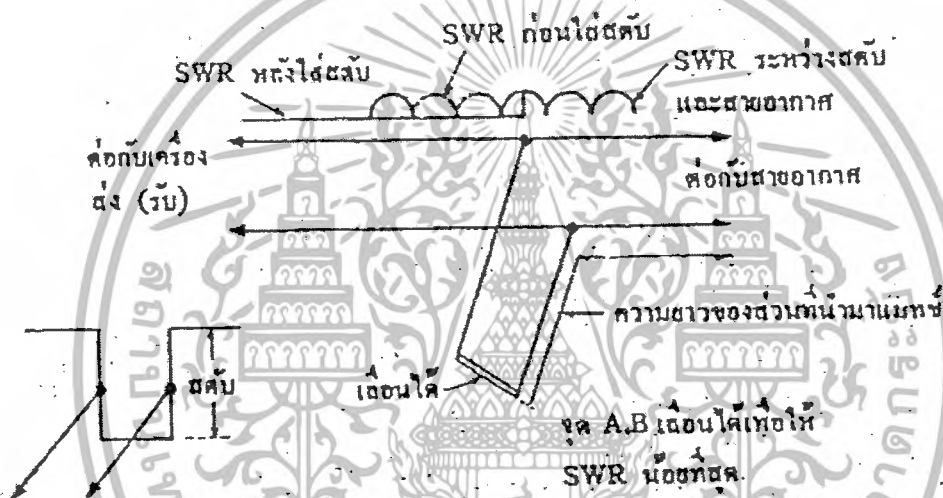
ในบางครั้งที่เราจะหาขนาดของสายมาใช้วางทำได้ยาก เพราะค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าไม่ต่อเนื่องตลอด ดังนั้นถ้าคำนวณได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายแล้วก็อาจจะหาค่าสายมาใช้งานไม่ได้วิธีแก้ไขคืออาจจะใช้ท่อออลูมิเนียม โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  วางห่างกัน โดยค่าอิมพีแดนซ์ของออลูมิเนียมคู่มิค่าเป็น

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{k}} \log \frac{2D}{d} \quad (2.29)$$

### 2.2.2 การแมตช์ด้วยสตัป

เมื่อนำสายสัญญาณสองเส้นมาต่อกัน โดยที่อิมพีแดนซ์ของสายไม่เท่ากัน การสะท้อนของคลื่นย่อมเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่า SWR มีค่าสูง ซึ่งจะทำให้ส่วนของสัญญาณที่เป็นรีแอกทีฟปรากฏขึ้นมากมาย วิธีหนึ่งที่แก้ไขปัญหานี้ได้ก็คือใช้สตัป ซึ่งก็ต้องมีการหาขนาดของสตัปและวิธีการออกแบบ

ความหมายของคำว่าสตัปก็คือ สายที่นำมาต่อขนานกับสายนำสัญญาณเพื่อให้อิมพีแดนซ์รวมของสายแมตช์ได้กับต้นกำเนิดสัญญาณหรือโหลด ถ้าพิจารณาในแง่ของการสะท้อนของคลื่น ถ้าหากไม่มีสตัป การเคลื่อนที่เหนี่ยวนำของคลื่นในสายนำสัญญาณจะเสมือนเป็นคลื่นซึ่งให้ค่า SWR สูง แต่ถ้านำสตัปมาต่อก็จะทำให้คลื่นในสายราบเรียบดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สตัปที่ใช้ในการแมตช์ [18]

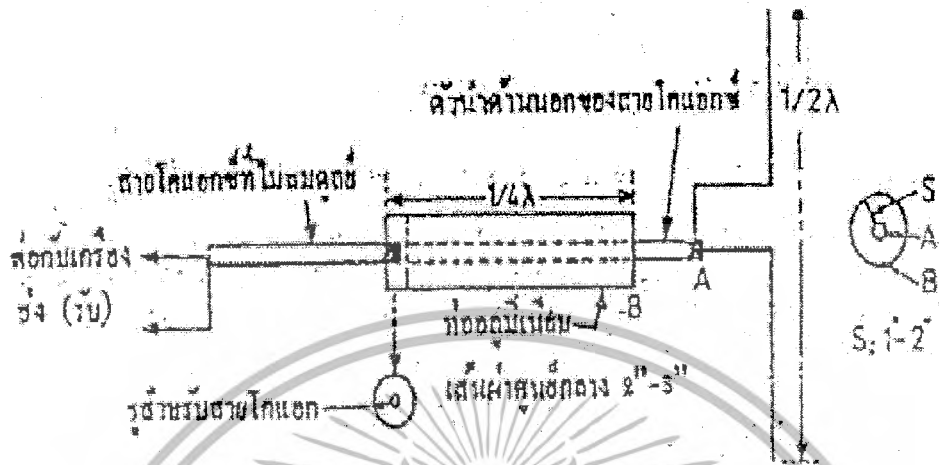
เมื่อเราใช้สายที่มีอิมพีแดนซ์ที่มีค่าไม่เท่ากับสายอากาศ เช่น ใช้สายนำสัญญาณ 70 โอห์ม ใช้กับสายอากาศฮาล์ฟเวฟไดโพล ซึ่งย่อมทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่น การสะท้อนของคลื่นมักจะเหนี่ยวนำออกมาภายนอกในกรณีที่มีค่าแรงดันสแตนด์วอลท์เป็นค่าไม่เป็นศูนย์ ซึ่งก็ทำให้เกิดคลื่นในลักษณะแนวตั้งเกิดคลื่นขึ้นจากสายสัญญาณนี้ จะทำให้สายนำสัญญาณที่ใช้กับตัวสายอยู่ในสภาพที่ไม่แมตช์กันมากยิ่งขึ้น วิธีแก้ไขได้เพื่อให้สภาวะการแมตช์เกิดดีขึ้น

### 2.2.3 บาซูก้าบาลัน

บาซูก้าบาลันเป็นวิธีการหนึ่งในการช่วยทำการแมตช์สายดีขึ้น สาเหตุที่เรียกว่าบาซูก้า ก็เพราะว่ารูปร่างที่ใช้งานมีลักษณะเหมือนกับปืนบาซูก้า โดยใช้ท่อลูมิเนียมที่มีความยาว  $(1/4)\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวมใส่สายนำสัญญาณด้วยให้ตอนล่างของท่ออคูมิเนียม เชื่อมติดกับกราวด์ของสายนำสัญญาณ ท่อที่ใช้ควรจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 1 – 2 นิ้ว ดังรูป



ส่วนท่อนำส่ง

$$L \text{ (ฟุต)} = \frac{234}{F \text{ (MHz)}} \quad (\text{เมื่อ } \phi \text{ ของ บานูทว : 3" ของสายโคแอกซ์})$$

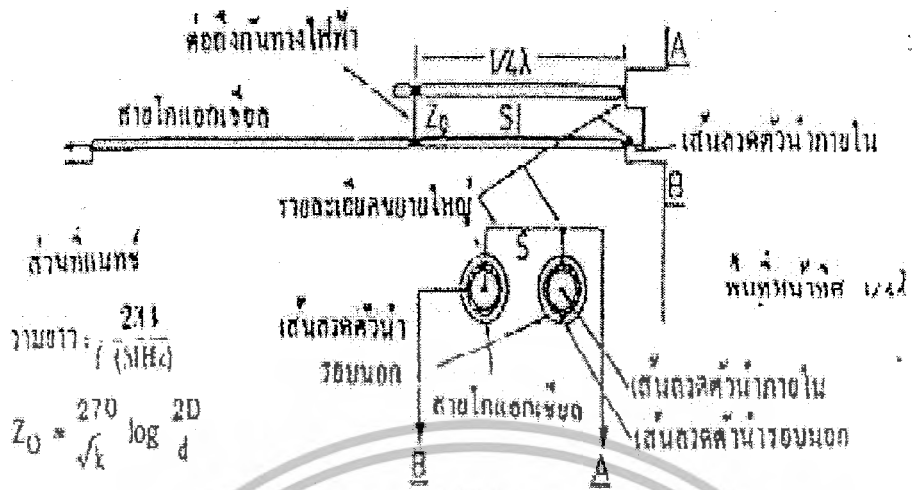
รูปที่ 2.10 บานูทวาลัน [18]

2.2.4 บาลันชนิดอาร์คไฟฟ บาลันชนิดตัวนำขนาดความยาว (1/4) λ

บาลันชนิดบานูทวามีข้อเสียตรงที่จะใช้ได้กับความถี่ที่ทำให้ความยาวของตัวบาลันเท่ากับ (1/4) จริงๆ ซึ่งเหมาะที่จะใช้กับความถี่สูงๆ คือ ย่านวีเอชเอฟและย่านยูเอชเอฟ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือต้องใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่จึงจะทำให้รูปร่างใหญ่โต ทางแก้ไขและให้ผลดีโดยใช้ตัวนำที่มีความยาวขนาด(1/4) λ วางขนานกับสายนำสัญญาณ ส่วนปลายสุดของแท่ง ตัวนำที่วางขนานเชื่อมติดกับกราวด์ของสายโคแอกซ์ ดังในรูปที่ 2.11

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเมื่อทำการแมตซ์แล้วจะมีค่าซึ่งหาได้จากสูตร

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{k}} \log \frac{2D}{d} \tag{2.30}$$

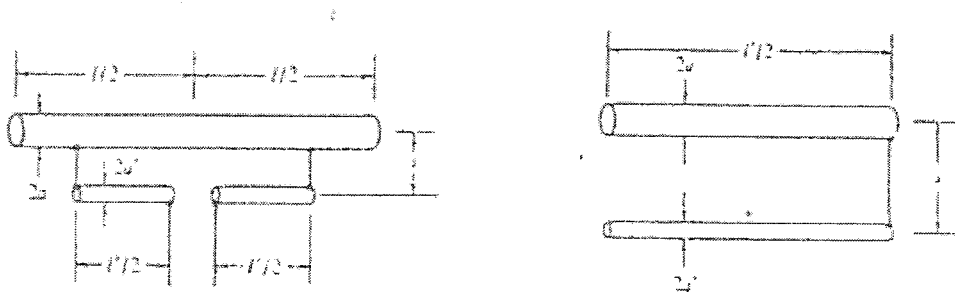


รูปที่ 2.11 บาลันชนิดตัวนำขนาดความยาว(1/4) λ [18]

2.2.5 บาลันชนิดฮาล์ฟเวฟ

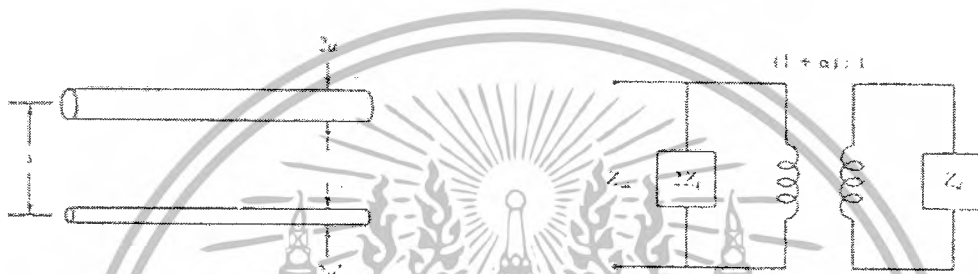
ในการใช้บาลันแบบก่อนเราทำให้ตัวสายนำสัญญาณมีขนาดอิมพีแดนซ์เท่ากับขนาดของสายอากาศซึ่งก็เป็นการแมตซ์ด้วยอัตราส่วน 1:1 นั่นเอง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการทำให้สายนำสัญญาณไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์รวมนั่นเอง ส่วนบาลันที่จะกล่าวถึงนี้จะทำหน้าที่แมตซ์ระหว่างสายได้เป็นอย่างดี แต่จะทำให้ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้วยอัตราส่วน 4:1 ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่ง ในการใช้เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ในระบบสายอากาศ แต่มีข้อเสียที่ให้คุณสมบัติตอบสนองต่อความถี่ในช่วงแคบๆ เท่านั้น





(ก) ที แมตช์

(ข) Shorted transmission line equivalent



(ค) Two-wire transmission line

(ง) equivalent circuit for T-match



(จ) T-match resonant connection

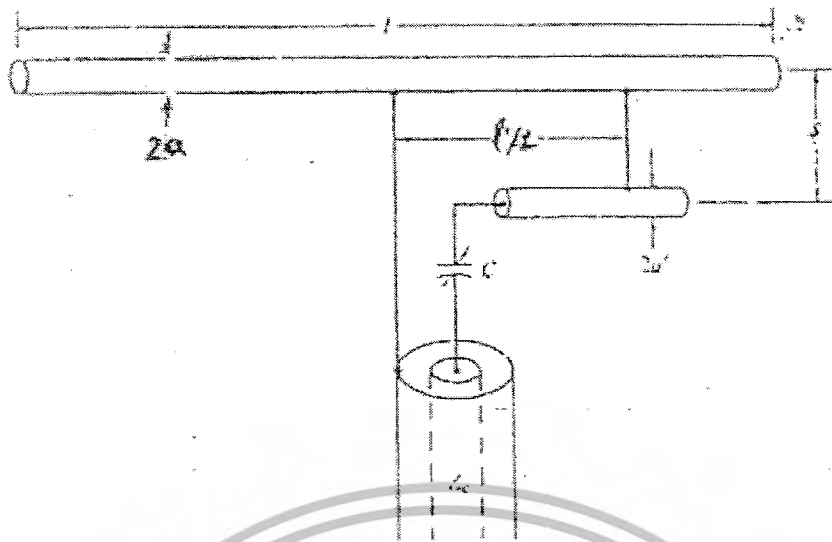
(ฉ) Equivalent for T-match resonant connection

รูปที่ 2.13 ที-แมตช์และวงจรสมมูลย์ [18]

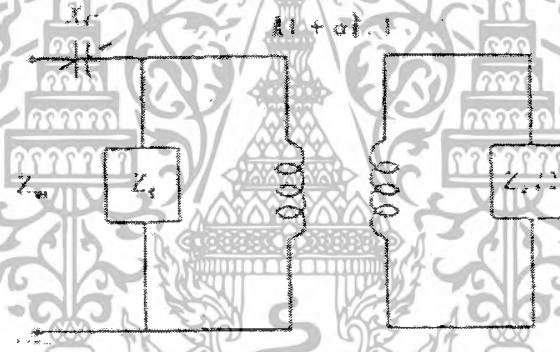
### 2.2.7 แกมมาแมตช์ (Gamma match)

บ่อยครั้งที่สายอากาศไดโพลได้รับการฟีด โดยสายโคแอกเซียล (Coaxial) ซึ่งเป็นสายส่งที่ไม่สมดุล (Unbalanced) วิธีที่สะดวกในการต่อสายไดโพล หรือสายอากาศอื่นๆ เช่น ยากิ (Yagi) ล็อกเพอริโอดิก (Log-periodic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แกมม่าแมตซ์



(ข) Equivalent

รูปที่ 2.14 แกมม่าแมตซ์ [18]

เข้ากับสายโคแอกเชียลที่มีค่าความต้านทาน 50 หรือ 70 โอห์ม วิธีการแมตซ์คือ การใช้แกมม่าแมตซ์ การต่อแบบนี้สมมูลกับครึ่งหนึ่งของที-แมตซ์และ ใช้คาปาซิเตอร์ 1 ตัว ต่ออนุกรมกับแขนแกมม่า วงจรสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 2.14 (ข) และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ

$$Z_{in} = jxc + \frac{Z_g [(1+a)^2 Z_a]}{2Z_g + (1.2)^2 Z_a} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

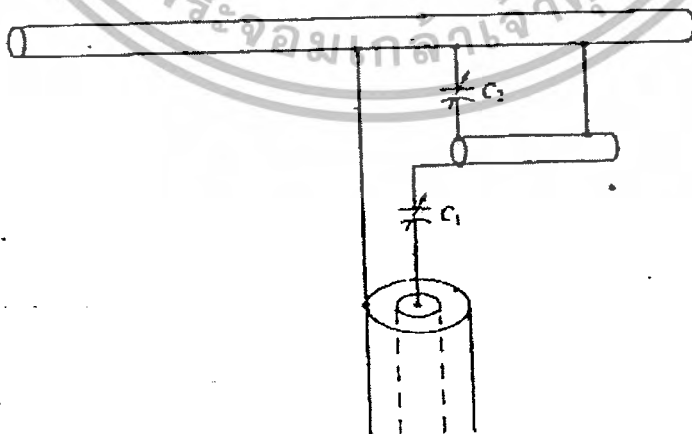
เมื่อ  $Z_a$  มีค่าฟรีสเปซ (Free space) อิมพีแดนซ์ที่จุดศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อ ไม่มีการต่อเกมม่าแมตซ์

ปัญหาที่พบบ่อยเสมอคือ ความยาวของสายอากาศ  $l$  และค่าอิมพีแดนซ์ คุณลักษณะของสายอากาศฟิสิกส์ ( $Z_a$ ) ซึ่งรู้ค่า แต่ต้องการใช้ค่ารัศมี  $a$  และ  $a'$  ความยาว  $l/2$  และค่าคาปาซิแตนซ์เท่าไร จึงจะแมตซ์ได้ดี เพราะว่าการจัดเรียงคล้ายกับที-แมตซ์ หรือ โพลเดดไดโพลการวิเคราะห์เกี่ยวกับเกมม่าแมตซ์ จึงอยู่บนฐานเดียวกัน

ในการแมตซ์จะใช้วิธีการออกแบบโดยใช้กราฟซึ่งใช้สมิทชาร์ทและอยู่บนพื้นฐานของวงจรมบรูณขบวนการทางคณิตศาสตร์ก็นำมาใช้ด้วย แต่ในที่นี้ไม่ได้กล่าวถึงไว้ เพราะว่าค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากกับค่า  $a$ ,  $a'$  และ  $S$  ดังนั้น ขบวนการโดยทั่วไปคือการเลือกค่าเหล่านี้และรักษาไว้ให้คงที่ไว้ ค่าพารามิเตอร์ที่แปรเปลี่ยน คือ  $l/2$  เปลี่ยนไปโดยใช้แคลมป์เลื่อน (Sliding clamp) เพื่อการกระทำต่อเซอร์ท ฌ จุดปลายของท่อนเกมม่า (Gamma rod)

### 2.2.8 โอเมก้าแมตซ์ (Omega match)

เมื่อนำเกมม่าแมตซ์มาเพื่อเติมอีกเล็กน้อย จะได้โอเมก้าแมตซ์ ความแตกต่างเพียงอย่างเดียว ก็คือ นอกจากมี  $C_1$  ที่ต่ออนุกรม ยังมี  $C_2$  ซึ่งต่อขนาน ซึ่งสามารถจะช่วยให้แมตซ์ได้ โดยปกติการไม่มี  $C_2$  ทำให้เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้รอด (Rod) ที่สั้นกว่า หรือทำให้เป็นการง่ายที่จะแมตซ์ไดรเวนอิลีเมนต์ที่รีโซแนนซ์ หน้าที่ย่อบังคับของ  $C_2$  คือจะเปลี่ยนค่าในขั้นตอนที่ 9 ของขบวนการออกแบบ เพื่อที่ว่าเมื่อมันกลับเศษเป็นส่วน (Inverted) ค่าจริงที่ไม่นอร์มอลไลซ์ของมันจะได้เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่ทางเข้า วิธีนี้จะทำให้สามารถลดความต้องการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่างๆ ของแมตซ์อิลีเมนต์ ถ้าการแมตซ์ไม่ได้ผล



รูปที่ 2.15 โอเมก้าแมตซ์ [18]


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 สายอากาศแบบเรขาคณิต

สายอากาศแบบเรขาคณิตเป็นสายอากาศประเภทที่เป็นอิสระจากความถี่ โดยที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นเรขาคณิตลอการิทึม (Logarithm) ของความถี่ ในขณะที่ความถี่  $f_1$  เลื่อนไปอีกความถี่หนึ่งคือ  $f_2$  ภายในย่านความถี่ของสายอากาศ จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทั้งสองดังนี้

$$f_2 = \frac{f_1}{\tau} \quad (2.32)$$

โดยที่  $\tau$  เป็นค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยมี  $\tau < 10$  เสมอ ในทำนองเดียวกันก็สามารถหาค่าของความถี่สำหรับองค์ประกอบอื่นๆ ได้เช่นเดียวเช่น



$$f_3 = \frac{f_1}{\tau^2}$$

$$f_4 = \frac{f_1}{\tau^3}$$

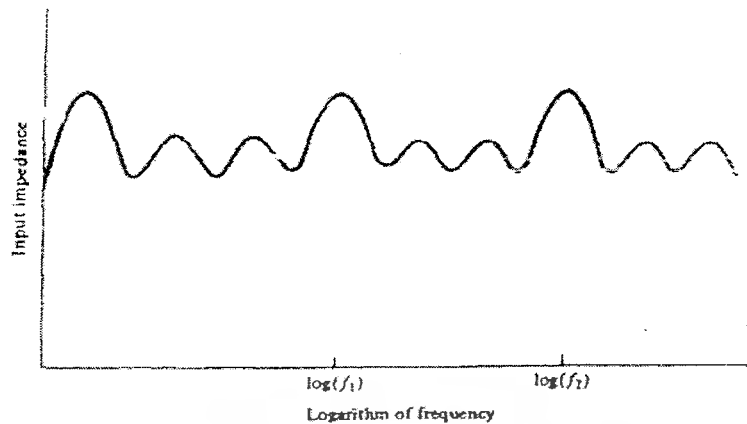
$$\dots$$

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots, n$   
 $f_1$  = ความถี่ต่ำสุดของการใช้งาน  
 $f_n$  = ความถี่สูงสุดของการใช้งาน

ซึ่งจากคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นเรขาคณิตตามค่าลอการิทึมของความถี่ ทำให้เมื่อเราต้องการพล็อตค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในลักษณะฟังก์ชันของลอการิทึม ความถี่จะได้ลักษณะเป็นเรขาคณิตของอินพุทอิมพีแดนซ์ ดังนั้นชื่อที่ว่าเรขาคณิตก็มีความหมายจากการแปรผันเป็นเรขาคณิตที่ขึ้นอยู่กับค่าลอการิทึมของความถี่ตามที่แสดงในรูปที่ 2.16 พารามิเตอร์อื่นๆ ก็จะมีการแปรผันคล้ายคลึงกับค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ได้แก่ สภาพเจาะจงทิศทาง, ความกว้างลำ

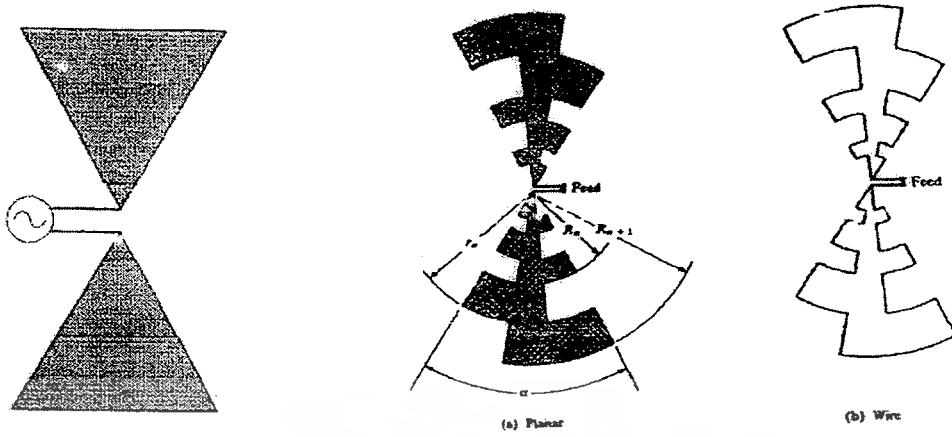
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบรายคาบล็อก [19]

สายอากาศแบบรายคาบล็อกเป็นสายอากาศที่ใช้ในการป้อนสัญญาณเข้าที่องค์ประกอบแรกของสายอากาศ จากนั้นจึงแพร่กระจายไปยังองค์ประกอบถัดๆ ไปจนถึงองค์ประกอบสุดท้าย ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะออกแบบมาให้ใช้งานได้ตลอดช่วงความถี่ที่กำหนด ประโยชน์ในการใช้งานก็คือ สายอากาศชนิดนี้จะแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่คงที่ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน เช่น ค่าความต้านทานในการแพร่กระจายคลื่น, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง, อัตราการขยาย, และอัตราส่วนโอบหน้าต่อโอบหลัง เป็นต้น ในระบบโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้จะมีองค์ประกอบบางส่วนเท่านั้นที่แอดทิฟ ความถี่ค่าหนึ่งของการใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบของแถวลำดับ (Array) ก็คือจะให้บริเวณแอดทิฟนี้เลื่อนไปตามองค์ประกอบต่างๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใช้งาน

โครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบล็อกมีหลายรูปแบบ เช่น แบบซิกแซก (Zigzag), แบบระนาบ (Planar), แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal), แบบร่อง (Slot), แบบวี (V), และแบบไดโพล (Dipole) แต่รูปแบบที่นิยมใช้กันก็คือแบบรายคาบล็อกแถวลำดับไดโพล (Log - Periodic Dipole Array Antenna)



(ก) Bow – tie Antenna

(ข) สายอากาศสายคาบล็อกฟิ้นซ์



(ค) แบบฟิ้นสี่เหลี่ยมคางหมู

(ง) สายอากาศแบบร่องสายคาบล็อกแบบติดฝ้งเรียบ



(จ) สายอากาศสายคาบล็อกแบบแถวลำดับไดโพล

รูปที่ 2.17 สายอากาศแบบสายคาบล็อกชนิดต่างๆ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

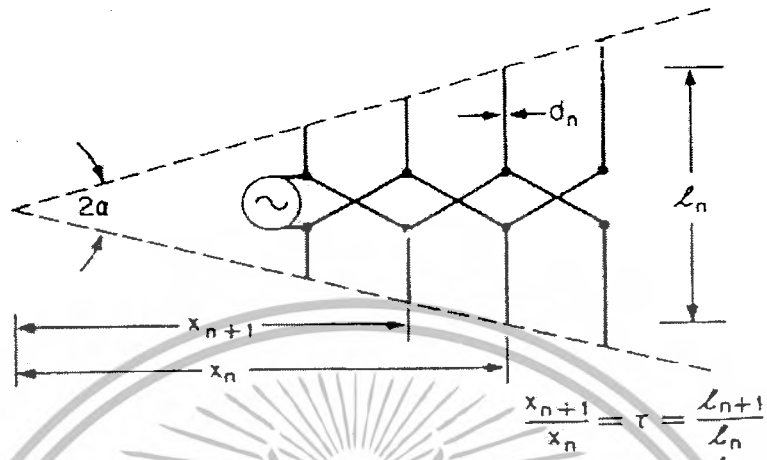
### 2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแบบสายเคเบิล

สายอากาศแบบสายเคเบิล เป็นสายอากาศที่มักนำมาใช้งานในย่านความถี่ VHF (Very High Frequency) เป็นส่วนมากสายอากาศแบบสายเคเบิลเป็นสายอากาศบรอดแบนด์ที่มีความสามารถในเรื่องของอัตราขยายและอินพุทอิมพีแดนซ์ที่คงที่ตลอดแบนด์วิดท์ ซึ่งจะมีค่าอัตราขยายตั้งแต่ 6.5 - 10.5 dB ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนไดโพลที่ยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น แต่ในทางปฏิบัติแล้วส่วนใหญ่อัตราขยายจะถูกจำกัดอยู่ที่ 6.5 - 7.5 dB สายอากาศแบบสายเคเบิลเป็นสายอากาศที่วิวัฒนาการมาจากสายอากาศสไปรอลแบบบรอดแบนด์ จากรูปที่ 2.18 แสดงแบบแผนไดอะแกรมของ LPDA และได้กำหนดมุม  $\alpha$ , ความยาวของไดโพล ( $l_n$ ), เส้นผ่าศูนย์กลางของอิลีเมนต์ ( $d_n$ ), และตำแหน่งของอิลีเมนต์เมื่อเทียบกับมุมเอพิทักซ์ของสามเหลี่ยม ( $x_n$ ),  $\tau$  ที่ถูกแสดงนี้เป็นอัตราส่วนของความยาวไดโพลหรือตำแหน่งของไดโพลต่อความยาวหรือตำแหน่งของไดโพลตัวถัดไปซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า อัตราส่วน  $\tau$  มีค่าคงที่ตลอดความยาวของอาร์เรย์ จากรูปนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ไดโพลทั้งหมดจะถูกเชื่อมเข้ากับสายส่งตรงกลางที่มีการทำให้เฟสตรงข้ามกันระหว่างไดโพล ในทางปฏิบัติสายส่งตรงกลางนี้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือรูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง และรูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

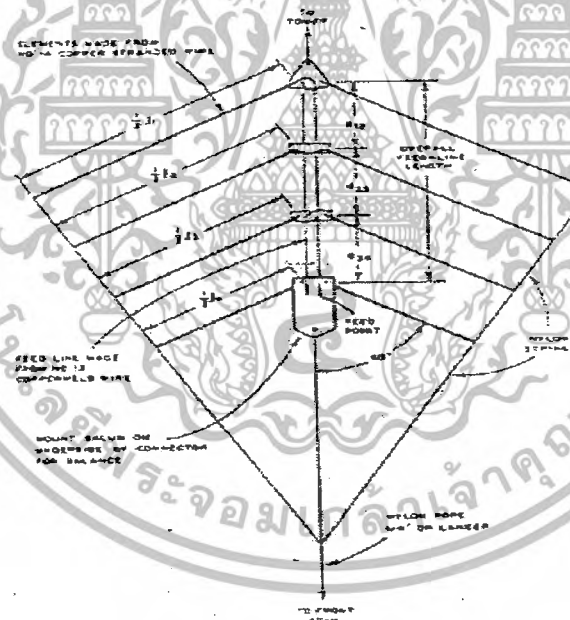
รูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงนี้ จะออกแบบสำหรับอินพุทอิมพีแดนซ์แบบสมมูลขนาด 300  $\Omega$  ซึ่งประกอบด้วยบวมเดี่ยวซึ่งจะต้องเป็นฉนวนจากไดโพลอาร์เรย์ทั้งหมด หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือต้องให้ไดโพลต่อกับบวมที่เป็นฉนวนไฟฟ้า สายส่งที่ใช้ในกรณีที่ว่านี้จะใช้สายส่งแบบเปิดขนาด 2 ตัวนำที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งจะแผ่ไปตามความยาวของสายอากาศด้วยการใช้การเชื่อมต่อแบบไขว้สลับจากไดโพลต่อไดโพล เพื่อให้ได้ลักษณะเฟสที่ตรงข้ามกัน รูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงนี้ควรที่จะจำกัดขอบเขตการออกแบบที่มีความถี่ต่ำ (อาทิ ความถี่ในย่าน HF) ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างลวดตัวนำ 2 ตัวของสายมีลักษณะเป็นเศษส่วนของความยาวคลื่นค่าต่ำๆ ตามรูปที่ 2.19 แสดงรายละเอียดโครงสร้างของสายอากาศแบบสายเคเบิลชนิดไดโพล ในรูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงซึ่งรูปแบบเช่นนี้จะสามารถต่อเข้ากับสายทวินลีดได้โดยตรง ณ จุดที่ทำการ แต่ถ้าจะต่อสายโคแอกเชียลขนาด 75  $\Omega$  จะต้องต่อบาลันขนาด 4 : 1 ณ จุดที่ทำการป้อนก่อนที่จะต่อสายโคแอกเชียลลงต่อไป

ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปแบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำนี้ จะออกแบบเพื่อให้มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับ 75  $\Omega$  โดยไม่สมดุล ซึ่งจะประกอบด้วยบวมที่เป็นตัวนำ 2 ตัวมาขนานกัน โดยแผ่ออกไปตามความยาวของสายอากาศ เพื่อนำมาทำเป็นสายส่งตัวนำ 2 ตัวที่มีขนาดอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งสามารถทำให้เกิดเฟสตรงข้ามกันจากไดโพลตัวหนึ่ง ไปยังอีกตัวหนึ่งได้ด้วยการสลับการต่อไดโพลไปตามสายส่งที่เป็นบวม 2 ตัว สายป้อนแบบสายโคแอกเชียลอาจจะสอดเข้าไปภายในบวมอันหนึ่ง

และเชื่อมต่อเข้ากับปลายของไดโพลสั้นของอาร์เรย์ โดยลักษณะโครงสร้างนี้ อาร์เรย์จะแสดงตัว เป็นบาลันตัวหนึ่ง



รูปที่ 2.18 สายอากาศแบบร่ายคาบสื่อชนิดไดโพล [18]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศแบบร่ายคาบสื่อชนิดไดโพล ในรูปแบบที่ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูง [18]

จากโครงข่ายของสายอากาศ อัตราส่วนของครึ่งความยาวคลื่นของไดโพลต่อรัศมีของไดโพล ซึ่งจะกำหนดค่าเป็น  $h/a$  และอัตราส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับค่าคาแรกเตอร์รีสติกของตัวฟีดเดอเรอร์ ซึ่งกำหนดเป็นค่า  $Z_0$  สายอากาศอาจจะถูกพิจารณาว่าเป็นคาสเคดของเซตหลายๆ เซตซึ่ง

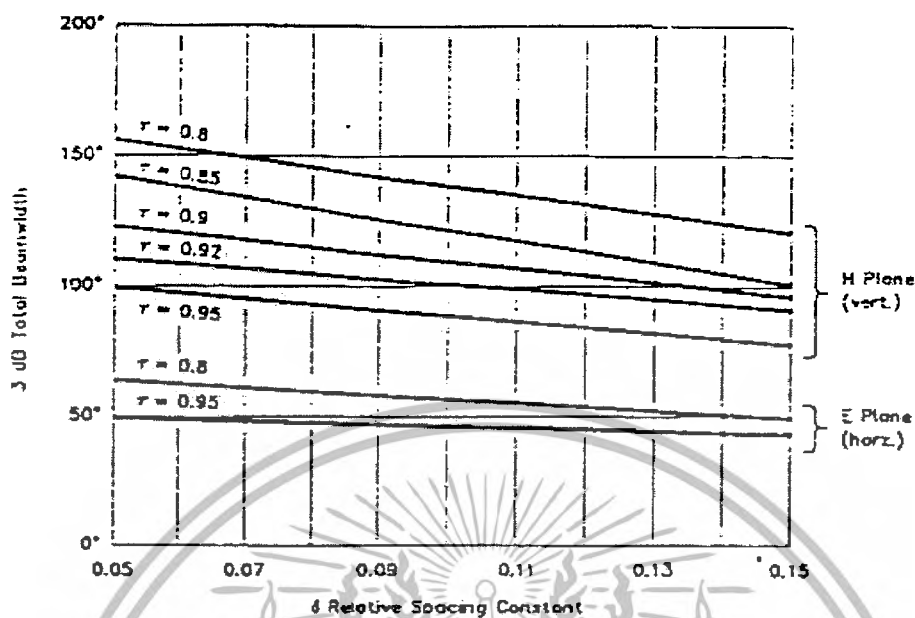
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยส่วนของสายส่งซึ่งถูกโหลดในลักษณะขนาน ณ จุดศูนย์กลางด้วยอิมพีแดนซ์ของไดโพล (เกี่ยวข้องกับการคัปปลิงระหว่างไดโพล) กรณีที่ค่าของ  $\alpha$  มีค่าน้อย และค่าของ  $\tau$  มีค่ามาก จะมีคลื่นซึ่งจำเป็นต้องเดินทางในลักษณะออกห่างจากแกนเนอเรเตอร์ไปทางซ้าย บริเวณที่เราเรียกว่าบริเวณสายส่งของสายอากาศนั้น จะเป็นส่วนแรกที่มีความยาวของไดโพลจะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เนื่องจากบริเวณนี้จะเกิดการกลับเฟสกันระหว่างไดโพลและระยะห่างที่มีค่าน้อย ไดโพลที่ถูกเฟสในลักษณะนี้จะแพร่กระจายคลื่นในบริเวณที่ไม่อาจเห็นได้ ซึ่งหมายความว่าเกิดการยับยั้งการแพร่กระจายซึ่งกันและกัน จึงแทบจะไม่เกิดการแพร่กระจายคลื่น บริเวณแอกทิฟ (บริเวณของอิมพีแดนซ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของไดโพลในลักษณะที่เสริมกัน) ณ บริเวณแรกจะเกิดขึ้น มีไดโพลมีขนาดเกือบครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น การแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้นในทิศทางแบบแบคไฟร์ (ไปทางซ้าย) เนื่องมาจากการกลับเฟสตรงข้ามระหว่างไดโพล ถ้าไม่เกิดการกลับเฟส การแพร่กระจายคลื่นจะเกิดในทิศทางแบบเอนไฟร์ (ไปทางขวา) ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าส่วนของอาร์เรย์จะใหญ่ขึ้น และจะสร้างแพทเทิร์นในลักษณะรูปทรงหอยแครง และเกิดพฤติกรรมของอิมพีแดนซ์ที่ไม่แน่นอนซึ่งเรียกว่า ปราคฏการณ์แบบจบบ และจะสามารถสังเกตได้หลายครั้ง

การลดทอนตลอดบริเวณแอกทิฟ เกิดจากการแพร่กระจายคลื่นและการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสะท้อน (Reflection loss) ซึ่งเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของค่า  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $Z_0$ , และค่า  $h/a$  การต่อโหลดในลักษณะขนาน (หรือการลดทอน) ของสายอันเนื่องมาจากไดโพลที่เกิดจาเรโซแนนซ์จะเพิ่มขึ้นตามค่าอิมพีแดนซ์ของตัวพีคเตอร์และค่าแบนด์วิดท์ ตลอดที่ไดโพลได้ทำการโหลดสาย ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่า  $Q$  ของไดโพล โดยที่เพิ่มขึ้นตามค่าของ  $h/a$  การลดทอนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่  $\tau$  เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของ  $\sigma$  ไม่ควรต่ำมาก การลดทอนตลอดบริเวณแอกทิฟไม่ควรเกิน 20 dB เพื่อให้ปราคฏการณ์แบบจบบมีค่าน้อยๆ พลังงานที่ผ่านบริเวณแอกทิฟแพร่กระจายขยายไปบริเวณไดโพลมีความยาวระหว่าง  $\lambda/2$  และ  $3\lambda/2$  แต่บริเวณแอกทิฟแห่งที่สองจะมีอิทธิพลเหนือกว่า ซึ่งไดโพลบริเวณนี้จะมีมีความยาว  $3\lambda/2$  ทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นจะขึ้นอยู่กัค่า  $\tau$  และ  $\sigma$  และมักสร้างแบบรูปในแบบอิสระจากความถี่อยู่เสมอๆ ถ้าความถี่ที่ไดโพลตัวที่ยาวที่สุดยังต่ำกว่าความยาว  $3\lambda/2$  แล้ว จะทำให้สะท้อนพลังงานกลับ (เว้นแต่จะมีการต่อความต้านทานที่ปลายของสายอากาศ) และจะแพร่กระจายคลื่นในบริเวณแอกทิฟไปในทิศทางแบบแบคไฟร์ ซึ่งจะไปทำให้เกิดโลบหลังในแพทเทิร์นของสายอากาศ

สภาพจะจกทิศทางของสายอากาศจะเพิ่มตามความยาวของบริเวณแอกทิฟ ซึ่งจะเพิ่มตามค่า  $\tau$  ในขณะที่ค่า  $\sigma$  ยังคงที่อยู่ (ในขณะที่ค่า  $\alpha$  ลดลงมา) เนื่องจากว่ามีไดโพลมากกว่าที่มีความยาวเท่ากับ  $\lambda/2$  ความยาวของบริเวณแอกทิฟเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของ  $Z_0$  ลดลง เนื่องจากการลดลงของการลดทอนต่อเซลล์ บีมีวอร์ดของระนาบ E และระนาบ H จะเปลี่ยนไปตามค่าของ  $\alpha$  โดยขึ้นอยู่กับค่าของ  $\tau$  และ  $\sigma$  ตามรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



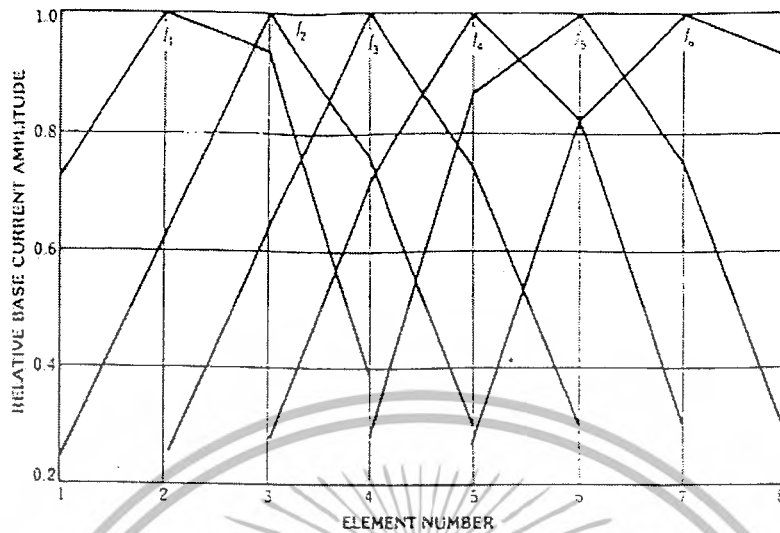
รูปที่ 2.20 ระนาบ E และระนาบ H ต่อค่าฮาล์ฟเพาเวอร์บีมิวริช [19]

เนื่องจากความกว้างลำในระนาบ E มักจะถูกกำหนดด้วยแบบรูปของโคโพลและมีค่าโดยประมาณ  $60^\circ$  ส่วนความกว้างลำในระนาบ H อาจจะถูกกำหนดได้จากสูตรความกว้างลำในกรณีของค่าสภาพเจาะจงทิศทาง นั่นคือมีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{41,253}{(BW_E * BW_H)} \quad (2.34)$$

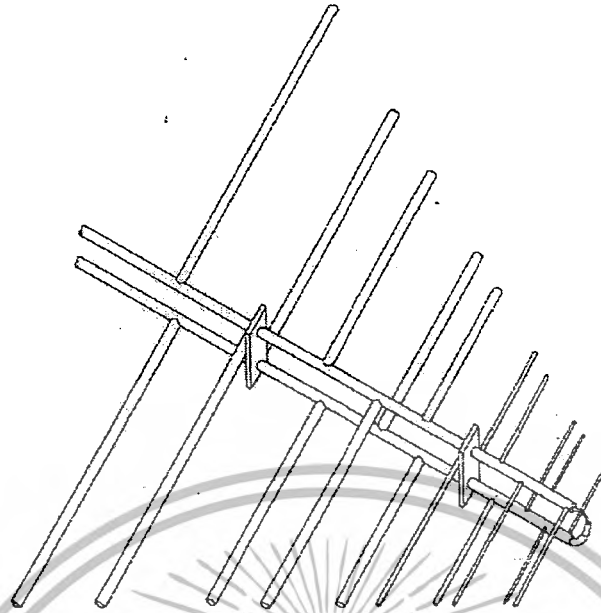
บริเวณแอกทิฟหมายถึงบริเวณที่โคโพลจำนวนหนึ่งมีปริมาณกระแสสูงสุดซึ่งเป็นโคโพลที่ใกล้จะเกิดเรโซแนนซ์ ส่วนโคโพลนอกบริเวณแอกทิฟนี้ แอมพลิจูดของกระแสจะมีค่าต่ำมากจนอาจละทิ้งได้ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป บริเวณแอกทิฟนี้จะเคลื่อนตัวไปตามแกนอาร์เรย์ ในลักษณะที่ทำให้ขนาดของบริเวณแอกทิฟในรูปของความยาวคลื่นยังคงมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงที่สุด จากเหตุผลดังกล่าว แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นจึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงหรือมีผลกระทบมากนักจากการที่ความถี่เปลี่ยนไป ตามรูปที่ 2.21 แสดงแอมพลิจูดสัมพัทธ์ของกระแสอินพุทที่มีความถี่ต่างๆ หลายความถี่ ซึ่งอธิบายให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของบริเวณแอกทิฟ แพทเทิร์นจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อบริเวณแอกทิฟเข้าใกล้กับจุดปลายทั้งสองในลักษณะของจุดโคจุดหนึ่งเพียงจุดเดียว แบนด์ของแพทเทิร์นแบบอิสระจากความถี่จะมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนของความยาวของโคโพลที่ยาวที่สุดต่อสั้นที่สุด อัตราส่วนนี้จะเรียกว่า แบนด์วิดท์ของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

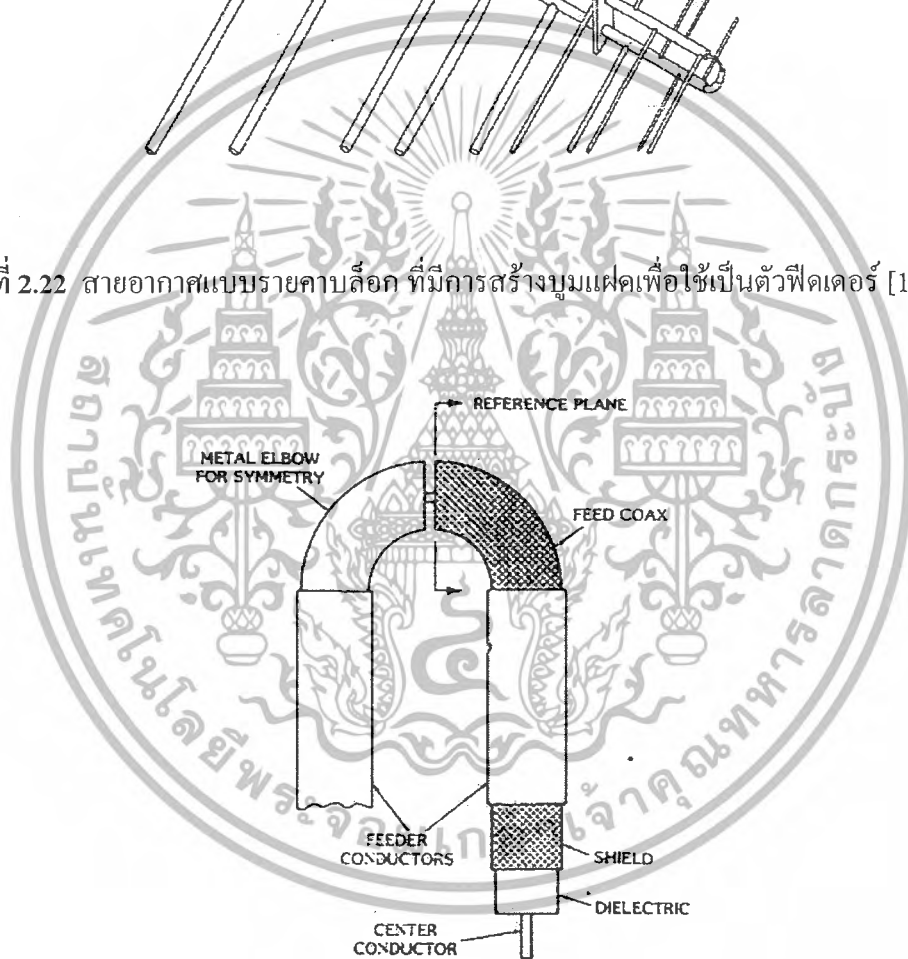


รูปที่ 2.21 แอมพลิจูดสัมพัทธ์ของกระแสฐานในบริเวณแอคทิฟต่อจำนวนอีลิเมนต์ [19]

การไขว้สลับกันของตัวนำในแนวการป้อนเป็นสิ่งจำเป็นต่อประสิทธิภาพความเป็นอิสระจากความถี่ของสายอากาศแบบสายคาบถ้อยชนิดไดโพล วิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดการไขว้สลับกันขึ้น และในขณะเดียวกันยังเป็นตัวต้านทานให้กับไดโพล นั่นก็คือใช้การสร้างสายอากาศแบบบวมแผ่สำหรับใช้เป็นตัวพีคเตอร์ ตามที่แสดงในรูป 2.22 นิยามของค่า  $\tau$  ในกรณี LPD จะนำมาซึ่งอัตราส่วนของความยาวของไดโพล 2 ตัว ที่อยู่ใกล้กัน อย่างไรก็ดี เมื่อใช้รูปแบบการสร้างแบบบวมแผ่ แต่ละเซลล์ของสายอากาศแบบสายคาบถ้อยชนิดไดโพลจะมีไดโพลอยู่ 2 ตัว การเปลี่ยนจากการจับแบบสมดุลงของบวมทั้งสอง ไปยังสายเคเบิลแบบโคแอกเซียลที่ไม่สมดุล สามารถทำได้ด้วยการสอดสายเคเบิลผ่านบริเวณภายในของบวมตัวใดตัวหนึ่ง ตามรูปที่ 2.23 สิ่งที่สำคัญก็คือจะต้องคงสภาพความสมมาตรไว้ในรูปแบบของ “Self - balance” ซึ่งก็คือสล็อตของการป้อนจะเกิด ณ บริเวณครึ่งทางระหว่างบวมทั้งสอง อีกนัยหนึ่งก็คือ คาร์เรอแคแดนซ์ในลักษณะกลุ่มก่อนจะถูกนำมาไว้ ณ จุดที่ทำการป้อนและจะทำให้เกิดการหมุนของค่าอิมพีแดนซ์ตามแนวจุดออกนอกแกนจำนวนจริงของสมิทชาร์ต



รูปที่ 2.22 สายอากาศแบบรายคาบลิ้น ที่มีการสร้างมุมแผ่เพื่อใช้เป็นตัวฟีดเดอร์ [19]



รูปที่ 2.23 รายละเอียดของจุดที่ทำการป้อนแบบสมมาตร [19]

### 2.3.2 การป้อนสัญญาณแก่สายอากาศแบบรายคาบลิ้นชนิดไดโพล

วิธีการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศทำได้ค่อนข้างจะง่าย ตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 แต่ละอะลิเมนต์จะใช้ตัวฟีดเดอร์แบบสมมาตรในการป้อน และจะป้อนสัญญาณโดยมีการเลื่อนเฟสไป  $180^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยการต่อสลับอลิเมนต์กัน ในหัวข้อนี้ คำว่าตัวพีคเตอร์ของสายอากาศจะให้คำจำกัดความคือ สายที่ทำการเชื่อมโยงแต่ละอลิเมนต์ สายป้อนสัญญาณจะเป็นสายที่อยู่ระหว่างสายอากาศกับสายส่ง

ค่าความต้านทานอินพุทของสายอากาศแบบรายคาบสี่อักษนิคไดโพล,  $R_0$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติที่เป็นพรีโอดิกขึ้น ขอบเขตของความต้านทาน ณ จุดที่ทำการป้อนจะขึ้นอยู่กับ ค่าคาแรกเทอร์ริสติกอิมพีแดนซ์,  $Z_0$  ของตัวพีคเตอร์ของสายอากาศ ค่า  $R_0$  อาจจะเลือกให้อยู่กับที่บางค่าได้ โดยการเลือกค่า  $Z_0$  นั่นคือ โดยการเลือกขนาดของตัวนำและระยะห่างของตัวนำที่เป็นตัวพีคเตอร์ของสายอากาศ องค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อค่า  $R_0$  ก็คือค่าคาแรกเทอร์ริสติกอิมพีแดนซ์โดยเฉลี่ยของไดโพลตัวหนึ่ง,  $Z_a$  และองค์ประกอบของค่าระยะห่างโดยเฉลี่ย,  $\sigma$  การประมาณค่าความสัมพันธ์จะเป็นไปตามสมการ

$$R_0 = \frac{Z_0}{\sqrt{1 + Z_0 + \sigma Z_a}} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $R_0$  = ระดับความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นโดยเฉลี่ยของอินพุทอิมพีแดนซ์  
 $Z_0$  = ค่าคาแรกเทอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ของพีคเตอร์สายอากาศ  
 $Z_a$  = ค่าคาแรกเทอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ของไดโพลหนึ่งตัวโดยเฉลี่ย  
 $= 120 [\ln(l_n / dia_n) - 2.25]$   
 $\sigma$  = องค์ประกอบของระยะห่างโดยเฉลี่ย

ถ้าอลิเมนต์ทั้งหมดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเหมือนกันแล้ว อัตราส่วน  $l / dia$  ของอลิเมนต์จะเพิ่มขึ้นตามความยาวของอาร์เรย์ ในทางอุดมคติแล้ว อัตราส่วนนี้ควรจะมีค่าคงที่ แต่ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพในเรื่องของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบรายคาบสี่อักษนิคไดโพลแบบย่านความถี่เดียวจะไม่ลดลงไป ถ้าอลิเมนต์ทั้งหมดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันหมด แต่ในการทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำที่สุด ในกรณีการออกแบบในหลายย่านความถี่นั้นสายอากาศแบบรายคาบสี่อักษนิคไดโพล อาจจะต้องสร้างโดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางของอลิเมนต์เพิ่มขึ้นตามลำดับจากด้านหน้าไปด้านหลังของอาร์เรย์ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ตามโครงสร้างสำหรับอลิเมนต์ประเภทพวงตัวเอง คือ ตัวนำที่ใหญ่ขึ้นจะอยู่ ณ ตำแหน่งอลิเมนต์ที่ยาวขึ้น

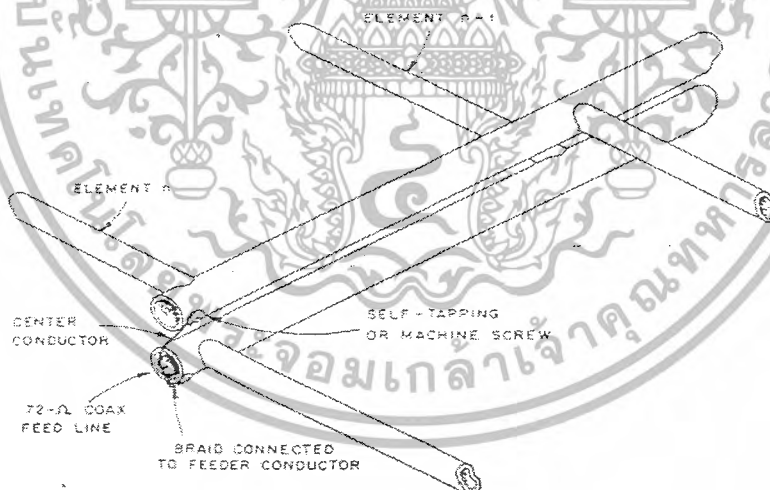
ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะพรีโอดิกกับความถี่ ค่าโดยเฉลี่ยของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง จะขึ้นอยู่กับค่า  $R_0$  ซึ่งมีค่าต่ำสุดโดยประมาณเท่ากับ 1.1:1 ที่ค่า  $\sigma_{op}$  และจะมีค่าเท่ากับ 1.8:1 ที่ค่า  $\sigma = 0.05$  ในกรณีอื่นการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งในลักษณะพรีโอดิก (พร้อมกับค่าความถี่เปลี่ยนแปลง) จะสวิงตัวอยู่เหนือขอบเขตที่กว้างขึ้นของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยมีค่าของ  $\sigma$  ที่ต่ำลง ขอบเขตของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เหล่านี้สามารถที่จะยอมรับค่าได้เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สายป้อนสัญญาณที่เป็นสายโคแอกเซียลขนาดมาตรฐาน 52  $\Omega$  และ 72  $\Omega$  อย่างไม่ก็ตาม สามารถที่จะทำให้เกิดการแมตซ์ที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1:1 ได้ที่ปลายของเครื่องส่ง โดยใช้ทรานสแมตซ์แบบโคแอก - ต่อ - โคแอก ทรานสแมตซ์จะทำให้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำของเครื่องส่งเห็นว่ามิโหลดขนาด 52  $\Omega$  ที่ความถี่แต่ละค่าภายในย่านความถี่ผ่านของอาร์เรย์ ทรานสแมตซ์จะยังกำจัดการแพร่กระจายคลื่นฮาร์โมนิกที่อาจเกิดขึ้นได้ อันเนื่องมาจากธรรมชาติของการที่อิสระจากความถี่ของอาร์เรย์

$R_0$  ควรเลือกใช้กับบาลันที่เจาะจงและคุณสมบัติของสายป้อนสัญญาณที่เจาะจงด้วย กรณีของอาร์เรย์ในย่าน HF ค่า  $R_0$  เท่ากับ 208  $\Omega$  จะสามารถใช้งานได้ดีกับบาลันขนาด 4:1 และกับสายโคแอกเซียลขนาด 52  $\Omega$  การที่จะป้อนด้วยสายโคแอกเซียล 52  $\Omega$  โดยตรงนั้น ไม่อาจเป็นไปได้

สำหรับการออกแบบในย่านความถี่ VHF และ UHF ตัวฟีดเดอร์ของสายอากาศอาจจะใช้เป็นบูมได้ด้วย ด้วยเทคนิควิธีนี้ ครึ่งอีลีเมนต์ที่จะถูกพุงด้วยตัวนำที่เป็นท่อของตัวฟีดเดอร์ ซึ่งจะเว้นระยะห่างไว้ใกล้เคียงกัน ถ้า  $R_0$  ที่เลือกมีค่า 72  $\Omega$  จะสามารถป้อนด้วยสายเคเบิลขนาด 72  $\Omega$  ได้โดยตรง จะมีบาลันที่มีประสิทธิภาพเกิดขึ้น ถ้าสอดสายโคแอกเซียลผ่านหนึ่งในตัวนำฟีดเดอร์จากด้านหลังของอาร์เรย์ไปยังจุดที่ทำการป้อน รูปที่ 2.24 แสดงการเตรียมจุดที่ทำการป้อน



รูปที่ 2.24 วิธีการป้อนสัญญาณแก่สายอากาศแบบรายคาบลักษณะไดโพลในกรณีการออกแบบในย่านความถี่ VHF และ UHF [19]

ถ้าเบนคircuitในการออกแบบของอาร์เรย์ค่อนข้างน้อย (ย่านความถี่เดียว) เป็นไปได้ที่เรา จะทำการออกแบบอาร์เรย์ให้มีค่า  $R_0 = 100 \Omega$  และใช้ส่วนที่ทำการแมตซ์แบบคลื่นขนาด 1/4 ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำจากสายโคแอกเซียลไปไว้ระหว่างจุดที่ทำการป้อนกับสายป้อนสัญญาณขนาด  $52 \Omega$  ในบางกรณีเราจะเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางของพีคเตอร์ของอิลีเมนต์ที่ขึ้นอยู่กับการพิจารณาในทางกลระยะห่างของตัวพีคเตอร์ตามที่ต้องการ จะได้จากการคำนวณ

การต่อท้ายที่ตัวพีคเตอร์ด้วย  $Z_0$  ซึ่งเป็นวงจรซึ่งทำการลัดวงจรที่ระยะเท่ากับ  $\lambda_{\max}/8$  หรือต่ำกว่าอิลีเมนต์หมายเลข 1 (ตัวที่ยาวที่สุด) ซึ่งเราจะทำการลัดวงจรที่ปลายอิลีเมนต์หมายเลข 1 ซึ่งจะทำให้อิลีเมนต์ที่ถูกลัดวงจรแสดงตัวเป็นพาสซีฟรีเฟลคเตอร์ ที่ความถี่ต่ำสุด ผู้สร้างบางคนจะระบุว่า  $Z_0$  อาจจะถูกกำจัดไปได้โดยไม่มีผลอะไรต่อผลลัพธ์ที่ได้ สดับอิมพีแดนซ์ที่ทำการเทอร์มินเนชันนี้จะใช้เพื่อค่าอัตราส่วน โลบหน้าต่อโlobหลังสำหรับความถี่ต่ำที่สุด ซึ่งควรที่จะปรับความยาวของสดับเพื่อให้ได้ผลออกมาที่ดีที่สุด ซึ่งในบางกรณีควรจะยาวกว่า  $\lambda_{\max}/8$  และในกรณีที่ใช้ย่านความถี่ HF ลวดที่ทำการจัมเพื่อทำการลัดวงจรควรจะมียาว 6 นิ้ว เพื่อใช้เป็น  $Z_0$

เป็นที่สังเกตว่า เราสามารถที่จะเพิ่มค่าอัตราส่วน โlobหน้าต่อโlobหลังที่ความถี่ต่ำสุดได้ด้วยการย้ายพาสซีฟรีเฟลคเตอร์ (อิลีเมนต์หมายเลข 1) ไปไว้ที่ระยะทางเท่ากับ  $0.15 \lambda$  ถึง  $0.25 \lambda$  โดยอยู่ข้างหลังอิลีเมนต์หมายเลข 2 ซึ่งสิ่งเดียวกันนี้ได้นำมาใช้ในกรณีของสายอากาศยาคิพาราซิติกรีเฟลคเตอร์แบบธรรมดา ซึ่งมีผลทำให้เราจำเป็นต้องเพิ่มความยาวของบวมขึ้น อัตราส่วน โlobหน้าต่อโlobหลังจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิลีเมนต์ภายในที่ตัวสั้นกว่านั้นเป็นตัวก่อให้เกิดบริเวณแอกทิฟ และอิลีเมนต์ที่ยาวกว่าจะกลายเป็นตัวรีเฟลคเตอร์ที่เสริมขึ้นมา

## 2.4 สายอากาศแบบหูกกระด้าย (Bow - tie Antenna)

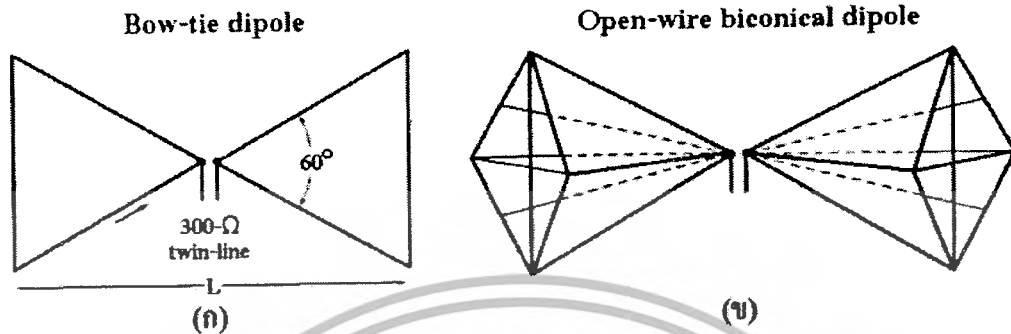
### 2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศแบบหูกกระด้าย

สายอากาศแบบหูกกระด้าย มีรูปแบบมาจากสายอากาศโครงสร้างทรงกรวยคู่ สายอากาศที่เป็นในรูปแบบมีมุม 60 องศา ให้ค่า VSWR มากกว่า 2 เกิน 2 ถึง 1 แบนด์วิดท์  $L = 0.8\lambda$  ที่ ความถี่กลาง (Center frequency) มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับผิวหน้าของทรงกรวย

ผลลัพธ์ของสายอากาศแบบทรงกรวยและสายอากาศแบบสามเหลี่ยม จะถูกออกแบบให้ประชิดกับระนาบสร้างเงา (Ground plane) ซึ่งมีความยาว  $1\lambda$  (หรือความสูง) เมื่อมุมของกรวยเท่ากับ 30, 60 และ 90 องศา แม้จะทำการวัดทรงกรวยที่มีขอบเขตไม่แน่นอน ความแตกต่างที่น่าสนใจในค่าความต้านทานเพราะว่ากรวยทำมุม 60 องศา อัตราขยายของสายอากาศจะเกี่ยวกับกรวยไดโพลที่มีความยาว  $21\lambda$  มาจากความสัมพันธ์  $\lambda/2$  ของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น อัตราขยายของสายอากาศสามารถได้มาจากการวัดแบบรูปคลื่น

แม้ว่าสายอากาศแบบกรวยจะมีความต้านทานที่ไม่แน่นอนกว่าสายอากาศแบบสามเหลี่ยม การออกแบบสายอากาศแบบสามเหลี่ยมแผ่นเรียบก็มีความน่าสนใจ การแสดงการวัดสายอากาศ

ชนิดหุกระต่ายที่มีความยาว 34 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับสายความต้านทานคู่ ที่ระหว่างความถี่ 480 ถึง 900 MHz (UHF – TV ช่อง 15 ถึง 83) แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 สายอากาศแบบหุกระต่าย แบบแผ่น (ก) และสายอากาศไดโพล โครงสร้างกรวยคู่แบบสายเปิด (ข)

สายอากาศแบบหุกระต่าย เป็นส่วนประกอบสำหรับการสื่อสาร UHF (Ultra high frequency) ของโทรทัศน์ มันจึงถูกใช้เป็นสายอากาศรับสัญญาณ โดยต่อเข้ากับสายกริด (Grid) และข้างหลังต่อเข้ากับระนาบสร้างเงา เพื่อลดโลบหลัง (การสะท้อนของคลื่น)

## 2.5 เทคโนโลยีของการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 2.5.1 ประวัติความเป็นมาของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wideband ; UWB)

ระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง หรือที่เรียกกันว่า UWB นั้น ไม่ได้เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในโครงการที่เป็นความลับของกองทัพสหรัฐฯ ในช่วงระหว่างปี 1960 - 1990 ซึ่งพบว่าเทคโนโลยี UWB จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับการสื่อสารของเรดาร์และการติดต่อสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูง คุณสมบัติข้อหนึ่งของระบบการสื่อสารประเภทนี้ที่มีการใช้แบนด์วิดท์ในระบบการสื่อสารที่มากทำให้สามารถได้รับข้อมูลที่มีความแม่นยำในด้านตำแหน่งของวัตถุที่เที่ยงตรงมาก จนกระทั่งปัจจุบันได้เริ่มนำเอาเทคโนโลยีนี้มาใช้งานในระบบการสื่อสารมากขึ้น อันเนื่องมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีการตัดต่อความเร็วสูง (High-speed switching) ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ในระบบการสื่อสารแบบมัลติมีเดีย หรือระบบการสื่อสารที่ต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง โดยที่เทคโนโลยีนี้จะมี ความแตกต่างจากเทคโนโลยีการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น การสื่อสารแบบแถบแคบ และการสื่อสารแบบแถบกว้าง อยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- UWB นั้นมีการใช้แบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณมากกว่า 25% ของความถี่กลาง โดยที่การหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.36)

$$BW = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \times 100\% \quad (2.36)$$

เมื่อ  $f_H$  = ค่าขอบความถี่บนของระบบการสื่อสาร  
 $f_L$  = ค่าขอบความถี่ล่างของระบบการสื่อสาร

UWB นี้จะกำหนดแบนด์วิดท์ของระบบได้จากช่วงห่างระหว่างความถี่บน และความถี่ล่างของระบบ โดยที่ค่าของความถี่ทั้ง 2 นี้จะกำหนดได้จากความถี่ที่ให้ระดับกำลังงานของสัญญาณต่ำกว่าระดับกำลังงานสูงสุด 10 dB ซึ่งเป็นระดับของกำลังสัญญาณรบกวนพื้น (Noise floor) ของระบบการสื่อสารประเภทอื่น

- UWB เป็นระบบการสื่อสารที่ไม่ต้องมีการมอดูเลตสัญญาณพาห้เข้ากับสัญญาณข้อมูลก่อนทำการส่งข่าวสาร ดังนั้นในภาคส่งของ UWB จึงไม่ต้องใช้อุปกรณ์ประเภทการมอดูเลตความถี่ (Frequency modulation) และเครื่องส่งที่มีกำลังมาก จึงเป็นการลดต้นทุนของระบบการสื่อสาร

ความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารของ UWB ที่ทาง FCC ได้อนุญาตให้ใช้ในระบบการสื่อสารนี้จะอยู่ในช่วง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และจากการที่ช่วงความถี่ที่ทาง FCC กำหนดให้ใช้มีขนาดที่กว้างมาก ดังนั้น UWB จึงสามารถส่งผ่านข้อมูลข่าวสารในระบบการสื่อสารได้เป็นจำนวนมาก โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความจุของระบบการสื่อสารกับแบนด์วิดท์ที่ใช้ในระบบการสื่อสารนี้แสดงได้ดังสมการที่ (2.37)

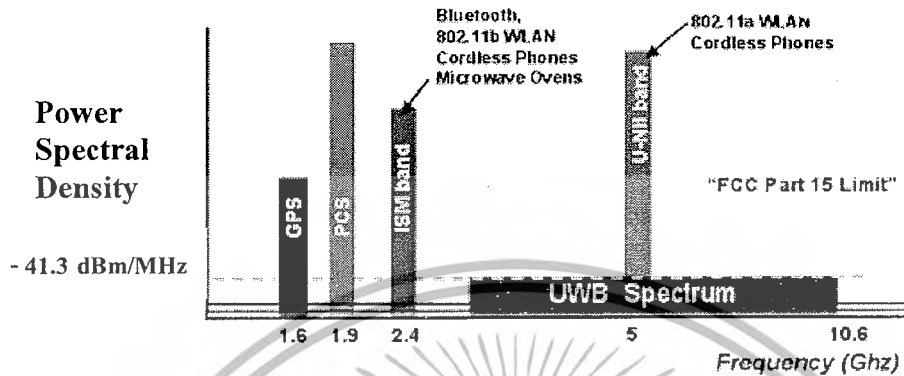
$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.37)$$

เมื่อ  $C$  = ความจุของช่องสัญญาณ (Channel Capacity) มีหน่วยเป็น bps  
 $B$  = แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีหน่วยเป็น Hz  
 $\frac{S}{N}$  = อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน

UWB เป็นระบบการสื่อสารที่มีแบนด์วิดท์ของระบบที่กว้างมาก และได้ไปทับซ้อนกับระบบการสื่อสารที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ระบบเครือข่ายไร้สายท้องถิ่น เป็นต้น ดังนั้นทาง FCC จึงได้มีการกำหนดกำลังงานของระบบที่แพร่ออกมาในช่องสัญญาณของระบบการสื่อสารประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ไว้ที่ระดับ  $-41.3$  dBm/MHz ซึ่งเป็นระดับของกำลังงานของสัญญาณรบกวน โดยในรูปที่ 2.27 แสดงระดับกำลังงานและช่องความถี่ของ UWB เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารอื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.26 ความหนาแน่นกำลังงานเชิงสเปกตรัมและย่านความถี่ของ UWB เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน [20]

จากรูปที่ 2.26 จะพบว่าระดับกำลังงานของ UWB จะอยู่ในระดับที่ต่ำ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารในปัจจุบัน ดังนั้นสัญญาณของ UWB จึงไม่ไปรบกวนกับสัญญาณของระบบการสื่อสารเดิม ซึ่งเป็นเหตุให้สามารถนำเอา UWB ไปใช้งานในทันที มีระบบการสื่อสารเดิมใช้อยู่ได้และยังแสดงให้เห็นระดับความหนาแน่นแถบกำลังในระบบแถบกว้างยิ่ง โดยเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ

### 2.5.2 การนำเทคโนโลยี UWB มาประยุกต์ใช้งาน

เทคโนโลยี UWB คือเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่ใช้แถบความถี่ในช่วงตั้งแต่ความถี่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และมีอัตราการส่งข้อมูลมากที่สุดเท่ากับ 110 Mbps ภายในรัศมี 10 เมตร และ 480 Mbps ภายในรัศมี 2 เมตร จะเห็นได้ว่า UWB สามารถให้อัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก และในการใช้งานจริงเราสามารถนำ UWB มาประยุกต์ใช้งานได้ 2 โหมด เมื่อเราแบ่งตามอัตราการส่งข้อมูล คือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลสูง หมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลเกินกว่า 100 Mbps ในระยะใกล้ อีกโหมด คือ โหมดอัตราการส่งข้อมูลต่ำและค้นหาตำแหน่งหมายถึง มีอัตราการส่งข้อมูลลดลงเพื่อเพิ่มระยะการสื่อสารไร้สาย สามารถใช้บอกตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำเพื่อว่าในอนาคตเราสามารถนำเทคโนโลยี UWB มาประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ ดังนั้นจึงแบ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมและในการบริการเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.1 โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง

โครงข่ายส่วนบุคคลไร้สายความเร็วสูง คือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายปานกลางมีอัตราการส่งข้อมูลที่ความเร็ว 100-150 Mbps ภายในระยะ 1 ถึง 10 เมตร สถาปัตยกรรมหลักที่ใช้ในการสื่อสารเป็นแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer) และใช้ รีเลย์/บริดจ์ (Relay/ Bridge) ในการเชื่อมโยงกับโครงข่ายภายนอก ซึ่งจะเป็นแบบไร้สาย หรือใช้สายเคเบิลก็ได้

### 2.5.2.2 การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย

การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สาย (WEIL) เป็นการขยายแนวคิดเพิ่มเติมจากการส่งสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง (HDR) ให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก (1Gbps, 2.5 Gbps) ซึ่งการเชื่อมโยงไร้สายแบบนี้จะสามารถทำได้ภายในระยะสั้นมาก หรือภายในรัศมี 1-2 เมตร การเชื่อมโยงอินเทอร์เน็ตไร้สายเกิดขึ้นได้มาจากความต้องการของบริษัทผู้ผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ต้องการให้การเชื่อมโยงโครงข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้สายเคเบิล เปลี่ยนไปใช้แบบไร้สายแทน และจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต้องการให้การส่ง สัญญาณวิดีโอแบบไร้สายระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับฉากร LCD มีคุณภาพสูง

### 2.5.2.3 โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะ

โครงข่ายไร้สายอัจฉริยะคือโครงข่ายที่มีความหนาแน่นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายสูง ที่อยู่เป็นพื้นที่ภายในหรือพื้นที่สำนักงานทั่วไป ภายในระยะ 30 เมตร

### 2.5.2.4 โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์

โครงข่ายภายนอกแบบเพียร์ทูเพียร์ เป็นโครงข่ายสำหรับอุปกรณ์สื่อสาร UWB ที่อยู่บริเวณภายนอก เป็นไปตามความต้องการของตลาดการให้บริการที่จะเกิดขึ้นมาใหม่ สำหรับเครื่อง PDA ที่จะส่งข้อมูลหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันและอย่างร้านให้บริการข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูง สำหรับดาวน์โหลดข้อความหนังสือพิมพ์ รูปภาพ การให้บริการเช่าม้วนเทป VDO, VCD, DVD เป็นต้น

## 2.5.3 ข้อดีข้อเสียของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

### 2.5.3.1 ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

- มีความกว้างลำ ของสัญญาณมากกว่าเทคนิคอื่นๆ เช่น Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ด้วยแบนด์วิธที่กว้างนี้รวมกับความหนาแน่นของสเปกตรัมของกำลังที่มีค่าน้อยทำให้ UWB สามารถใช้ความถี่ร่วมกับระบบอื่นๆ ที่อยู่ในช่วงเดียวกันได้

- การรบกวนจากภายในระบบเองมีค่าน้อยมาก ทำให้สามารถนำระบบที่ใช้ Ultra Wideband จำนวนมากมาใช้ร่วมกันได้ในบริเวณที่กำหนด

- จากการที่ใช้พัลส์ที่มีช่วงแคบ ทำให้ระบบแบบแถบกว้างยิ่งไม่ได้รับผลจาก Multipath มากนักพัลส์ที่สะท้อนกลับนั้นจะไม่เกิดการซ้อนทับกันจึงไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน

- สามารถให้ข้อมูลข่าวสารในด้านระยะทางที่มีความถูกต้องสูง (น้อยกว่า 1 เซนติเมตร) ทำให้สามารถบอกตำแหน่งได้โดยใช้ตัวส่งหลายตัวมาทำงานพร้อมกัน หรือแม้แต่การค้นหาคำแหน่งที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้โดยใช้สายอากาศต่อกันหลายๆ อัน

- มีอัตราการส่งข้อมูลได้สูงกว่าและสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้ได้มากกว่า เพราะวาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งมีแบนด์วิธที่กว้าง และมีการส่งแบบ Pulse ของสัญญาณที่แคบมากจึงทำให้การส่งสัญญาณเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีความสามารถรองรับผู้ใช้ได้จำนวนมาก

- มีการใช้พลังงานน้อยในการส่งสัญญาณ เพราะระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งได้ถูกกำหนดค่ากำลังงานการแพร่กระจายออกของสัญญาณไว้ที่  $-41.3$  dbm/MHz เพื่อไม่ให้สัญญาณไปรบกวนกับระบบของ IEEE 802.11a

- มีความสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี ไม่ว่าจะเป็นกำแพง หรือมนุษย์ เพราะวาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งมีการส่งผ่านช่องสัญญาณที่เป็นลักษณะของ Slow Fading เนื่องจาก มีช่วงแบนด์วิธที่กว้างมาก

- มีราคาถูกลงกว่า เพราะที่วงจรกรับของ UWB ไม่มีวงจร Mixer (VCO, PLL) IF และ Low Noise Amplifier (LNA)

- ยากต่อการขโมยข้อมูล เพราะวาระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งมีการใช้ช่วงความถี่ที่กว้างมาก และช่วงความถี่พัลส์ที่แคบมาก ๆ

### 2.5.3.2 ข้อเสียของระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง

- เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ในการส่ง เนื่องจากการส่งแบบพัลส์ อาจจะเกิดความเพี้ยนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบสัญญาที่ใกล้เคียงกับสัญญารบกวอน อาจจะทำให้เกิดการไม่แมตซ์กัน  
ได้

- อุปกรณ์อาจไม่สามารถใช้งานได้ทั่วโลก เนื่องจากช่วงความถี่ UWB มีความถี่ที่  
กว้าง ทำให้ผู้ผลิตในแต่ละประเทศออกแบบอุปกรณ์ของตนให้สามารถรับความถี่ในช่วงต่างๆ ที่  
แตกต่างกัน ทำให้อุปกรณ์ของประเทศหนึ่ง อาจจะไม่สามารถใช้ในอีกประเทศหนึ่งได้

- เทคโนโลยีการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยังคงไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน  
และยังมีอุปกรณ์หรือโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ ที่มาสนับสนุนระบบยังมีน้อยอยู่ในปัจจุบัน ซึ่ง  
ผู้ผลิตรายต่างๆ ก็กำลังแข่งขันกันพัฒนาอุปกรณ์หรือโปรแกรมประยุกต์ต่าง ๆ เพื่อทำให้เทคโนโลยี  
บริษัทตนเป็นที่ยอมรับในวงกว้าง และเพื่อความสะดวกแก่ผู้ใช้ ดังนั้น อุปกรณ์ของบริษัทต่าง ๆ  
ที่ผลิตมาจะไม่สามารถรองรับอุปกรณ์ของบริษัทหนึ่งได้ จนกว่า เทคโนโลยี จะเป็นรูปแบบ  
เดียวกันทั้งหมดซึ่งคงอาจจะต้องใช้เวลาอีกหลายปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริป

### 3.1 สายอากาศไมโครสตริป

แนวคิดเกี่ยวกับสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป เริ่มขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดย เดสแชมป์ส (Deschamps) ซึ่งเมื่อ 20 ปีก่อน ได้มีการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปขึ้นมา โดยได้ใช้หลักการและเทคนิคของโฟโต้เทค (Photo-tech) โดยจะใช้ทองแดงหรือทองปกคลุมฐานรองไดอิเล็กตริก ตลอดช่วงความยาวของค่าที่ไดอิเล็กตริก เพื่อช่วยให้การดูดความร้อน และคุณสมบัติทางกลศาสตร์ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียสัมพัทธ์ที่จะเกิดขึ้นด้วย สายอากาศอันแรกได้ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดย ฮาวเวล (Howell) และ มุนสัน (Munson) ตั้งแต่นั้นมาก็มีการวิจัยและพัฒนาสายอากาศไมโครสตริปและอาร์เรย์อย่างต่อเนื่อง โดยมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ราคาถูก รูปร่างเป็นแผ่นเรียบ และยังสามารถสร้างอยู่ในวงจรรวม (IC) ข้อดีต่างๆ เหล่านี้จึงได้ถูกนำมาใช้ในสายอากาศไมโครสตริป

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครสตริปประกอบไปด้วย

-แพตช์ (Patch) แผ่นโลหะที่เป็นตัวนำอยู่ชั้นบนสุด ทำหน้าที่เป็นส่วนกระจายคลื่น สามารถออกแบบให้มีรูปร่างต่างๆ ได้

-วัสดุฐานรอง (Substrate) ที่เป็นไดอิเล็กตริกจะกั้นอยู่ระหว่างตัวนำด้านบนที่เป็นส่วนแพร่กระจายคลื่น และระนาบสร้างเงา

-ระนาบสร้างเงา เป็นแผ่นโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์ (Ground plane) ซึ่งจะเป็นส่วนที่รองรับทั้งหมด ซึ่งระนาบสร้างเงา ตามทฤษฎีจะต้องมีขนาดที่ไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะให้ ระนาบสร้างเงามีขนาดอนันต์ได้ ดังนั้น ในการออกแบบจึงไม่มีข้อจำกัดของระนาบสร้างเงา ว่าควรมีขนาดเท่าไร เพียงแต่จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวแพร่กระจายคลื่น

#### 3.1.1 รูปร่างลักษณะต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปจะมีพารามิเตอร์ต่างๆ ทางฟิสิกส์ (Physics) มากกว่าสายอากาศย่านไมโครเวฟทั่วๆ ไป ที่เห็นได้ชัดคือ รูปร่างสายอากาศไมโครสตริปแบบต่างๆ อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

### 3.1.1.1 สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (Microstrip patch antenna; MPA)

ประกอบด้วยแผ่นตัวนำมีรูปทรงทางเรขาคณิตอยู่บนแผ่นวัสดุฐานรอง อีกด้านหนึ่งของไดอิเล็กตริก จะเป็นระนาบสร้างเงา แผ่นตัวนำจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งหาได้จากการคำนวณรูปลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 3.1



(ก) สี่เหลี่ยมจัตุรัส

(ข) สี่เหลี่ยมผืนผ้า

(ค) ใดโพล

(ง) วงกลม

(จ) วงรี



(ฉ) สามเหลี่ยม

(ช) ชิ้นส่วนวงกลม

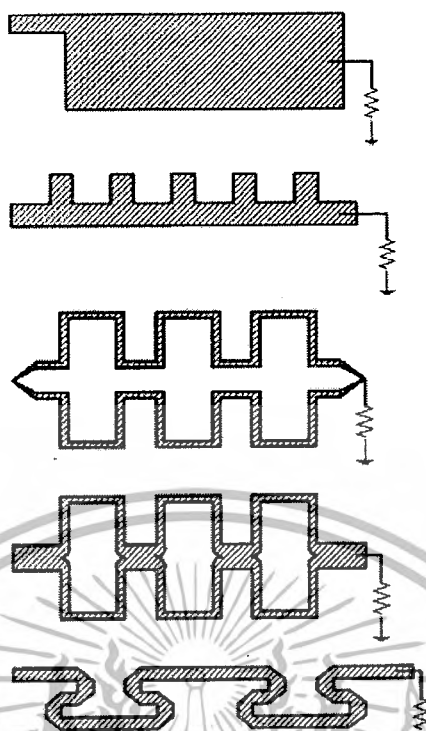
(ซ) วงแหวน

(ฅ) ชิ้นส่วนวงแหวน

รูปที่ 3.1 ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่น (MPA) [13]

### 3.1.1.2 สายอากาศไมโครสตริปแบบ Traveling Wave (MTA)

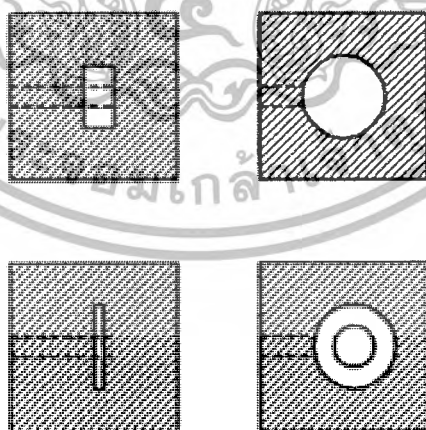
ประกอบด้วยตัวนำลักษณะเป็นคาบ หรือมีความยาวตามเส้น TEM จะต่อกับความต้านทานที่เป็นโหลด (Load) โดยมีรูปร่าง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบ Traveling Wave [6]

### 3.1.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่อง (Slot)

ประกอบด้วยช่องซึ่งต่อกับเส้นไมโครสตริป ช่องนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (กว้างหรือแคบก็ได้), วงกลม หรือวงแหวน ดังรูปที่ 3.3

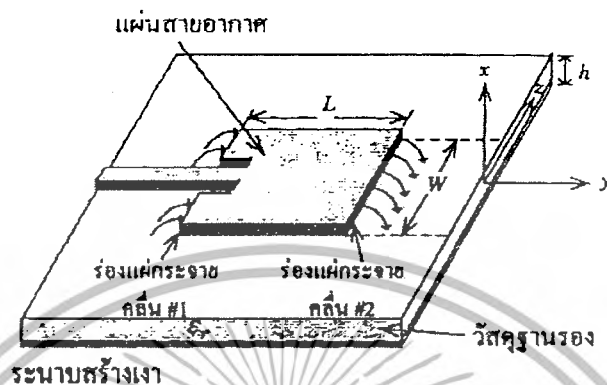


รูปที่ 3.3 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแบบช่อง [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

ลักษณะของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบแผ่นตัวนำที่บางมาก วางอยู่บนวัสดุฐานรอง ส่วนอีกด้านหนึ่งของวัสดุรองฐานจะเป็นระนาบสร้างเงา



(ก) สายอากาศไมโครสตริป



(ข) ด้านข้าง

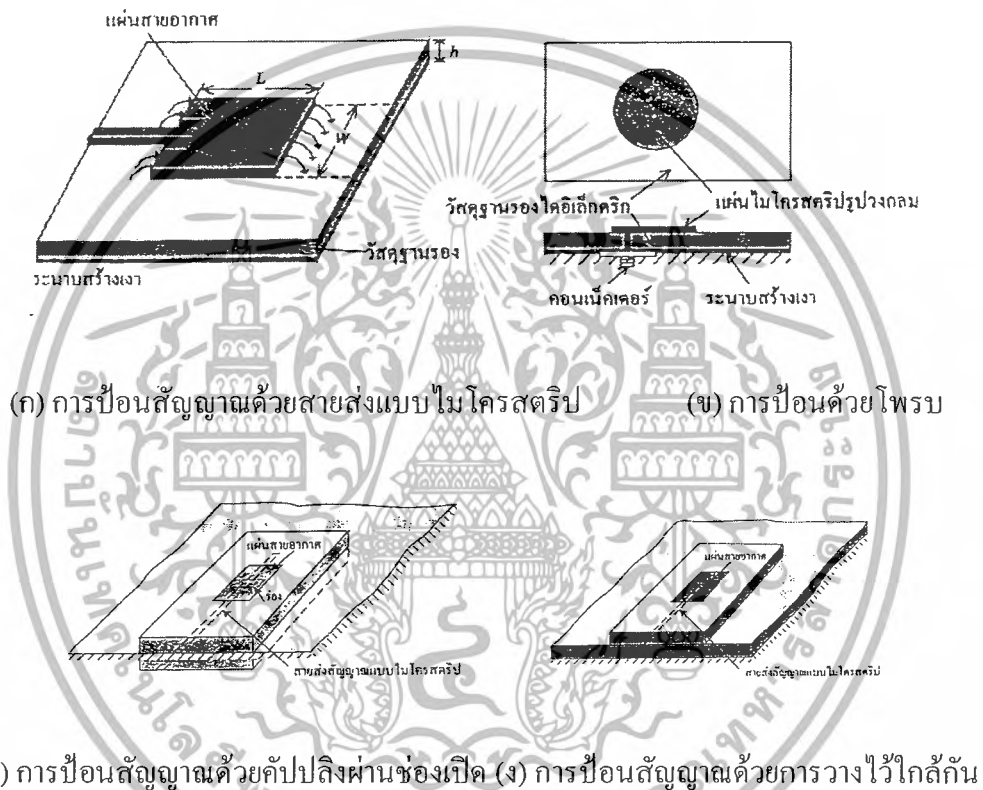
รูปที่ 3.4 ลักษณะสายอากาศไมโครสตริป [13]

วัสดุฐานรองสำหรับนำมาสร้างสายอากาศไมโครสตริปนั้นมีด้วยกันหลายชนิด โดยปกติแล้วสภาพะยอมสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกนั้นจะอยู่ในช่วง 2.2 – 12 และสิ่งที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปคือ ความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ ) การออกแบบโดยใช้สภาพะยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่ำๆ จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพสูง และมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้น แต่ข้อเสียคือ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย สำหรับวัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพะยอมสูงนั้น ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ร่วมกับวงจรถางไมโครเวฟ เนื่องจากต้องการให้ฟริงกิง (Fringing) ของสนามแคบ เพื่อทำให้เกิดการคับปลิง และการแพร่กระจายคลื่นน้อยที่สุด และยังทำให้วงจรมีขนาดเล็กลงอีกด้วย แต่ก็จะทำให้มีการสูญเสียมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพและแบนด์วิดท์ลดลง ดังนั้น สายอากาศไมโครสตริปและวงจรมิโครเวฟ จึงสามารถนำมาใช้ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

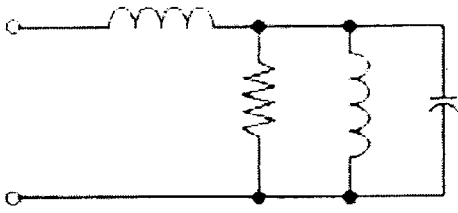
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป

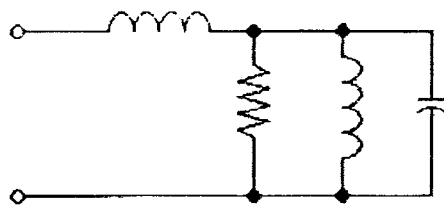
การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมนั้นจะมีด้วยกัน 4 วิธีคือ การป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป, การป้อนสัญญาณโดยใช้สายโคแอกเซียล, การคัปปลิงผ่านช่องเปิด (Aperture) และการคัปปลิงด้วยการวางไว้ใกล้กัน (Proximity) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และวงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณในแต่ละแบบดังแสดงในรูปที่ 3.6 ลักษณะของสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริปจะเป็นแผ่นตัวนำ ซึ่งปกติจะมีความกว้างน้อยกว่าความกว้างของแพตช์มาก



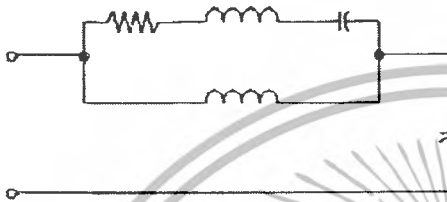
รูปที่ 3.5 การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป [13]



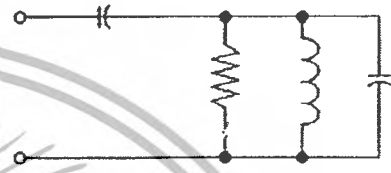
(ก) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป



(ข) โพรบ



(ค) การคับปลิงผ่านช่องเปิด



(ง) การคับปลิงด้วยการวางไว้ใกล้กัน

### รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของการป้อนสัญญาณตามรูปที่ 3.5 [13]

#### 3.1.3.1 การป้อนสัญญาณด้วยสายส่ง

การป้อนสัญญาณด้วยวิธีนี้จะง่ายต่อการสร้างและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยควบคุมตำแหน่งจุดป้อน อีกทั้งยังค่อนข้างง่ายต่อการวิเคราะห์ แต่ถ้าความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดคลื่นผิวมากขึ้น และยังทำให้เกิดการแพร่กระจายปลอมปนจากตัวป้อนสัญญาณอีกด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการป้อนด้วยวิธีนี้จะมีแบนด์วิดท์ประมาณ 2-5%

#### 3.1.3.2 การป้อนสัญญาณด้วยสายโคแอกเซียล

วิธีนี้ตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลจะต่ออยู่กับแพตช์ที่ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น ในขณะที่ตัวนำด้านนอกของสายจะต่ออยู่กับระนาบสร้างเงา การป้อนสัญญาณให้กับสายไมโครสตริปแบบนี้เป็นแบบที่นิยมกันมาก เนื่องจากง่ายต่อการสร้างและแมตซ์อิมพีแดนซ์ และมีการแพร่กระจายปลอมปนน้อย แต่วิธีนี้ยังคงทำให้แบนด์วิดท์แคบและยากต่อการสร้างแบบจำลอง

การป้อนสัญญาณทั้งแบบไมโครสตริปและแบบสายโคแอกเซียล โดยธรรมชาติแล้วจะไม่สมมาตรกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดโหมดอันดับที่สูงกว่า (Higher Order Mode) ทำให้การแพร่กระจายมีโพลาไรซ์ไขว้เกิดขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้จึงต้องอาศัยการป้อนสัญญาณ

ด้วยการคัปปลิงผ่านช่องเปิด ในรูปที่ 3.5 (ค) และ 3.5 (ง) การคัปปลิงผ่านช่องเปิดในรูป 3.5 (ค) เป็นแบบที่สร้างได้ยากที่สุดในทั้ง 4 แบบและยังคงมีแบนด์วิดท์ที่แคบ

### 3.1.3.3 การคัปปลิงผ่านช่องเปิด

การคัปปลิงในลักษณะนี้จะช่วยลดผลการแพร่กระจายปลอมปนได้ ลักษณะโครงสร้างของการคัปปลิงผ่านช่องเปิดนั้นจะประกอบด้วยวัสดุฐานรอง 2 ชั้น ถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบสร้างเงา ด้านล่างของวัสดุฐานรองแผ่นล่างสุดจะเป็นสายป้อนสัญญาณแบบไมโครสตริป ซึ่งพลังงานจะถูกคัปปลิงผ่านร่อง (Slot) ที่อยู่บนระนาบสร้างเงาไปยังตัวแพร่กระจายคลื่น โดยปกติแล้ววัสดุฐานรองด้านล่างจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ส่วนวัสดุฐานรองด้านบนจะเป็นวัสดุที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่า ระนาบสร้างเงาที่แบ่งวัสดุฐานรองทั้งสองออกจากกันนั้น จะช่วยป้องกันส่วนที่แพร่กระจายคลื่นออกจากส่วนป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายปลอมปนและทำให้ได้โฟลาร์เซชันที่บริสุทธิ์ขึ้น โดยทั่วไปแล้ว การแมตซ์อิมพีแดนซ์ทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และควบคุมความยาวของร่อง การคัปปลิงผ่านร่องนี้สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยทฤษฎีของเบธ (Bethe) ซึ่งจะพิจารณาเกี่ยวกับการ คัปปลิงผ่านช่องเปิดเล็กๆ บนระนาบของตัวนำ

### 3.1.3.4 การคัปปลิงด้วยการวางไว้ใกล้กัน

การคัปปลิงโดยการวางไว้ใกล้ๆ กันนี้จะมีแบนด์วิดท์กว้างที่สุด อีกทั้งยังง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีความปลอมปนของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ แต่การสร้างก็ยังสามารถทำได้ยากอยู่

## 3.2 การวิเคราะห์สายอากาศ

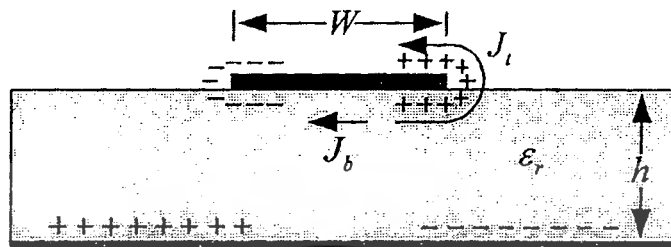
การวิเคราะห์สายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากคือ วิธีแบบจำลองสายส่งสัญญาณ (Transmission line model) แบบจำลองควาวิตี (Cavity model) และการวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์ (MM)

### 3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองควาวิตี

ในการวิเคราะห์สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปด้วยแบบจำลองควาวิตีนั้น โครงสร้างของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป จะถูกพิจารณาว่ามีลักษณะเป็นควาวิตีที่มีสารไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงเปรียบควาวิตีนี้ว่าถูกปิดล้อมด้วยด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าทั้งด้านบนและด้านล่าง ส่วนด้านข้างทุกด้านจะถูกปิดล้อมด้วยผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่มีสภาวะเปิดวงจร แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการพิจารณาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าภายในควิตี ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น อินพุต อิมพีแดนซ์และความถี่รีโซแนนซ์ของสายอากาศได้

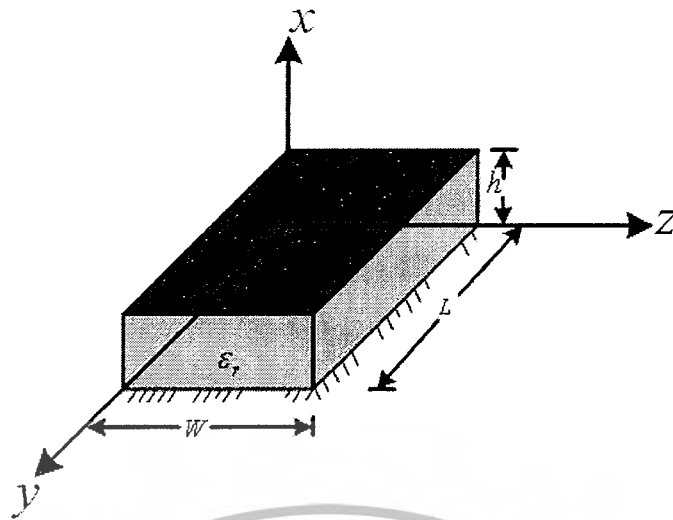


รูปที่ 3.7 การแผ่กระจายประจุและความหนาแน่นของกระแสบนแผ่นสายอากาศไมโครสตริป

[13]

เมื่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปถูกกระตุ้น สนามภายในควิตีจะแผ่กระจายออกไปตามผนังของควิตี ทำให้เกิดประจุแผ่กระจายอยู่บนผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศ รวมถึงบนผิวด้านในค้ำที่เป็นระนาบกรวดด้วย จากรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่ามีประจุเกิดขึ้น 2 ชนิด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดสำหรับประจุที่ต่างชนิดกัน และเกิดแรงผลักรสำหรับประจุที่เป็นชนิดเดียวกันแรงเหล่านี้จะทำให้ประจุเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส  $J_b$  และ  $J_t$  ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.7 การไหลของกระแสนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ด้านบนของแผ่นสายอากาศ ซึ่งทำให้แบบจำลองควิตีของผนังทั้ง 4 ด้านที่สมมติขึ้นนั้น กลายเป็นผิวของตัวนำแม่เหล็กที่สมบูรณ์ โดยสมมติให้แผ่นตัวนำและผนังแม่เหล็กที่ปิดล้อม ควิตีอยู่นี้ไม่มีการสูญเสียพลังงานและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีแต่จำนวนจริงเท่านั้น ตลอดจนควิตีที่มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ภายในนี้ไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้

โครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปนั้น อัตราส่วนความหนาของวัสดุฐานรองต่อความกว้างของแผ่นสายอากาศจะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะปรากฏอยู่ในวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้สายอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงของสนามตามความสูงมีค่าคงที่ จึงทำให้ภายในควิตีนี้มีเพียงสนามในโหมด  $T_M^X$  เท่านั้น



รูปที่ 3.8 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [13]

คุณลักษณะของสนามภายในควาวิตสามารถหาได้โดยอาศัยศักย์เวกเตอร์ (Vector potential) ซึ่งจะพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8 ควาวิตที่เกิดขึ้นจะพิจารณาปริมาตรที่อยู่ภายใต้แผ่นสายอากาศ ซึ่งวัสดุฐานรองจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น  $\epsilon_r$  โดยที่ศักย์เวกเตอร์สามารถหาได้จากสมการคลื่นดังนี้

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (3.1)$$

ซึ่งจะได้ผลเฉลยของสมการในรูปทั่วไปเป็น

$$A_x = \langle A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \rangle \langle A_2 \cos(k_y y) + B_2 \cos(k_y y) \rangle \langle A_3 \cos(k_z z) + B_3 \cos(k_z z) \rangle \quad (3.2)$$

โดยที่  $k_x$ ,  $k_y$  และ  $k_z$  คือหมายเลขคลื่น (Wave number) ตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ การหาคุณลักษณะของสนามภายในควาวิตนี้จะต้องกำหนดขอบเขตของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในควาวิต ซึ่งจะสัมพันธ์กับศักย์เวกเตอร์  $A_x$  ดังนี้

$$\begin{aligned} E_x &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x & H_x &= 0 \\ E_y &= -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} & H_y &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \quad H_z = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

โดยอาศัยเงื่อนไข

$$\begin{aligned} & E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) \\ & = E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \\ & H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0) \\ & = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) = 0 \\ & H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) \\ & = H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) \end{aligned} \quad (3.4)$$

สัญลักษณ์ (') เช่น  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  เพื่อแสดงว่าเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในช่องโคอีเล็กทริก

โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ว่า  $E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  และ  $E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  จะได้ว่า  $B_1 = 0$  และ

$$k_x = \frac{m\pi}{h} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

ในลักษณะคล้ายกัน เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ว่า  $H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = 0) = 0$  และ  $H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z' = W) = 0$  จะได้ว่า  $B_3 = 0$  และ

$$k_x = \frac{p\pi}{h} \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (3.6)$$

และสุดท้าย โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขต  $H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) = 0$  และ  $H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0$  จะได้ว่า  $B_2 = 0$  และ

$$k_y = \frac{n\pi}{h} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่สุดจะได้ว่ารูปแบบของศักย์เวกเตอร์  $A_x$  ภายในควิดี้ คือ

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (3.8)$$

โดยที่  $A_{mnp}$  แทนขนาดของสัมประสิทธิ์ในแต่ละ  $mnp$  โหมด หมายเลขคลื่น  $k_x, k_y, k_z$  จะเท่ากับ

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \left( \frac{m\pi}{h} \right), \quad m = 0, 1, 2, \dots \\ k_y &= \left( \frac{n\pi}{L} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \\ k_z &= \left( \frac{p\pi}{W} \right), \quad p = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} m = n = p \neq 0 \quad (3.9)$$

โดยที่  $m, n, p$  เป็นตัวเลขที่แสดงว่าความกว้าง ความยาว และความสูง อยู่ในแนวแกน  $x, y, z$  ตามลำดับ และมีค่าเป็นจำนวนเท่าของ  $\lambda/2$  นอกจากนี้  $k_x, k_y, k_z$  ยังสามารถทำให้อยู่ในรูป

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left( \frac{m\pi}{h} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 + \left( \frac{p\pi}{W} \right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \epsilon \quad (3.10)$$

ความถี่เรโซแนนซ์ของควิดี้กำหนดได้จาก

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\left( \frac{m\pi}{h} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2 + \left( \frac{p\pi}{W} \right)^2} \quad (3.11)$$

หลังจากนั้นแทนค่าของ  $A_x$  ลงในสมการ  $E_x, E_y, E_z$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_x &= -j \frac{(k^2 - k_x^2)}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \\ E_y &= -j \frac{k_x k_y}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \sin(k_x x') \sin(k_y y') \cos(k_z z') \\ E_z &= -j \frac{k_x k_z}{\omega \mu \epsilon} A_{mnp} \sin(k_x x') \cos(k_y y') \sin(k_z z') \end{aligned} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x = 0$$

$$H_y = -\frac{k_z}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \sin(k_z z')$$

$$H_z = -\frac{k_y}{\mu} A_{mnp} \cos(k_x x') \sin(k_y y') \cos(k_z z')$$

เพื่อหาโหมดหลักที่ความถี่โซแนนท์ต่ำสุด เราจะต้องทราบความถี่โซแนนท์ก่อน โหมดซึ่งมีความถี่โซแนนท์ต่ำที่สุดเราจะให้เป็นโหมดหลัก สำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มี  $h \ll L$  และ  $h \ll W$  ถ้า  $L > W > h$  โหมดซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุด (โหมดหลัก) คือ  $TM_{010}^x$  ซึ่งหาความถี่โซแนนท์ได้จาก

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.13)$$

โดยที่  $v_0$  เป็นความเร็วของแสงในอากาศว่าง แต่ถ้า  $L > W > L/2 > h$  จะเป็นโหมด  $TM_{001}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการ

$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.14)$$

ถ้า  $L > L/2 > W > h$  จะได้เป็นโหมด  $TM_{020}^x$  แทนโหมด  $TM_{001}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการ

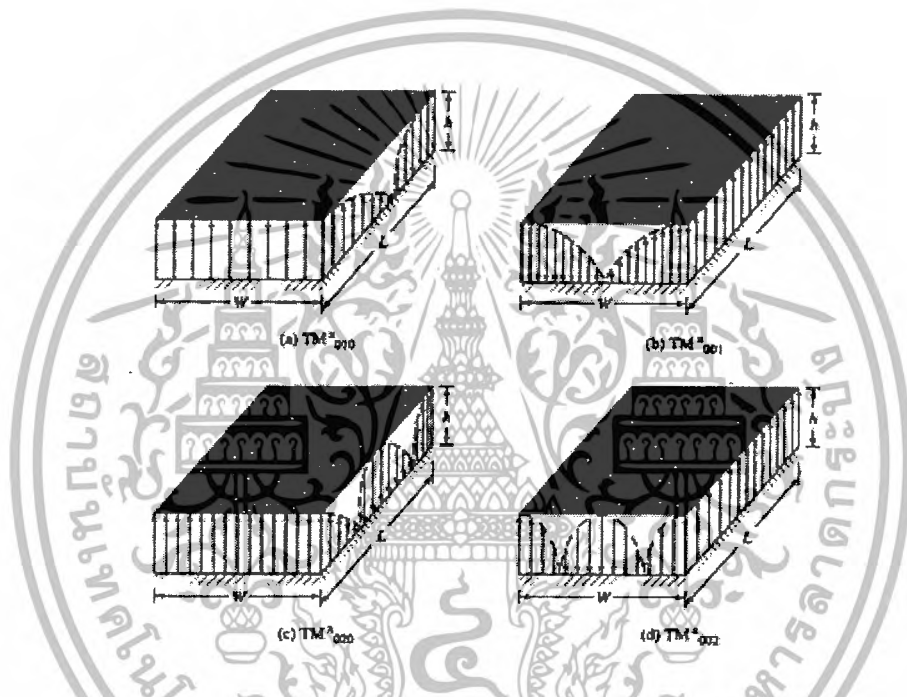
$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.15)$$

ถ้า  $W > L > h$  จะได้โหมดหลักเป็น  $TM_{001}^x$  โดยหาความถี่โซแนนท์ได้จากสมการ 3.14 ขณะที่  $W > W/2 > L > h$  จะเป็นโหมดที่สองหรือโหมด  $TM_{020}^x$  อาศัยสมการ 3.12 การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสตามขอบผนังของควาวิตี้สำหรับโหมด  $TM_{010}^x$ ,  $TM_{001}^x$ ,  $TM_{020}^x$  และ  $TM_{002}^x$  ตามลำดับแสดงดังในรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะสมมติให้ไม่ผลเนื่องจากสนามพริ่งกิงตามขอบของควาวิตี้ ซึ่งไม่ใช่ค่าทั้งหมดแต่เป็นเพียงการสมมติ ซึ่งสมการที่ได้รวมผลของสนามพริ่งกิงนั้นได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ดังสมการ 3.5 สำหรับโหมดหลัก  $TM_{010}^x$

แบบจำลองควาวิตี้จะมองสายอากาศแบบไมโครสตริปว่าเป็น สารไดอิเล็กตริกที่มีผนังสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบปิดอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง ส่วนอีก 4 ด้านที่เหลือ ซึ่งอยู่ด้านข้างจะถูกปิดล้อมด้วยผนังสนามแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณนี้เองที่เป็นตัวการทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่น ดังนั้นการจะหาความหนาแน่นกระแส จะต้องคิดเสมือนว่าสารตัวกลางมีอยู่แต่เฉพาะภายใต้แผ่นตัวนำด้านบนเสมอ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสนามสำหรับสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [13]

จากการใช้ทฤษฎีสานแม่เหล็ก (Huygen's theory) จะสามารถแทนแผ่นตัวนำที่อยู่ด้านบนด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_s$  ที่ผิวด้านบนของแผ่นตัวนำ (โดยปกติมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_0$  อยู่ข้างใต้แผ่นตัวนำด้วย แต่ในที่นี้จะไม่กล่าวถึง) และที่ด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะแสดงได้ด้วย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $J_s$  และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก  $M_s$  ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (a) โดยที่

$$J_s = \hat{n} \times H_a \quad (3.16)$$

และ

$$M_s = -\hat{n} \times E_a \quad (3.17)$$

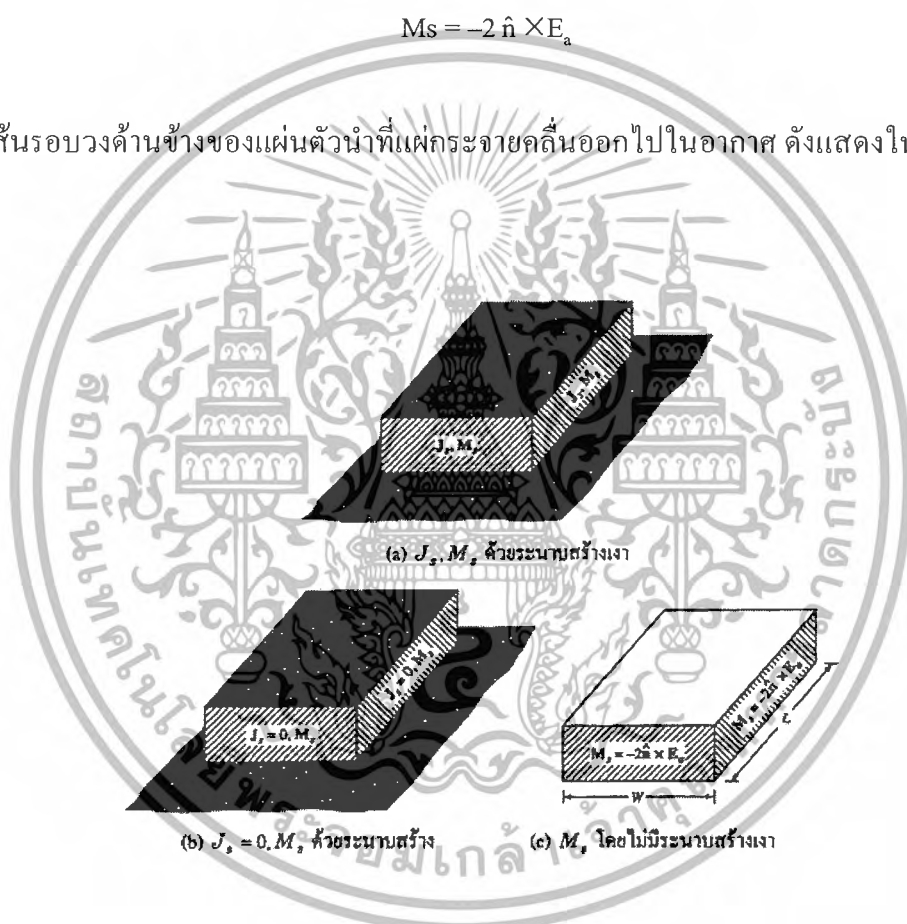
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างค่อนข้างน้อย ดังนั้น  $J_z$  ที่อยู่ด้านบนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $J_z$  ที่อยู่ด้านล่าง จึงสมมติได้ว่า  $J_z$  มีค่าเป็นศูนย์ และจะไม่นำมาคิด จึงทำให้สนามแม่เหล็กที่บริเวณขอบ ซึ่งเกิดจาก  $J_z$  มีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าน้อยมาก) ด้วยส่งผลให้  $J_z$  ที่บริเวณด้านข้าง ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์อีก ดังนั้นจะเหลือเฉพาะ  $M_x$  ที่อยู่ด้านข้าง โดยรอบของแบบจำลองควิตีเท่านั้นที่ไม่เป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (b) จากการใช้ทฤษฎีอิมเมจ (Image Theory) จะได้ว่า

$$M_x = -2\hat{n} \times E_a \quad (3.18)$$

รอบเส้นรอบวงด้านข้างของแผ่นตัวนำที่แผ่กระจายคลื่นออกไปในอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

(c)



รูปที่ 3.10 ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนด้านทั้ง 4 ของสายอากาศไมโครสตริป  
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า[13]

ในแบบจำลองควิตีจะมองสายอากาศไมโครสตริปว่าเปรียบเสมือนมีช่องว่างอยู่ด้านข้าง โดยรอบทั้ง 4 ด้านของควิตี โดยที่ช่องว่างเหล่านี้จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นออกไป แต่ช่องว่างทั้ง 4 ช่องนี้ไม่ได้แผ่กระจายคลื่นได้ทั้ง 4 ช่อง จะมีเพียง 2 ช่องเท่านั้นที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ ส่วนอีก 2 ช่องที่เหลือจะเกิดการหักล้างกันเอง โดย 2 ช่องที่เกิดการหักล้างกันคือช่องที่อยู่ห่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

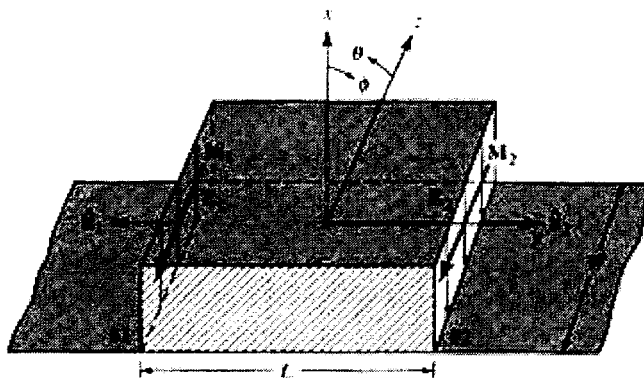
เป็นระยะทาง  $W$  ส่วนอีก 2 ช่องที่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้จะอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง  $L$  ซึ่งเรียก 2 ช่องนี้ว่า ช่องแผ่กระจายคลื่น (Radiating slot) โดยที่ระหว่าง 2 ช่องนี้จะมีแผ่นตัวนำคู่ขนาน ซึ่งแสดงตัวเหมือนเป็นหม้อแปลง (Transformer) ที่มีความต้านทานต่ำ ความยาวของ  $L$  ประมาณได้ว่าเท่ากับ  $\lambda_g/2$  เมื่อ  $\lambda_g$  หมายถึงความยาวคลื่นที่เดินทางในตัวกลางเพื่อให้สนามของช่องว่างทั้ง 2 มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (a) จากช่องว่างทั้ง 2 ที่เป็นตัวแผ่กระจายคลื่นจะทำตัวเสมือนเป็นอาร์เรย์ 2 องค์ประกอบที่มีระยะห่างจากกันเป็น  $\lambda_g/2$

สมมติให้โหมดหลักภายในควาวิตีเป็นโหมด  $TM_{010}^x$  องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะลดลงจากสมการ 3.12 เป็น

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \cos\left(\frac{\pi}{L} y'\right) \\ H_z &= H_0 \sin\left(\frac{\pi}{L} y'\right) \\ E_y = E_z = H_x = H_y &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

โดยที่  $E_0 = -j\omega A_{010}$  และ  $H_0 = (\pi/\mu L)A_{010}$  โครงสร้างของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุฐานรองและระหว่างองค์ประกอบที่แผ่กระจายคลื่นกับระนาบกราวด์จะแสดงดังรูปที่ 3.9 (a) ซึ่งจะเห็นว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงตลอดของความยาวของแผ่นสายอากาศ แต่จะมีค่าสม่ำเสมอตามแนวความกว้างของแผ่นสายอากาศ การเปลี่ยนแปลงของเฟสตามแนวความยาวนี้มีความจำเป็นสำหรับสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นไปทางด้านหน้า (Broadside)

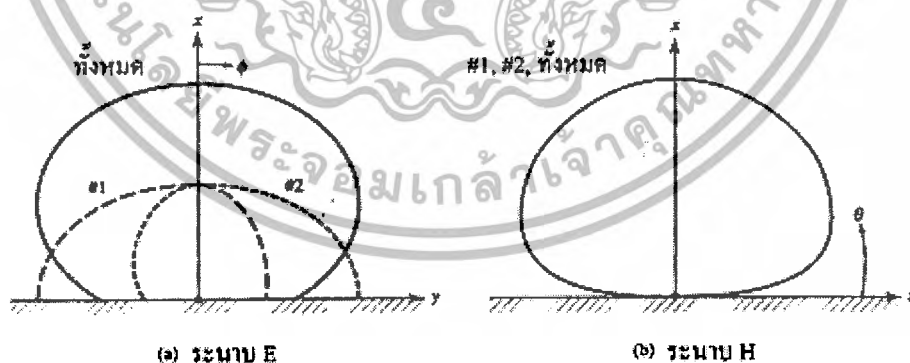
การแผ่กระจายคลื่นของแต่ละร่องนั้นจะถูกสมมติให้เป็นไดโพลแม่เหล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสเป็น  $M_s$  และหาค่าได้จากสมการ 3.18 โดยพิจารณาตามรูปที่ 3.11 ซึ่งจะมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลตลอดทั้ง 2 ร่อง โดยแต่ละร่องมีความกว้าง  $W$  และสูง  $h$  ซึ่งมีขนาดและเฟสเดียวกัน ดังนั้นร่องทั้ง 2 นี้จะวางอยู่เป็นอาร์เรย์ขนาด 2 องค์ประกอบซึ่งมีแหล่งกำเนิด (Source) ที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน และวางห่างจากกันด้วยระยะ  $L$  ดังนั้นแหล่งกำเนิดทั้งสองจะแผ่กระจายคลื่นไปรวมกันในทิศทางบรอดไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (a) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของแต่ละร่องในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ส่วนแบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้นำมาแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 (b)



รูปที่ 3.11 ร่องสำหรับแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไมโครสตริป

รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและกระแสมแม่เหล็กสมมูล [13]

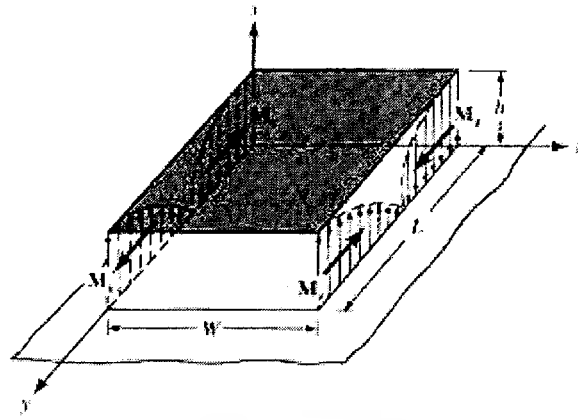
ความหนาแน่นกระแสสมมูลสำหรับร่อง 2 ร่องแบบอื่นๆ โดยที่แต่ละร่องยาว  $L$  และสูง  $h$  แสดงดังรูปที่ 3.13 ดังนั้นความหนาแน่นกระแสบนผนังแต่ละด้านจะมีขนาดเดียวกันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน สนามที่แผ่กระจายโดยร่องทั้งสองนี้ก็จะไปหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อร่องที่อยู่ตรงข้ามกันจะมีเฟสแตกต่างกัน  $180^\circ$  ซึ่งจะหักล้างกับสนามอื่นๆ ในระนาบสนามไฟฟ้าด้วย ดังจะได้แสดงในการวิเคราะห์ต่อไป การแผ่กระจายของสนามจากผนังทั้ง 2 ด้านนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผนังอีก 2 ด้านที่เหลือ ดังนั้นร่องทั้งสองเหล่านี้จึงเรียกว่า “ร่องที่ไม่มีการแผ่กระจาย”



รูปที่ 3.12 แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับ

แผ่นไมโครสตริปร่องเดี่ยว และทั้งสองร่อง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ความหนาแน่นกระแสบนร่องที่ไม่มีกระแสกระจายคลื่นสำหรับสายอากาศไมโครสตริป รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [13]

เพื่อหาการแผ่กระจายของสนามจากแต่ละร่อง สนามรวมนั้นจะเป็นผลรวมจากอาร์เรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบถูกแทนด้วยร่อง ดังนั้นร่องเหล่านี้จึงมีลักษณะเป็นไปตามอุดมคติ และสามารถหาการแผ่กระจายของสนามได้โดยอาศัยอาร์เรย์แฟคเตอร์ (Array factor) สำหรับร่อง 2 ร่อง

ร่องการแผ่กระจายคลื่น การแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในระยะไกลจากแต่ละร่องสามารถหาได้โดยอาศัยความหนาแน่นกระแสสมมูลจากสมการ 3.18 สามารถเขียนได้ว่า

$$E_r \approx E_\theta \approx 0 \quad (3.20a)$$

$$E_\phi = -j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin(X)}{X} \frac{\sin(Z)}{Z} \right\} \quad (3.20b)$$

โดยที่

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin \theta \cos \phi \quad (3.20c)$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos \theta \quad (3.20d)$$

กรณีที่ความสูงของวัสดุฐานรองมีค่าน้อยมากๆ ( $k_0 h \ll 1$ ) สมการ 3.20b จะลดลงเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi = -j \frac{2V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right\} \quad (3.21)$$

โดยที่  $V_0 = hE_0$

ตามทฤษฎีเรื่องของอาร์เรย์เฟลคเตอร์สำหรับกรณี 2 องค์ประกอบที่มีขนาดและเฟสเดียวกัน วางห่างกันด้วยระยะทาง  $L_c$  ตามทิศทางแกน  $y$

$$(AF)_y = 2 \cos\left(\frac{k_0 L_c}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad (3.22)$$

โดยที่  $L_c$  เป็นค่าความยาวประสิทธิผลตามสมการ 3.3 ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมสำหรับร่อง ทั้งสอง (สำหรับสายอากาศไมโครสตริป) คือ

$$E_\phi = -j \frac{2k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin(X) \sin(Z)}{X Z} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_c}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad (3.23)$$

โดยที่

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin\theta \cos\phi \quad (3.23a)$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos\theta \quad (3.23b)$$

สำหรับกรณีที่  $h$  มีค่าน้อยมากๆ ( $k_0 h \ll 1$ ) สมการ 3.23 จะลดลงเป็น

$$E_\phi \approx -j \frac{4V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_c}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad (3.24)$$

โดยที่  $V_0 = hE_0$  เป็นแรงดันตกคร่อมระหว่างร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสายอากาศไมโครตรีปในระบบ x-y ( $\theta=90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ , และ  $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า สำหรับในระนาบนี้ สมการสำหรับหาสนามที่แผ่กระจายจากสมการ 3.23–3.23b จะลดลงเหลือ

$$E_\phi = -j \frac{2k_o W V_o e^{-jk_o r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_o h}{2} \cos \phi\right)}{\frac{k_o h}{2} \cos \phi} \right\} \cos\left(\frac{k_o L_c}{2} \sin \phi\right) \quad (3.25)$$

ระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไมโครตรีปคือระนาบ x-z ( $\phi=0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) และสมการสำหรับการแผ่กระจายของสนามตามสมการ 3.23–3.23b จะลดลงเป็น

$$E_\phi = -j \frac{2k_o W V_o e^{-jk_o r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_o h}{2} \sin \theta\right) \sin\left(\frac{k_o W}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta \left[ \frac{k_o h}{2} \sin \theta \quad \frac{k_o W}{2} \cos \theta \right]} \right\} \quad (3.26)$$

การแผ่กระจายของสนามด้วยร่องที่เราเรียกว่าร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่น ความยาวประสิทธิผล  $L_c$  และความสูง  $h$  ของแต่ละร่องสามารถหาได้โดยใช้วิธีการเดียวกับร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่น โดยอาศัยสนามที่ได้จากสมการ 3.19 ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลของร่องที่ไม่มีการแผ่กระจายคลื่นที่วางบนแกน z คือ

$$M_z = -2 \hat{n} \times E_a = \hat{a}_y 2E_o \cos\left(\frac{\pi}{L_c} y'\right) \quad (3.27)$$

และได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ส่วนอีกร่องหนึ่งจะวางอยู่บนระนาบ -z อาศัยขั้นตอนเดียวกับร่องที่มีการแผ่กระจายคลื่น องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แผ่กระจายออกมาโดยแต่ละร่องสามารถหาได้จาก

$$E_\theta = j \frac{k_o h L_c E_o e^{-jk_o r}}{4\pi r} \left\{ \cos \phi \frac{\sin(X)}{X} \frac{\cos Y}{(Y)^2 - (\pi/2)^2} \right\} \quad (3.28a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi = -\frac{k_o h L_c E_o e^{-jk_o r}}{4\pi r} \left\{ \cos\theta \sin\phi \frac{\sin(X)}{X} \frac{\cos Y}{(Y)^2 - (\pi/2)^2} \right\} \quad (3.28b)$$

โดยที่

$$X = \frac{k_o h}{2} \sin\theta \cos\phi \quad (3.28c)$$

$$Y = \frac{k_o L_c}{2} \sin\theta \sin\phi \quad (3.28d)$$

เมื่อร่องทั้งสองนี้จะเป็นอาร์เรย์ขนาด 2 องค์ประกอบ ซึ่งมีขนาดเดียวกันแต่มีเฟสตรงกัน ข้าม วางแยกออกจากกัน ในแกน  $z$  ด้วยระยะทาง  $W$  จะได้อาร์เรย์แฟคเตอร์เป็น

$$(AF)_z = 2j \sin\left(\frac{k_o W}{2} \cos\theta\right) \quad (3.29)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมในระยะไกลจะเป็นผลคูณของสมการ 3.28a และ 3.28b กับอาร์เรย์แฟคเตอร์ตามสมการ 3.29

ในระนาบสนามไฟฟ้า ( $\theta=90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$  และ  $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$ ) สมการ 3.28a และ 3.28b จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากสนามที่แผ่กระจายไปหนึ่งส่วนสี่รอบของแต่ละร่องจะถูกหักล้างจากสนามที่แผ่กระจายจากหนึ่งส่วนสี่รอบจากที่อื่นๆ และในลักษณะเดียวกันในระนาบสนามแม่เหล็ก ( $\phi=0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) สนามรวมจะมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่าสมการ 3.29 ไม่มีค่า ดังนั้นแสดงว่าสนามที่แผ่กระจายจากแต่ละร่องจะถูกหักล้างโดยสนามที่แผ่กระจายจากร่องอื่นๆ การที่ร่องทั้งสองไม่สามารถแผ่กระจายคลื่นได้ในระนาบหลักนั้นได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้นและได้แสดงความหนาแน่นของกระแสไว้ในรูปที่ 3.7

### 3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีโมเมนต์

โครงสร้างของสายไมโครสตริปและวัสดุฐานรองบนระนาบสร้างเงาตัวนำสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 4.8 สมมติให้ไมโครสตริปถูกกำหนดด้วยพื้นผิว  $S$  บนระนาบ  $x-y$  ที่ตำแหน่ง  $z = z'$  เมื่อ  $z' \leq d$  การแก้ปัญหาเชิงเลข (Numerical Solution) ของสายอากาศไมโครสตริปที่ใช้วิธีโมเมนต์ทั่วไปเป็นวิธีการาร์คิน (Galerkin) ซึ่งได้กำหนดฟังก์ชันมาตรฐาน (Basis Function) และฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่วงน้ำหนัก (Weighting function) ปัญหานี้สามารถกำหนดโดยคลอไซกรีนฟังก์ชัน (Quasi-green's function) [7]

### 3.2.3 ควอไซกรีนฟังก์ชัน

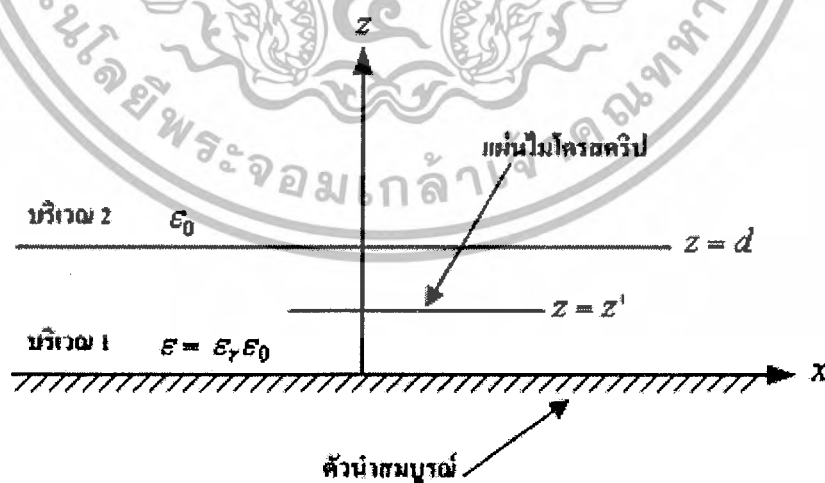
ในกระแสแม่เหล็กที่หายไปนั้น สนามที่แผ่กระจายในขอบเขตที่ 1 และขอบเขตที่ 2 เกิดขึ้นจากกระแสเชิงพื้นผิว  $J_s$  บนแผ่นสายอากาศถูกกำหนดโดยสมการ

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{\mu} \nabla \times A \\ E &= -j\omega A + \frac{1}{j\omega\epsilon\mu} \nabla(\nabla \cdot A) \\ (\nabla^2 + k^2)A &= -\mu J_s \end{aligned} \quad (3.30)$$

กระแสของแหล่งกำเนิด  $J_s$  คือแหล่งกำเนิดที่สร้าง  $J_s$  และคือกระแสไฟฟ้าบนสายส่งไมโครสตริป ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$J_s = I_0 \Psi \quad (3.31)$$

สำหรับสายส่งแบบไมโครสตริป เราจะได้



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปและวัสดุฐานรอง [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi = \hat{z} (w_1 z')^{-1/2} \quad (3.32)$$

เมื่อ  $w_1$  เป็นความกว้างประสิทธิภาพของสายส่ง สำหรับวัสดุฐานรองบางได้มีการ ประมาณ  $w_1$  เป็น  $w_1 = w + 2z'$  เมื่อ  $w$  เป็นความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ ป้อนสู่แผ่นสายอากาศ ในขอบเขตที่ 1 เรากำหนดจากสมการ 3.30

$$A = A^1 \quad ; k = k_0(\epsilon r)^{1/2} \quad (3.33)$$

ในขอบเขตที่ 2 จะได้

$$A = A^2 \quad ; k = k_0 \quad (3.34)$$

ศักย์เวกเตอร์  $A^1$  และ  $A^2$  สำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สามารถแสดงโดยศักย์เวกเตอร์ควอไซกรีนฟังก์ชัน  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  ตามลำดับ จะได้

$$A^i(r) = \mu \int_S \bar{G}_A^i(r, r') \cdot J_s(r') ds' \quad (3.35)$$

สำหรับกระแสที่ผ่านสายอากาศ  $J_s$  บนระนาบ  $z = z'$  เมื่อ  $i = 1$  หรือ 2 ในทางตรงกันข้าม  $\bar{G}_A^1$  คือการแก้ปัญหามสมการ

$$(\nabla^2 + k^2) \bar{G}_A^1(r, r') = -\bar{I} \delta(r, r') \quad \text{สำหรับขอบเขตที่ 1} \quad (3.36)$$

$$(\nabla^2 + k_0^2) \bar{G}_A^1(r, r') = -\bar{I} \delta(r, r') \quad \text{สำหรับขอบเขตที่ 2} \quad (3.37)$$

โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขอบเขต

เพื่อแก้สมการหา  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  เราใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) จากสมการ 3.36 และ 3.37 เทียบกับ  $x$  และ  $y$  ผลลัพธ์การแปลงฟูเรียร์ของ  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  ถูกกำหนดโดยการบังคับให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนองค์ประกอบที่ตัดกันของสนามดังนี้

$$\tilde{E}_t^1(k_x, k_y, 0) = 0 \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{E}_t^1(k_x, k_y, d) = \tilde{E}_t^2(k_x, k_y, d) \quad (3.39)$$

$$\tilde{H}_t^1(k_x, k_y, d) = \tilde{H}_t^2(k_x, k_y, d) \quad (3.40)$$

ศักร์เวกเตอร์ของกรีนฟังก์ชันสำหรับขอบเขตที่ 1 และ 2 หาได้จากการใช้การแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse fourier transform) ของ  $\bar{G}_A^1$  และ  $\bar{G}_A^2$  สำหรับขอบเขตไดอิเล็กตริกจะได้

$$\bar{G}_A^1(r, r') = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dk_x dk_y [(\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y})G_a(k_x, k_y, z, z') - [(\hat{x}\hat{x}k_x + \hat{y}\hat{y}k_y)G_b(k_x, k_y, z, z')]e^{-jk_x(x-x') - jk_y(y-y')} \quad (3.41)$$

เมื่อ

$$G_a(k_x, k_y, z, z') = \frac{e^{-jk_{z1}(z-z')} - e^{-jk_{z1}|z-z'|}}{2jk_{z1}} + \frac{\sin(k_{z1}z)}{k_{z1}T_c} \left\{ k_{z1} \cos[k_{z1}(d-z')] + jk_{z2} \sin[k_{z1}(d-z')] \right\}$$

$$G_b(k_x, k_y, z, z') = \frac{(\epsilon_r - 1) \sin(k_{z1}z') \cos(k_{z1}z)}{T_c T_m}$$

$$T_c = k_{z1} \cos(k_{z1}d) + jk_{z2} \sin(k_{z1}d)$$

$$T_m = \epsilon_r k_{z2} \cos(k_{z1}d) + jk_{z1} \sin(k_{z1}d)$$

ในสมการที่กล่าวมาข้างต้น

$$k_{z1} = \begin{cases} (\epsilon_r k_0^2 - k_t^2)^{1/2} & ; k_t^2 \leq \epsilon_r k_0^2 \\ -j(k_t^2 - \epsilon_r k_0^2)^{1/2} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.42)$$

$$k_{z2} = \begin{cases} (k_0^2 - k_t^2)^{1/2} & ; k_t^2 \leq k_0^2 \\ -j(k_t^2 - k_0^2)^{1/2} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.43)$$

เมื่อ  $k_t^2 = k_x^2 + k_y^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

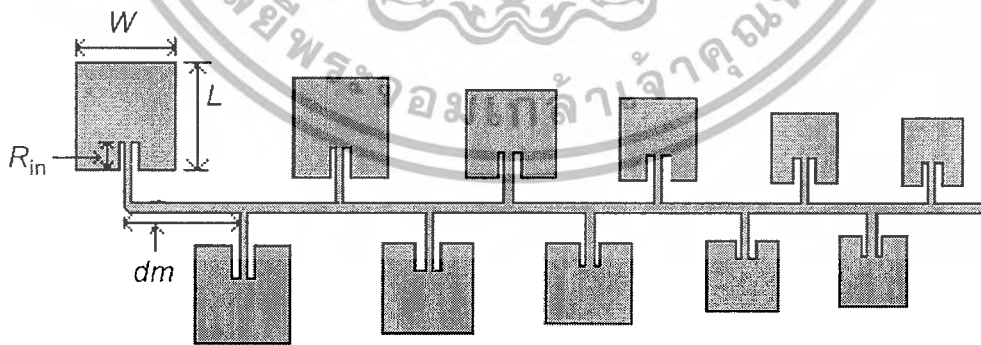
### การออกแบบและการสร้างสายอากาศ

#### 4.1 สายอากาศแบบรายคาบล็อก

##### บทนำ

สายอากาศแบบรายคาบล็อกบนวัสดุฐานรองไดอิเล็กทริกมีข้อดีหลายประการคือ อัตราการขยายสูง อินพุทอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้ตามต้องการ อัตราส่วนโอบหน้าสูง ความกว้างของช่วงความถี่กว้างซึ่งค่าที่เหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมากเมื่อความถี่ของการทำงานที่เปลี่ยนไป ( จะแตกต่างจากสายอากาศแบบอื่นๆ เมื่อความถี่รีโซแนนซ์เปลี่ยนไปจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งเพิ่มขึ้น ) ซึ่งค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์กันอย่างสเกลล็อกเป็นส่วนใหญ่

ในการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบรายคาบล็อก นั้นต้องพิจารณาข้อกำหนดของสายอากาศ เพื่อให้ใช้งานได้ดีขึ้นโดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีส่วนในการประกอบสายอากาศอันได้แก่ค่า  $\tau$  (Scaling factor) และ  $\sigma$  (Spacing factor) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของสายอากาศและยังมีผลต่อมุมที่ทำกับแนวระนาบของสายอากาศ อาจทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ซึ่งจะทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานปัญหาในการเลือกค่า  $\tau$  คือถ้าเลือกค่าที่ใกล้เคียงกับ 1.0 จะทำให้ได้อัตราการขยายสูงแต่จำนวนของตัวประกอบ (Element) บนสายอากาศก็จะมีมากขึ้น แต่ถ้าหากเลือกค่าที่ต่ำเกินไปคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศก็มีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้มาก ดังนั้นจึงมีการทดลองขึ้นและพบว่าค่า  $\tau$  ที่เหมาะสมควรจะอยู่ระหว่างช่วง  $0.8 < \tau < 0.95$



รูปที่ 4.1 โครงสร้างสายอากาศแบบรายคาบล็อกแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณและการออกแบบ

1. กำหนดแถบความกว้างของความถี่ที่ต้องการ โดยกำหนดความถี่ต่ำสุดและสูงสุดของการใช้งาน เพื่อนำไปหาแบนด์วิดท์ของการใช้งาน

$$B = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (4.1)$$

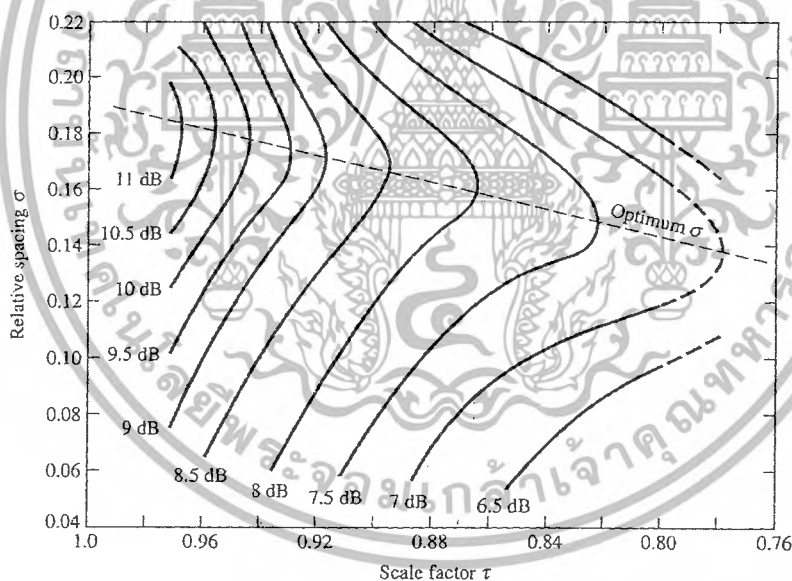
2. กำหนดค่าของสภาพเจาะจงทิศทาง (อัตราขยายของกำลังงานที่ต้องการ หาดด้วยค่าของประสิทธิภาพที่สมเหตุสมผล) ค่าของ  $\tau$  (Scaling factor) และ  $\sigma$  (Spacing factor) กำหนดได้จากรูปที่

4.2

โดยทั่วไปค่า

$\tau$  (Scaling factor) จะอยู่ในช่วง  $0.84 < 0.95$

$\sigma$  (Spacing factor) จะอยู่ในช่วง  $0.05 < \sigma_{opt}$



$$\text{เมื่อ } \sigma_{opt} = 0.243 \tau - 0.051$$

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\tau$  (Scaling factor) และ  $\sigma$  (Spacing factor)

3.หาขนาดของความกว้างความยาวของอิลิเมนต์แรกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \frac{c}{2 f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.2)$$

เมื่อกำหนดให้  $W = L$

และหาขนาดของอิมพีแดนซ์ต่อไปจาก

$$\tau = \frac{W_{m-1}}{W_m}$$

4. คำนวณหาค่าระยะ  $R_{in}$  จาก

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (4.3)$$

5. คำนวณหาระยะห่างระหว่างอิมพีแดนซ์จาก

$$d_m = 2 * \sigma * \text{ความยาวแต่ละอิมพีแดนซ์} \quad (4.4)$$

6. หาความถี่ที่สอดคล้องกันแต่ละอิมพีแดนซ์จาก

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}} \quad (4.5)$$

7. หาค่าจำนวนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจาก

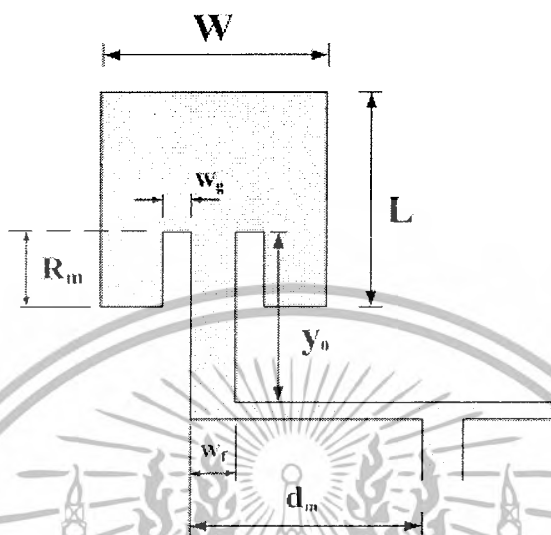
$$n = 1 + \frac{\log\left(\frac{f_{min}}{f_{max}}\right)}{\log(\tau)} \quad (4.6)$$

จากการที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆที่จำเป็นต่อการสร้างสายอากาศไมโครสตริปแบบรายคาบล็อก ซึ่งในปฏิญญาสิทธิบัตรได้ทำการออกแบบในระบบบอดรีไวแบนด์ซึ่งมีค่าความถี่ 3.1 GHz ~ 10.6 GHz แต่ในการออกแบบจริงต้องใช้ความถี่ที่กว้างกว่าเพื่อให้สายอากาศเกิดความผิดเพี้ยนน้อยที่สุดดังนั้นจึงกำหนดช่วงความถี่ที่ 2.4 ~ 12 GHz และได้กำหนดสภาพเจาะจงทิศทาง โดยค่า  $\tau = 0.865$  และ  $\sigma = 0.157$  และในการออกแบบสายอากาศในปฏิญญาสิทธิบัตรนี้ได้ทำเป็นสายอากาศแบบไมโครสตริปหรือทำบนแผ่นปรินท์ ดังนั้นจึงมีค่าสภาพยอมของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแผ่นและความสูงค่าแผ่นด้วยดังนั้นในปริภูมยานิพนธ์นี้ได้จัดทำบนแผ่นปรินท์ที่มีค่า  $\epsilon_r = 4.7$  และ  $h = 1.6$

เมื่อทำการออกแบบและคำนวณแล้วจะได้ค่าต่างๆดังรูปที่ 4.3



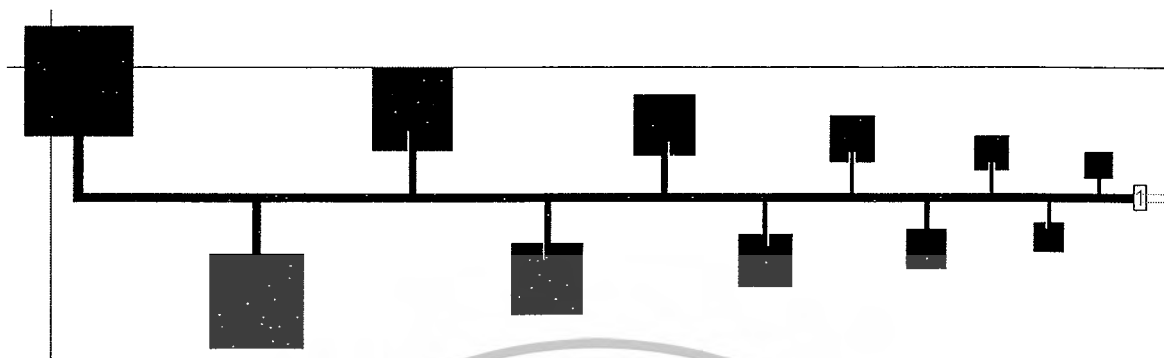
รูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของแต่ละอิลิเมนต์

Data file (fm)	Freq. (GHz)	W=L (mm)	$y_0$ (mm)	$d_m$ (mm)	$R_{m50\Omega}$ (mm)	Wf (mm)	Wg (mm)
f1	2.40	25.88	20.00	42.98	6.11	2.00	0.50
f2	2.77	22.39	17.76	38.9	5.29	1.73	0.50
f3	3.21	19.36	14.96	33.65	4.57	1.50	0.50
f4	3.71	16.75	13.94	27.81	3.95	1.29	0.50
f5	4.29	14.49	12.44	24.06	3.42	1.12	0.50
f6	5.00	12.53	10.62	21.78	2.96	0.97	0.50
f7	5.73	10.84	10.05	18.00	2.56	0.84	0.50
f8	6.62	9.38	8.70	16.29	2.21	0.72	0.50
f9	7.66	8.11	8.02	13.47	1.92	0.63	0.50
f10	8.85	7.02	7.01	12.19	1.66	0.54	0.50
f11	10.23	6.07	5.23	10.03	1.43	0.47	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการคำนวณได้ดังในตารางที่ 4.1 จะสามารถออกแบบสายอากาศแบบรายคาบล็อกได้ดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบรายคาบล็อกที่ได้จากการคำนวณออกแบบ

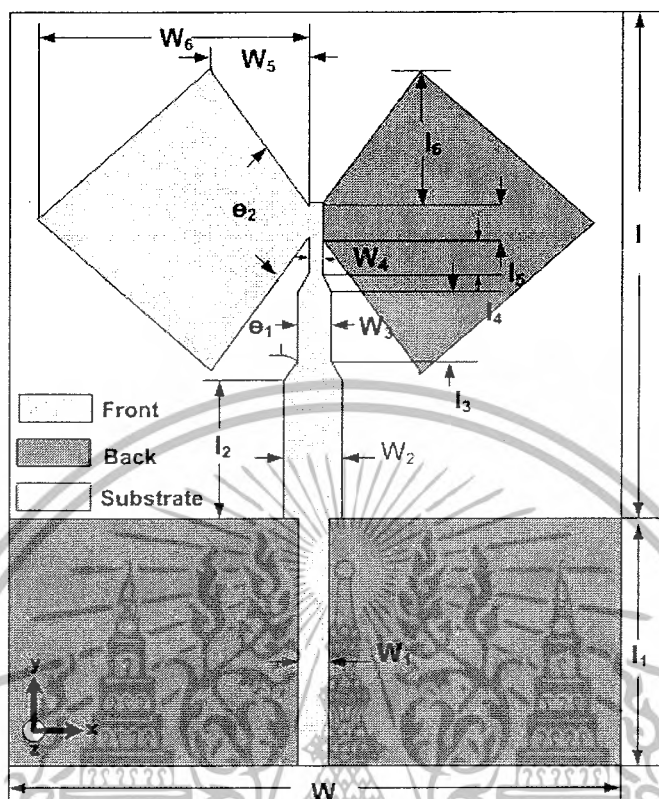
## 4.2 สายอากาศแบบหุกระต่าย

### บทนำ

โปรแกรม IE3D เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองปัญหาแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศ และหาคำตอบด้วยการใช้สมการอินทิกรัลในอากาศแบบสามมิติซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูป IE3D เป็นโปรแกรมที่ให้ความถูกต้องเที่ยงตรงของการจำลองแบบขึ้นอยู่กับขนาดของกริดเซลล์ ถ้าขนาดของกริดเซลล์เล็กก็จะทำให้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แต่ก็ใช้หน่วยความจำในการจำลองผลมากและใช้เวลานานมากขึ้นด้วย จากการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้าง ซึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นก็ใช้เทคนิควิธีที่หลากหลายในการออกแบบ ทั้งการเพิ่มความหนาของวัสดุฐานรอง การเจาะร่อง หรือการออกแบบสายอากาศให้มีรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นในปริยญา-นิพนธ์นี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแบบไดโพล กับสายอากาศแบบหุกระต่าย เพื่อให้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ 3.1 ~ 10.6 GHz โดยมีการปรับแต่งสายอากาศประกอบการออกแบบสายส่งสัญญาณรวมอยู่กับตัวสายอากาศบนวัสดุฐานรองขึ้นเดียวกัน ซึ่งได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศได้แก่ ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศ ในที่นี้เราจะเลือกใช้ความถี่กลาง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง ( $\epsilon_r$ ) และความสูงของวัสดุฐานรอง ในการออกแบบสายอากาศเลือกใช้แผ่น PCB ชนิด FR4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง เท่ากับ 4.7 ค่าสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.02 และความสูงของวัสดุฐานรอง เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ความถี่ใช้งานกำหนดไว้ที่ความถี่กลางเท่ากับ 6.58 GHz โดยในการออกแบบสายอากาศมีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยสายส่งความยาว  $\lambda/4$  ของความถี่กลาง โดยเริ่มต้นออกแบบ

สายอากาศที่มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนด้วยการใช้หลักการของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น ( $\lambda/2$ ) และมีการออกแบบตัวป้อนสัญญาณ โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการแมตซ์สายนำสัญญาณ ความยาว  $\lambda/4$



รูปที่ 4.5 โครงสร้างสายอากาศแบบหุกระด้างแบบไม่โคจรสตริป

ซึ่งสามารถคำนวณหาความกว้างของสายนำสัญญาณที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$H = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( \ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

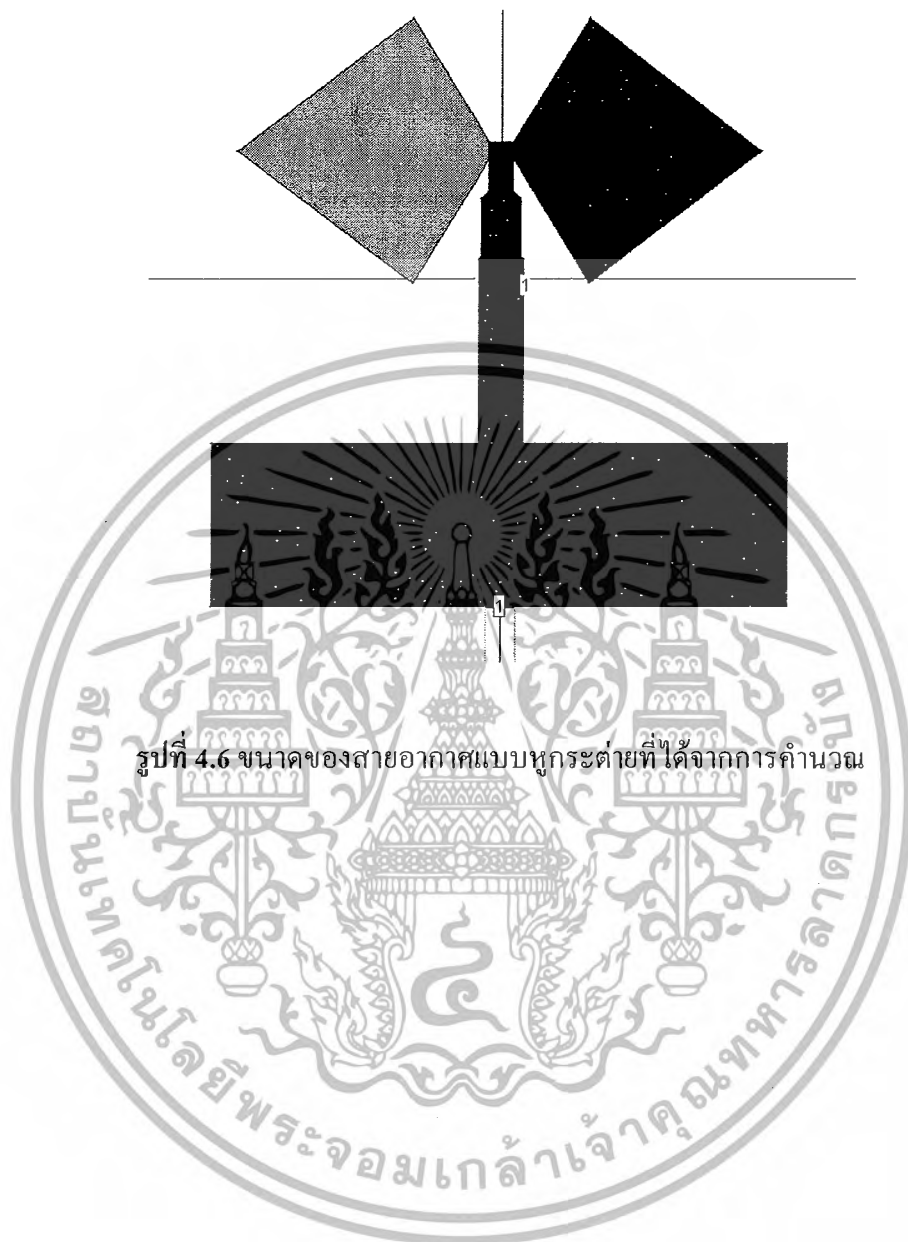
$$\frac{W}{h} = \left( \frac{\exp H}{8} - \frac{1}{4 \exp H} \right)^{-1}$$

$$W = h \left( \frac{\exp H}{8} - \frac{1}{4 \exp H} \right)^{-1}$$

ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่  $w = 36.5$  มิลลิเมตร,  $w_1 = 1.9$  มิลลิเมตร,  $w_2 = 2.9$  มิลลิเมตร,  $w_3 = 2.5$  มิลลิเมตร,  $w_4 = 1.5$  มิลลิเมตร,  $w_5 = 4.85$  มิลลิเมตร,  $w_6 = 10.9$  มิลลิเมตร,  $l = 12$  มิลลิเมตร,  $l_1 = 30$  มิลลิเมตร,  $l_2 = 10.25$  มิลลิเมตร,  $l_3 = 5.1$  มิลลิเมตร,  $l_4 = 2$  มิลลิเมตร,  $l_5 = 1.1$  มิลลิเมตร,  $l_6 = 7.85$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลิเมตร, มุม  $\theta_1 = 0$  องศา, มุม  $\theta_2 = 116$  องศา และจำลองผลด้วยโปรแกรม IE3D ซึ่งใช้แผ่น PCB ชนิด FR4 เป็นวัสดุฐานรองที่สามารถใช้ได้ในช่วงความถี่สูงจะได้สายอากาศดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ขนาดของสายอากาศแบบหุกระต่ายที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

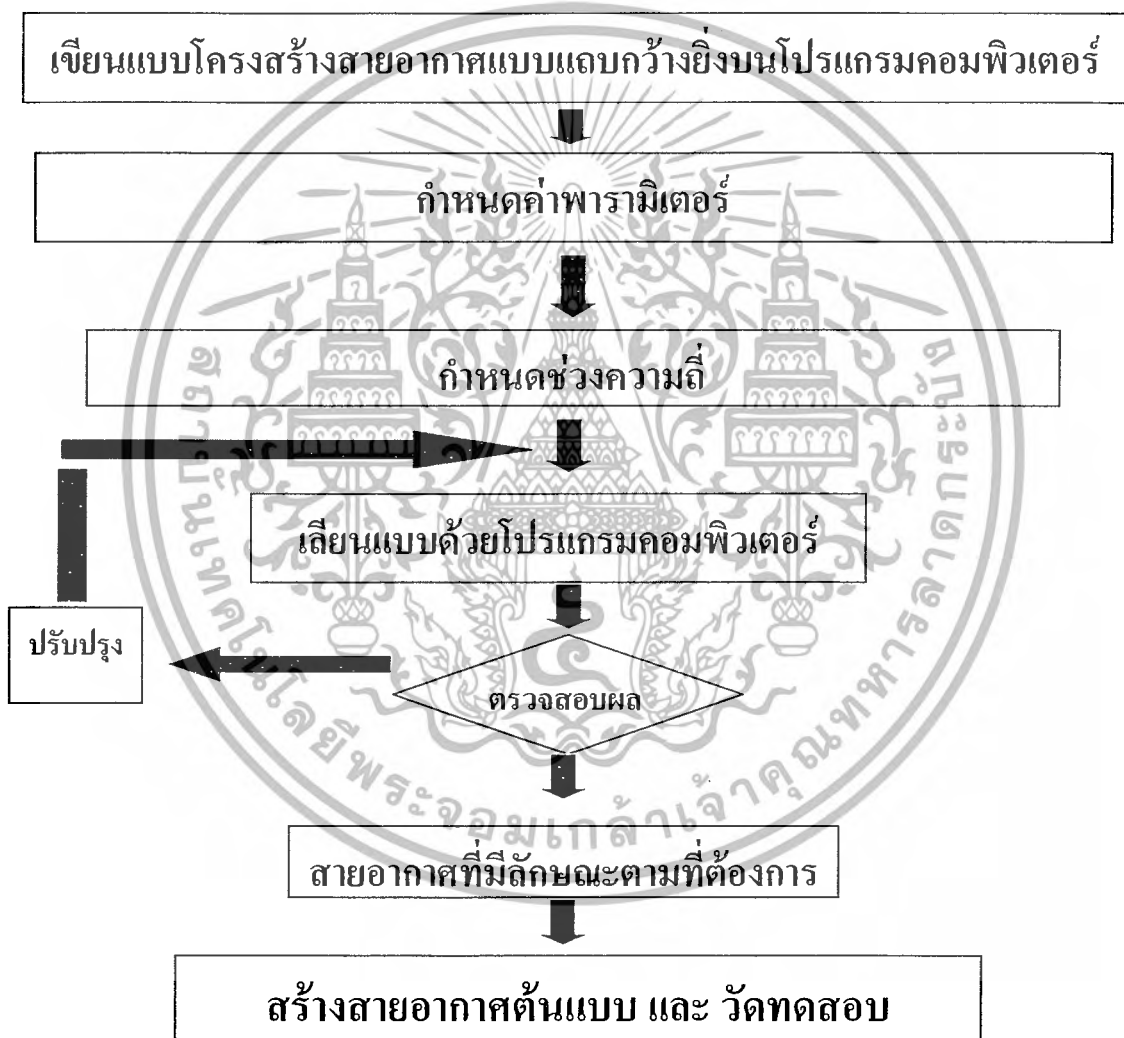
## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 สายอากาศแบบระบายคาบลิ้อก

##### 5.1.1 เขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

###### 5.1.1.1 ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทดสอบสายอากาศแบบระบายคาบลิ้อก โดยการเขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

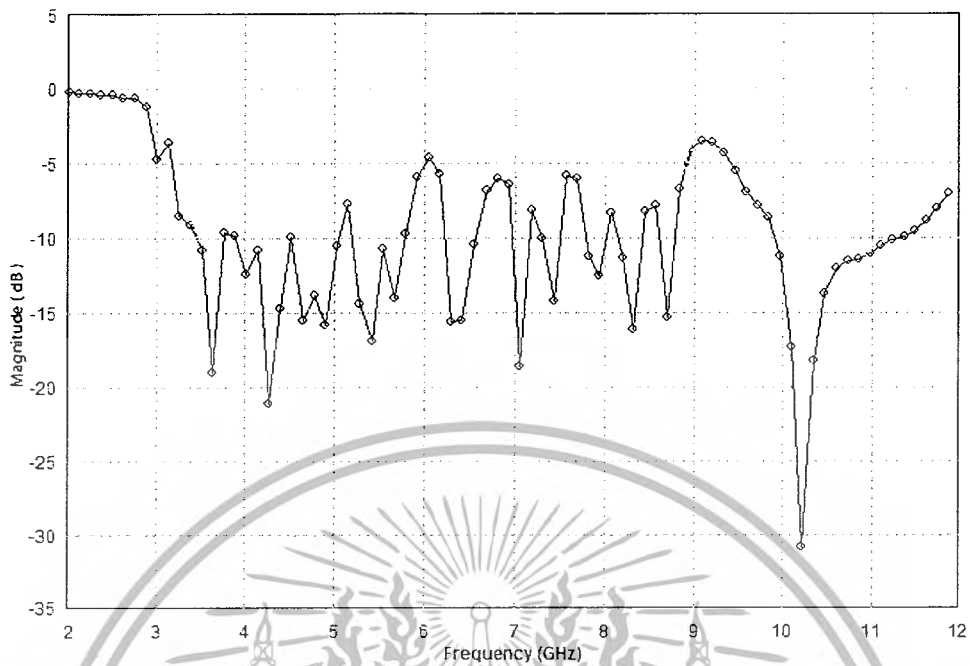
## 5.1.1.2 ผลการทดลอง

ขนาดของสายอากาศตัวแรกที่ทำกรทดลอง

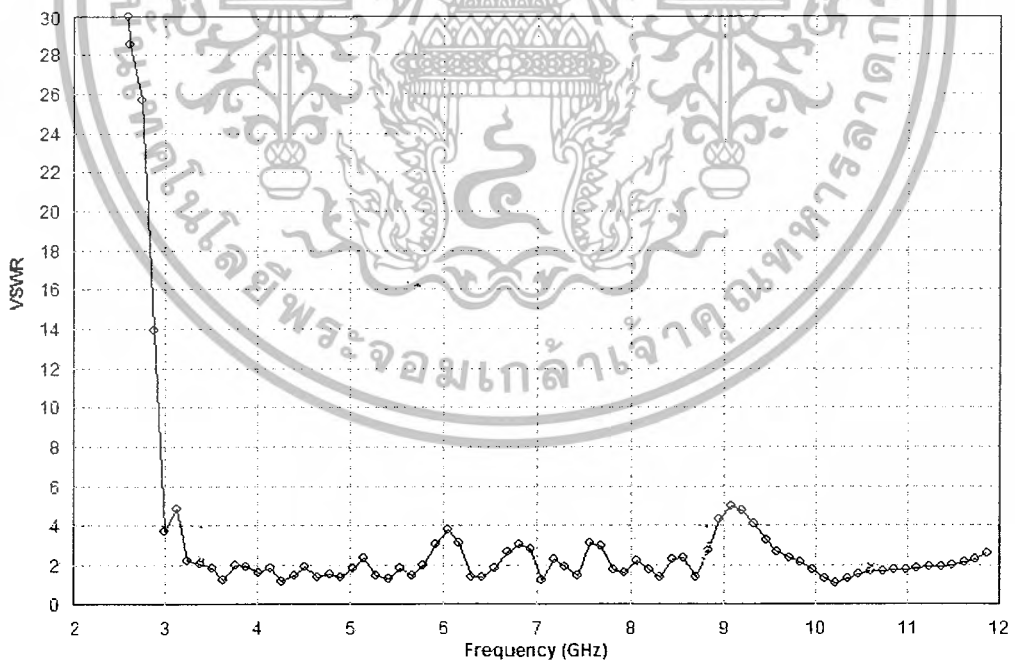
ตารางที่ 5.1 แสดงขนาดของแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศตัวแรกที่ทำกรทดลอง

Data file (fm)	Freq. (GHz)	W=L (mm)	$y_0$ (mm)	$d_m$ (mm)	Rm50 $\Omega$ (mm)	Wf (mm)	Wg (mm)
f1	2.40	25.88	20.00	42.98	6.11	2.00	0.50
f2	2.77	22.39	17.76	38.9	5.29	1.73	0.50
f3	3.21	19.36	14.96	33.65	4.57	1.50	0.50
f4	3.71	16.75	13.94	27.81	3.95	1.29	0.50
f5	4.29	14.49	12.44	24.06	3.42	1.12	0.50
f6	5.00	12.53	10.62	21.78	2.96	0.97	0.50
f7	5.73	10.84	10.05	18.00	2.56	0.84	0.50
f8	6.62	9.38	8.70	16.29	2.21	0.72	0.50
f9	7.66	8.11	8.02	13.47	1.92	0.63	0.50
f10	8.85	7.02	7.01	12.19	1.66	0.54	0.50
f11	10.23	6.07	5.23	15.03	1.43	0.47	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบสื่อจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

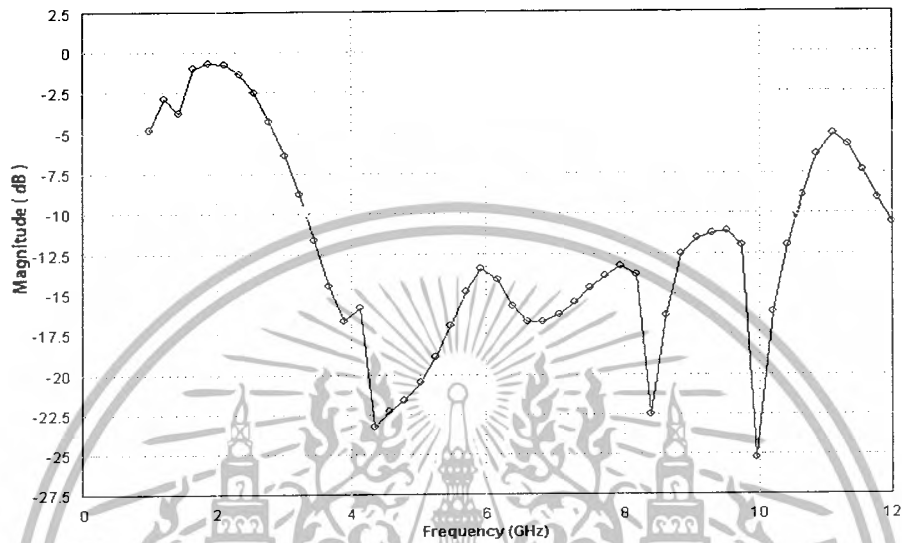


รูปที่ 5.3 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบรายคาบสื่อจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

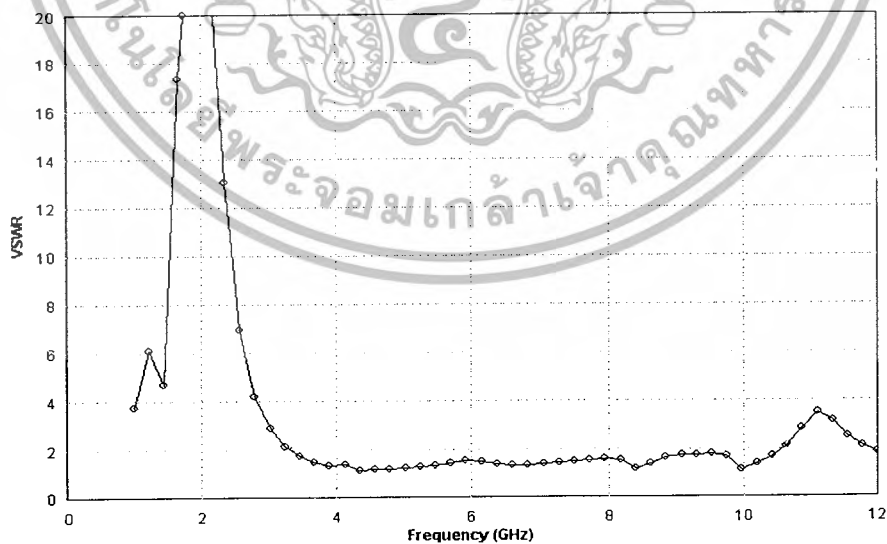
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดลองด้วยโปรแกรมเรียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์ผลที่ได้จากคำนวณนั้นความกว้างของช่องสัญญาณยังไม่ได้ตามข้อกำหนดของเทคโนโลยีของอุลตราไวเบนด์ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณของความยาวของ  $dm$  ตัวสุดท้าย

เมื่อปรับขนาดของ  $dm$  ตัวสุดท้ายเป็น 12.53 มิลลิเมตร ได้ผลเป็นดังนี้



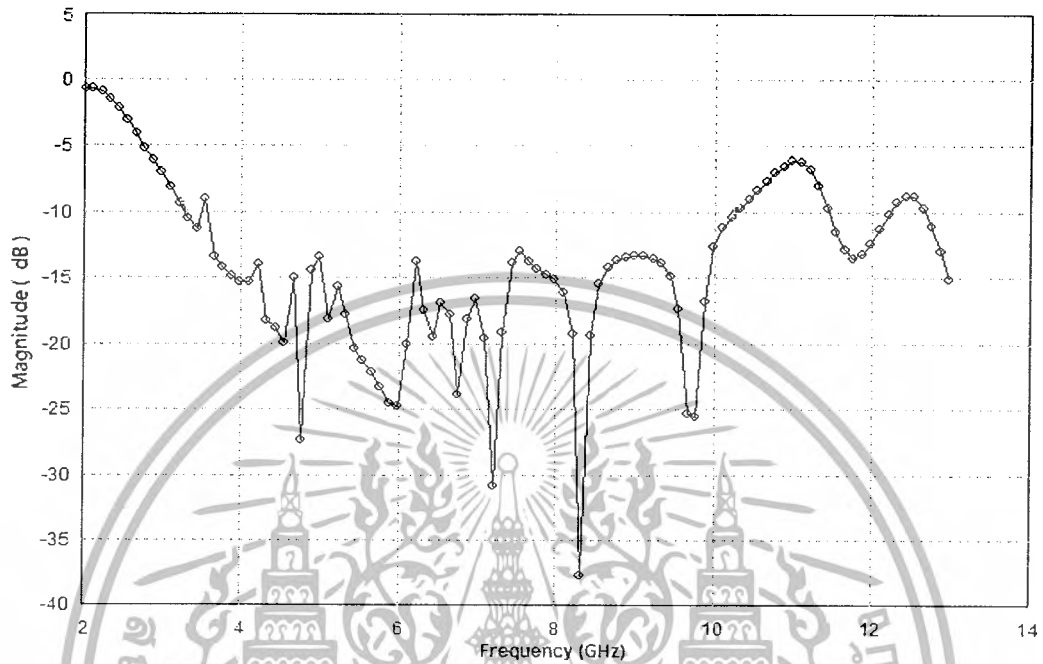
รูปที่ 5.4  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบราคาบสื่อจากการเลียนแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์



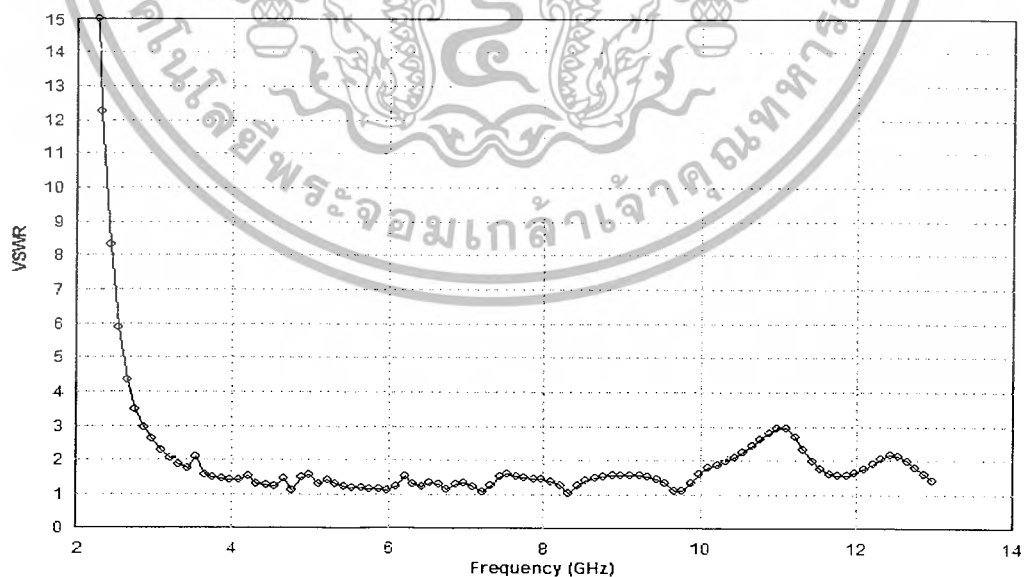
รูปที่ 5.5 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบราคาบสื่อจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนค่า  $dm$  12.53 มิลลิเมตร แล้วผลที่ได้ยังไม่ดีพอ จึงได้ทำการทดลอง  
เปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าที่ดีที่สุด เป็น 10.03 มิลลิเมตร  
เมื่อปรับขนาดของ  $dm$  ตัวสุดท้ายเป็น 10.03 มิลลิเมตร ได้ผลเป็นดังนี้

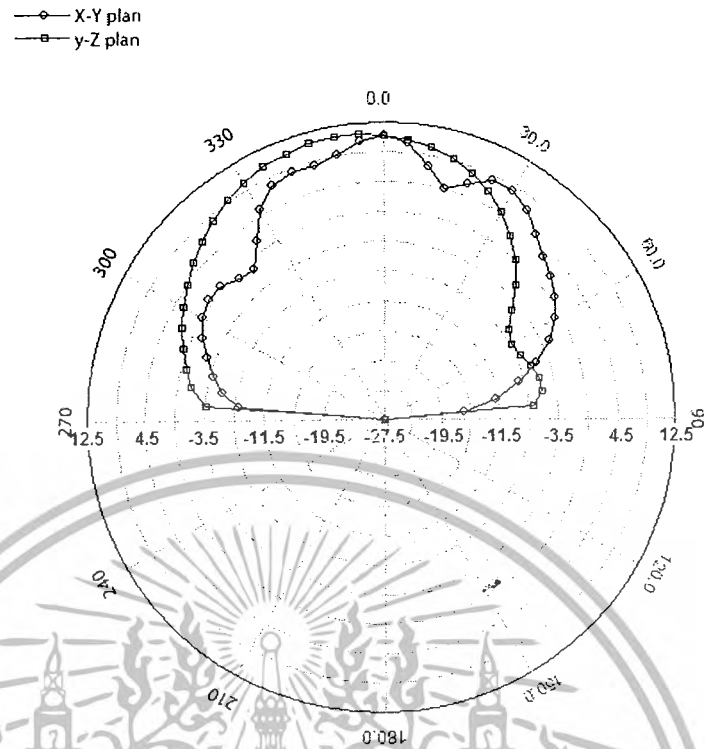


รูปที่ 5.6  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบสื่อจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



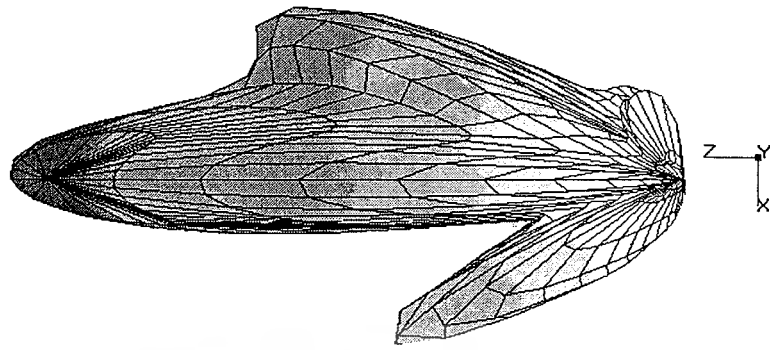
รูปที่ 5.7 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบรายคาบสื่อจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบที่ความถี่ 3 GHz

จากภาพที่ 5.8 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายคาบ ที่ความถี่ 3 GHz มีรูปแบบการแผ่พลังงานพุ่งตรงแบบทิศทางเดียว ในระนาบ x-z ซึ่งมีลักษณะรูปแบบการแผ่พลังงานที่ยังไม่สมบูรณ์นัก



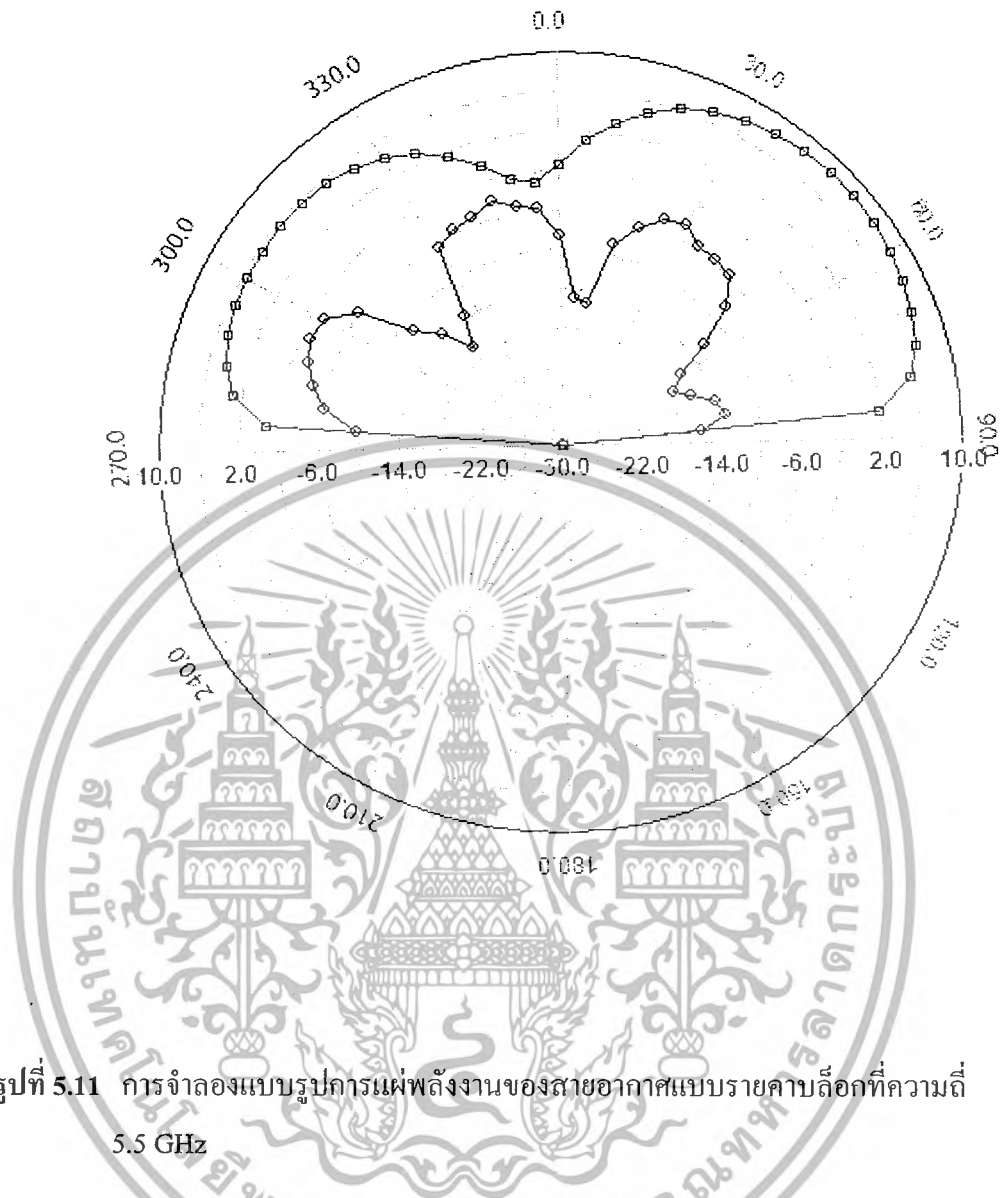
รูปที่ 5.9 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบระยคาบถึอกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ x-z ( $\phi=0^\circ$ ) ที่ความถี่ 3 GHz



รูปที่ 5.10 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบระยคาบถึอกในรูปแบบสามมิติ ระนาบ y-z ( $\phi=90^\circ$ ) ที่ความถี่ 3 GHz

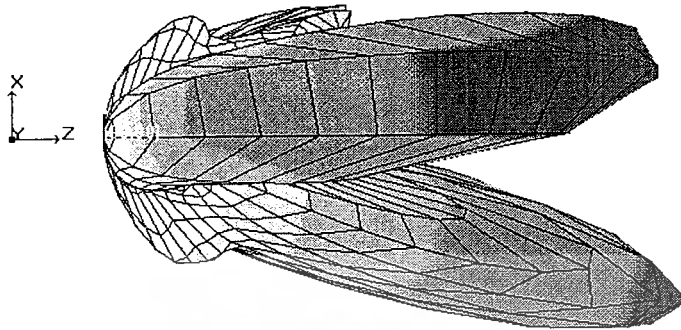
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

—◇— X-Z Plan  
—■— Y-Z Plan



รูปที่ 5.11 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบระยาคาบถลอกที่ความถี่ 5.5 GHz

จากรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบระยาคาบถลอก ที่ความถี่ 5.5 GHz มีรูปแบบการแผ่พลังงานแผ่กระจายที่บิดเบี้ยว แสดงถึงรูปภาพแผ่พลังงานของสายอากาศเริ่มมีการผิดเพี้ยนไป เมื่อความถี่เริ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.12 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายนาคบสี่ก้านใน  
รูปแบบสามมิติ ระนาบ x-z ( $\phi=0^\circ$ ) ที่ความถี่ 5.5 GHz



รูปที่ 5.13 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบรายนาคบสี่ก้านในรูปแบบ  
สามมิติ ระนาบ y-z ( $\phi=90^\circ$ ) ที่ความถี่ 5.5 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

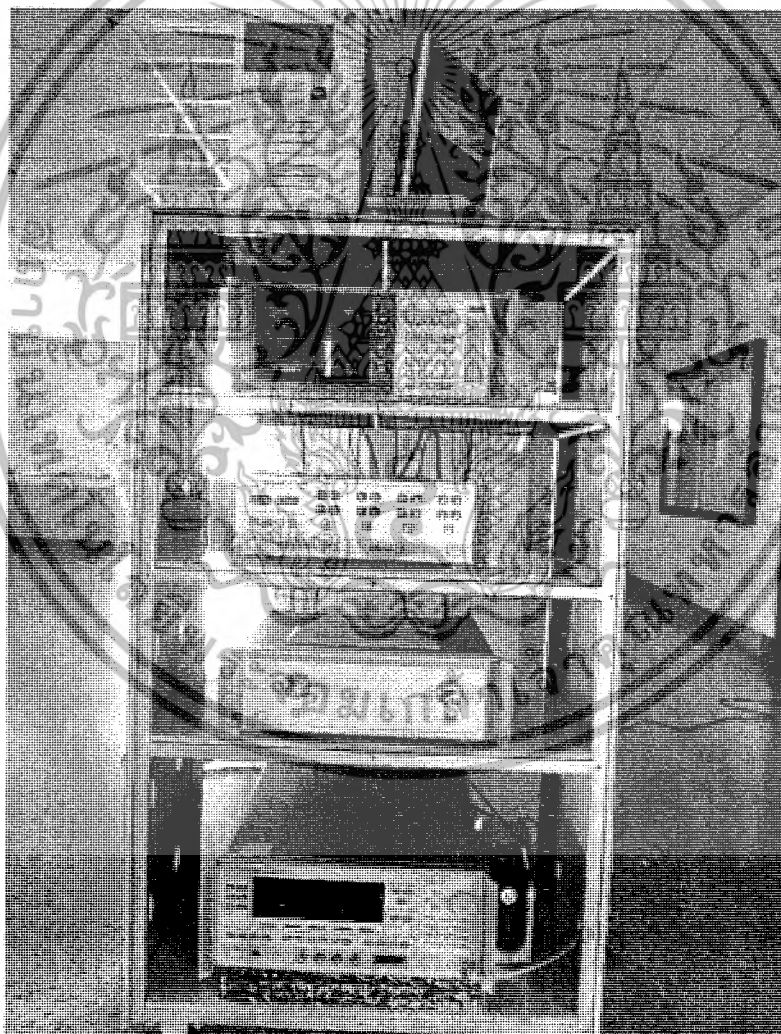
## 5.1.2 ผลการวัดทดสอบจากสายอากาศต้นแบบ

### 5.1.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

นำเครื่องมือดังนี้ - เครื่องคอมพิวเตอร์

- โปรแกรม Mathlab
- เครื่อง 8150C Vector network analyzer
- เครื่อง 8514B S-parameter test set (45 MHz - 20 GHz)
- เครื่อง 8360 Series synthesized sweeper (10 MHz - 20 GHz)
- ชุดปรับเทียบค่า 85052B (Calibration 85052B 3.5 mm)

มาติดตั้งดังรูปด้านล่าง

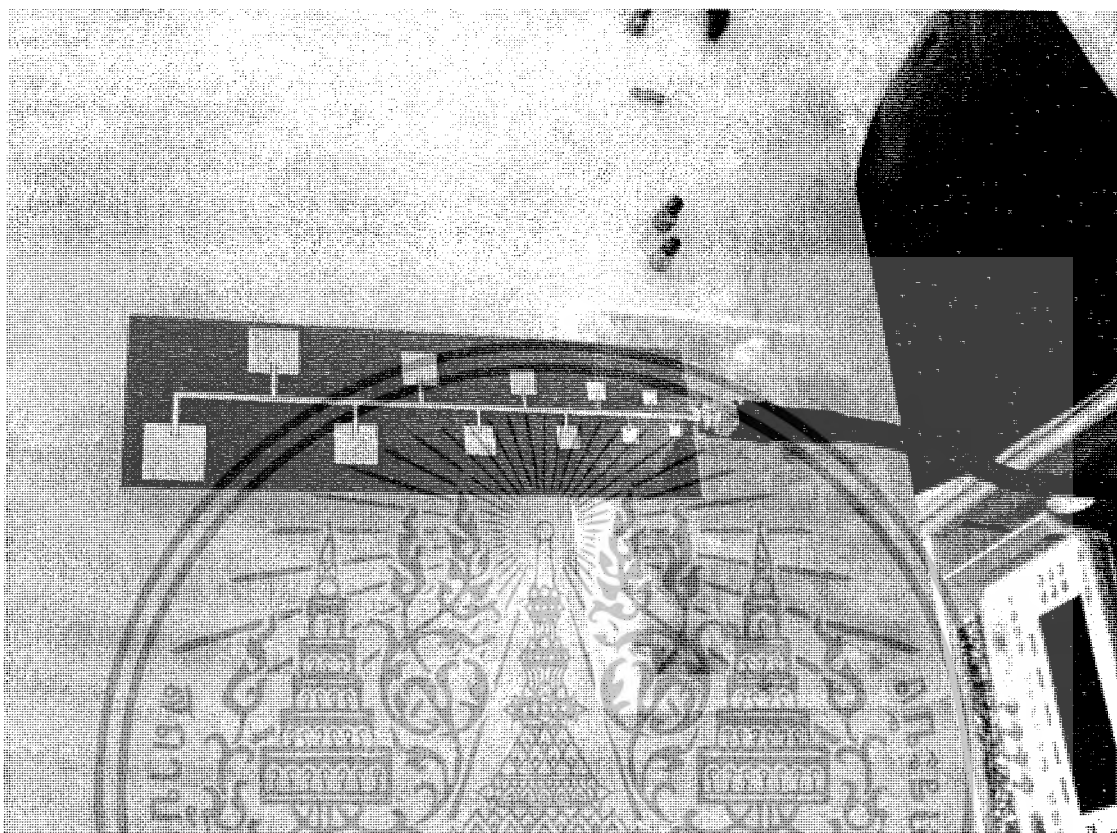


รูปที่ 5.14 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## นำสายอากาศต้นแบบมาทำการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของสายอากาศตั้งรูป

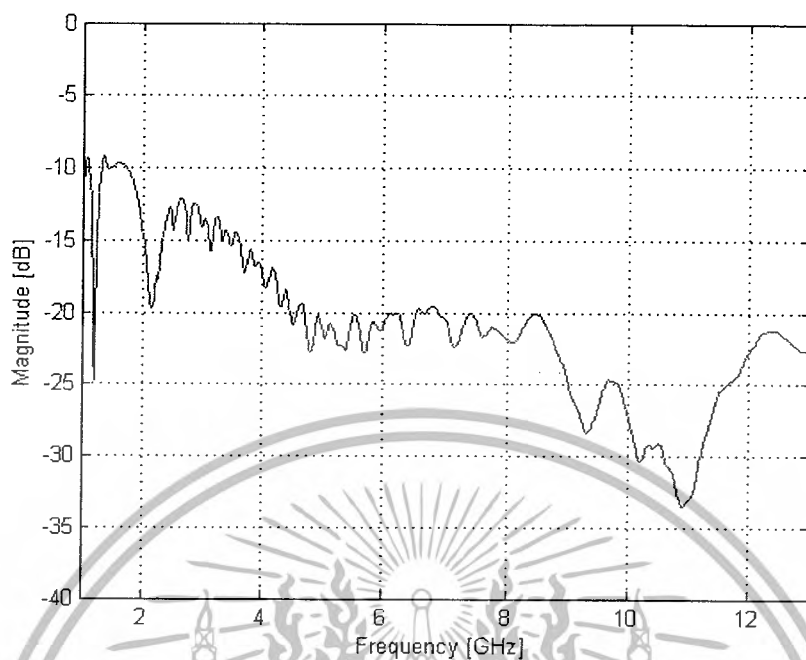
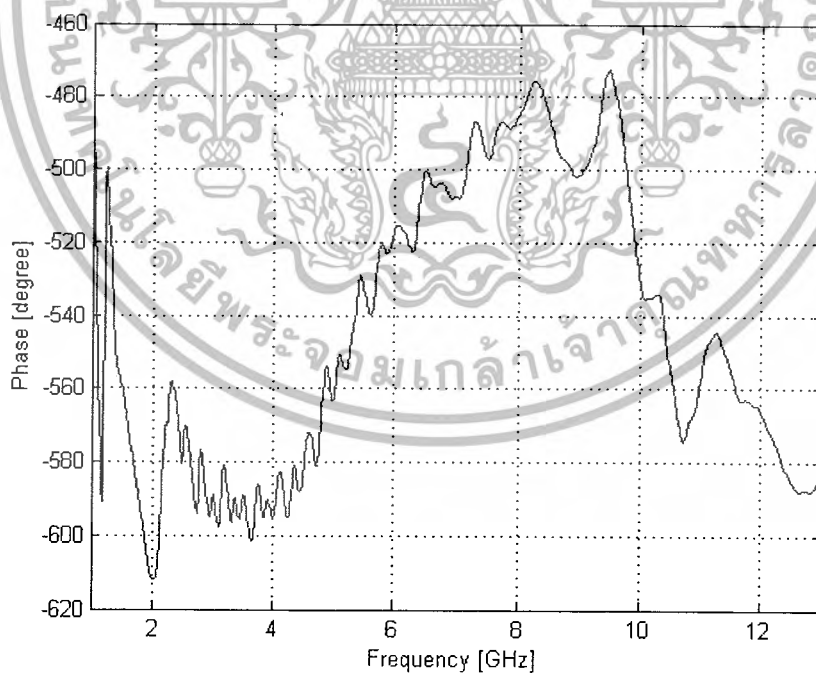
ด้านล่าง



รูปที่ 5.15 การทดสอบหาคุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบล็อก

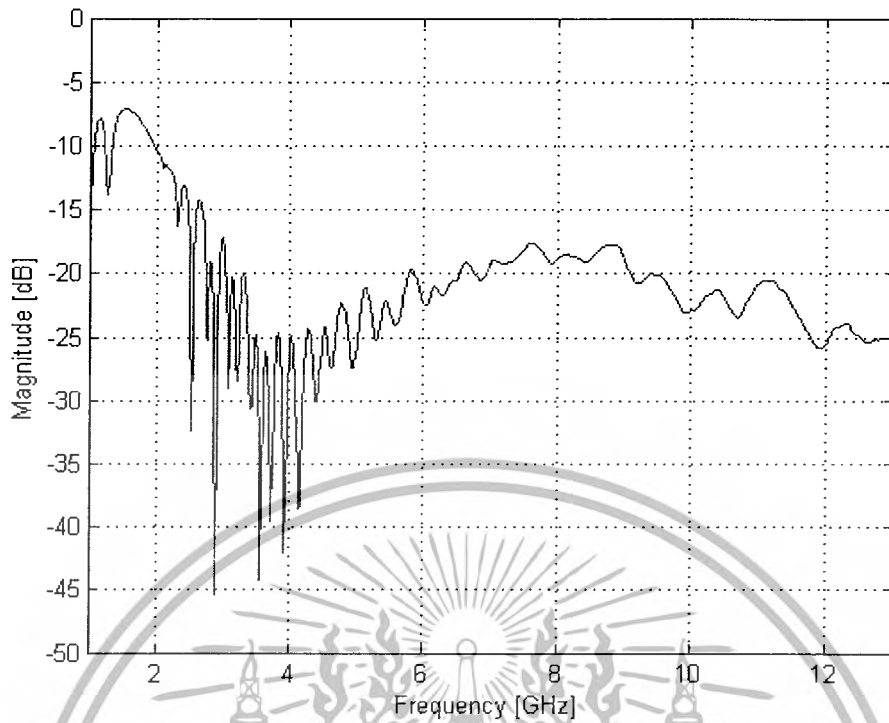
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.1.2.2 ผลการทดลอง

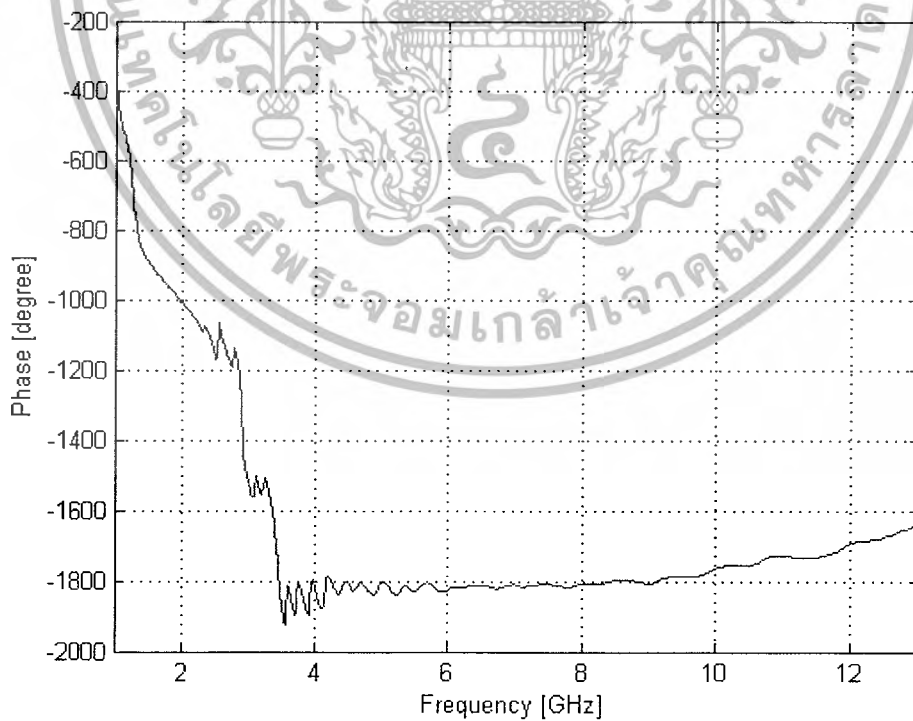
รูปที่ 5.16 S<sub>11</sub> คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบสี่ลวด

รูปที่ 5.17 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบสี่ลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

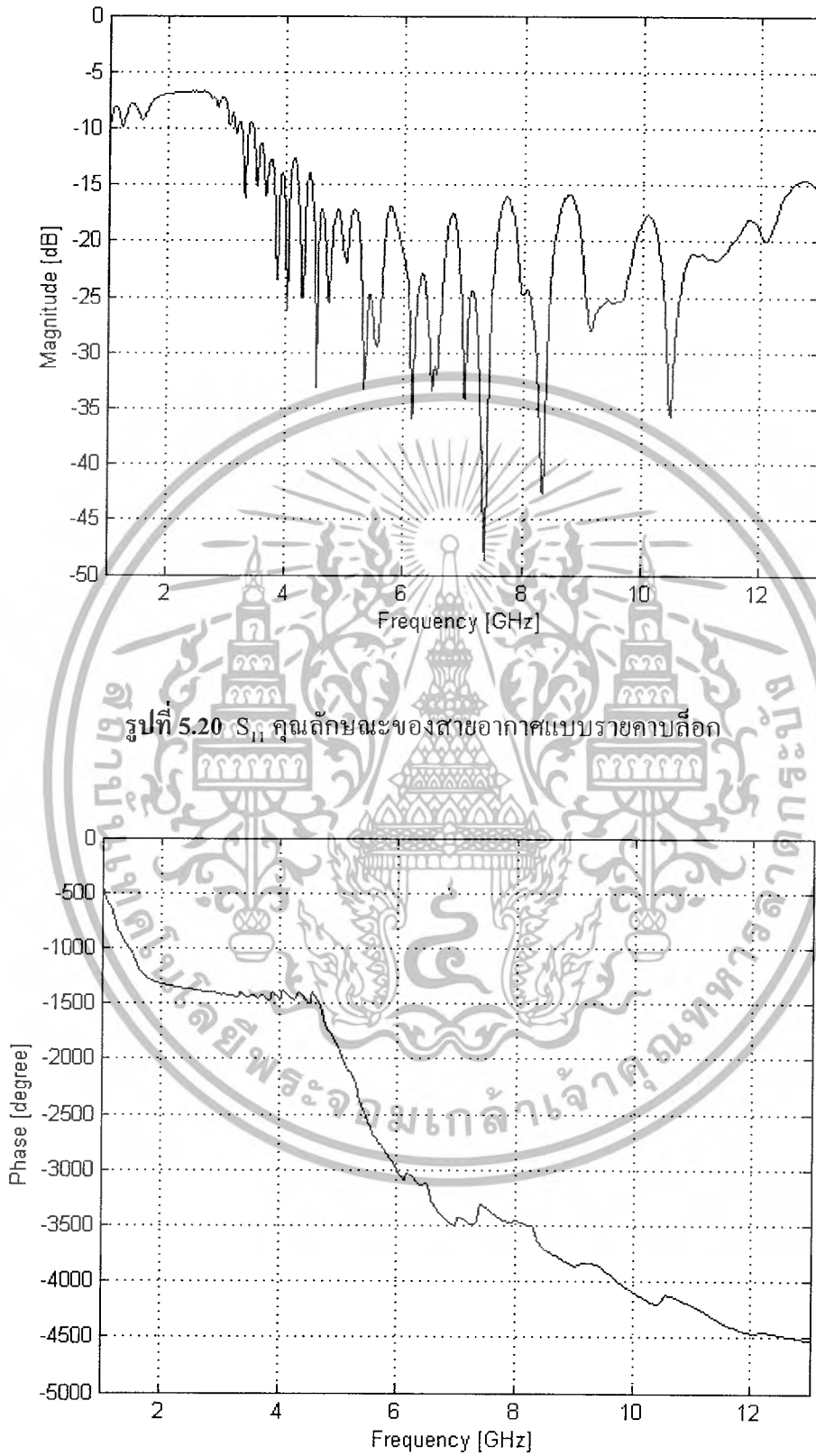


รูปที่ 5.18  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบล็อก



รูปที่ 5.19 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

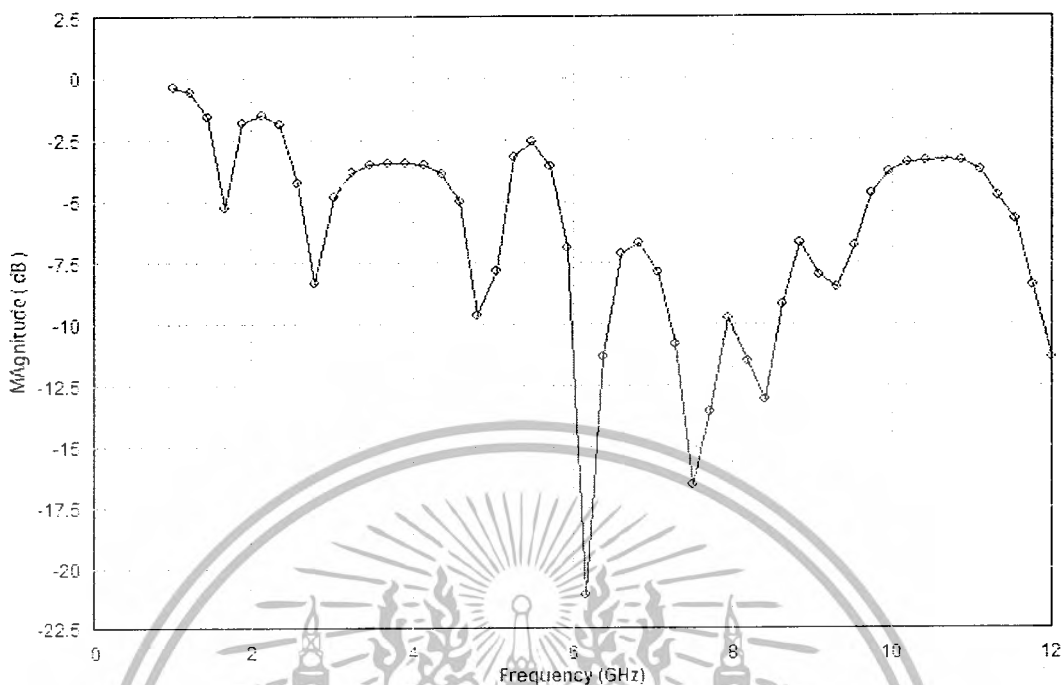


รูปที่ 5.20  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบรายคาบสื่อ

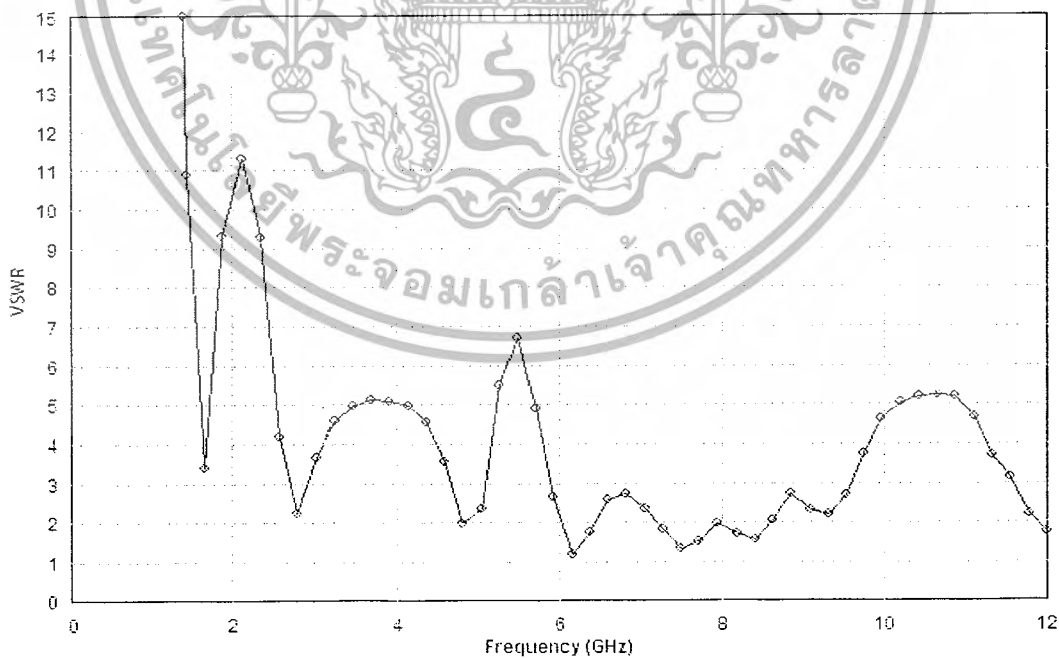
รูปที่ 5.21 เฟสของสายอากาศแบบรายคาบสื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1.2 ผลการทดลอง

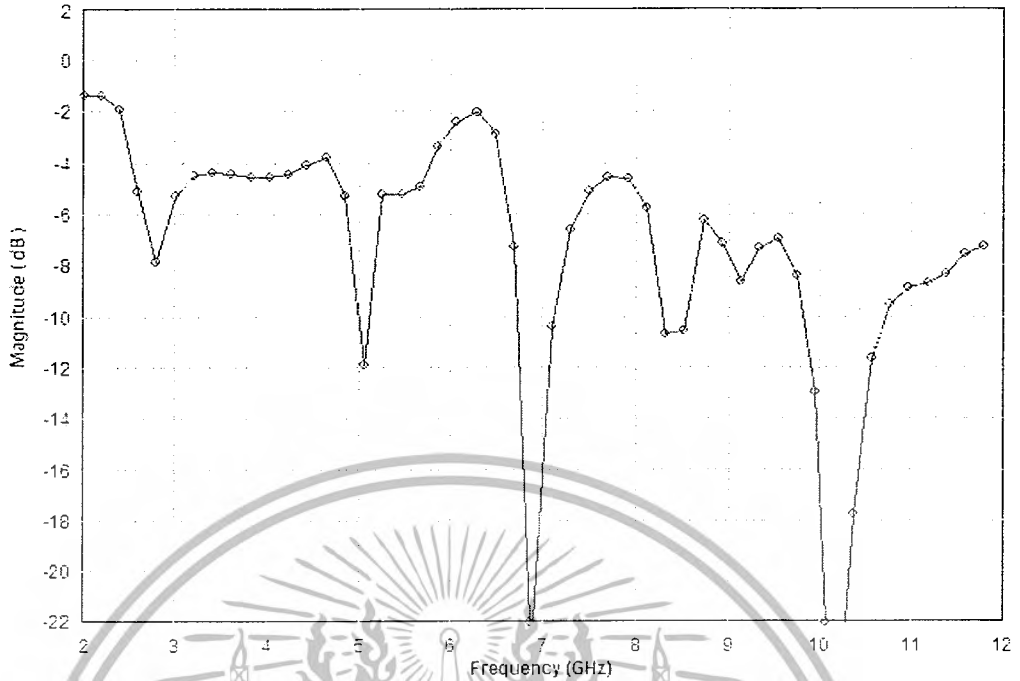


รูปที่ 5.24  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

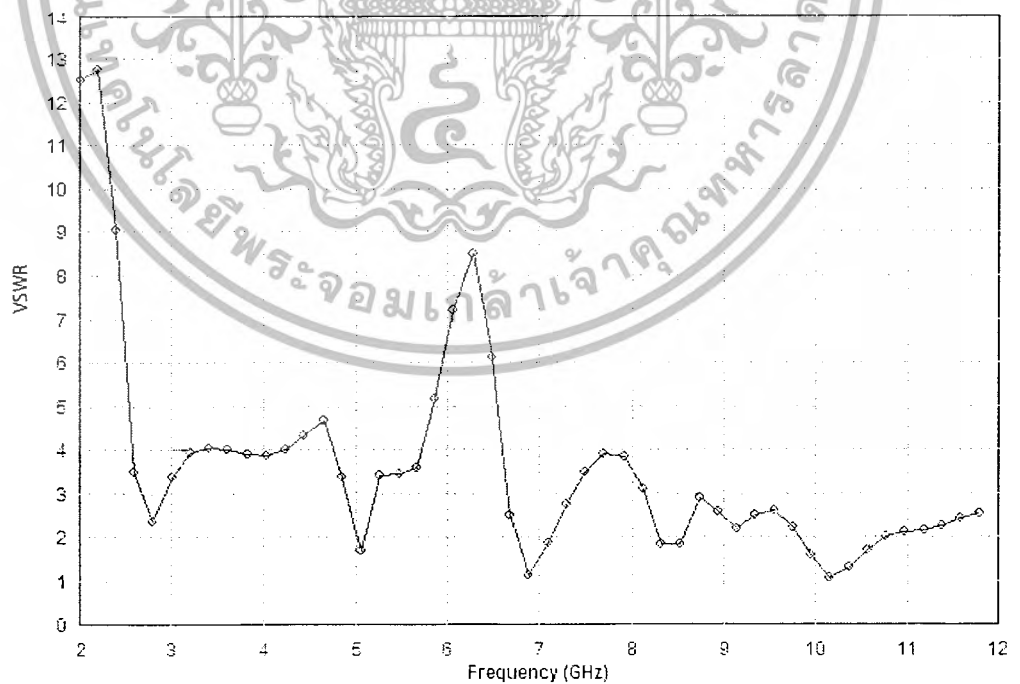


รูปที่ 5.25 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.27 ค่า VSWR ของสายอากาศแบบหุกระต่ายจากการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

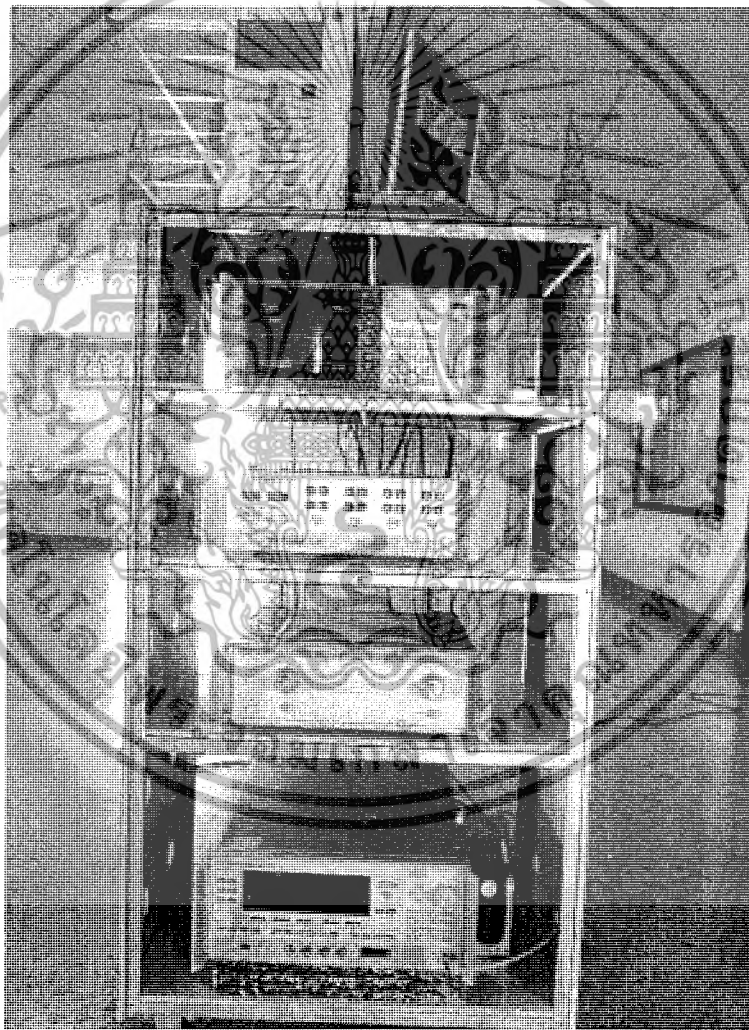
## 5.2.2 การวัดทดสอบจากสายอากาศต้นแบบ

### 5.2.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

นำเครื่องมือดังนี้ - เครื่องคอมพิวเตอร์

- โปรแกรม Matlab
- เครื่อง 8150C Vector network analyzer
- เครื่อง 8514B S-parameter test set (45 MHz - 20 GHz)
- เครื่อง 8360 Series synthesized sweeper (10 MHz - 20 GHz)
- ชุดปรับเทียบค่า 85052B (Calibration 85052B 3.5 mm)

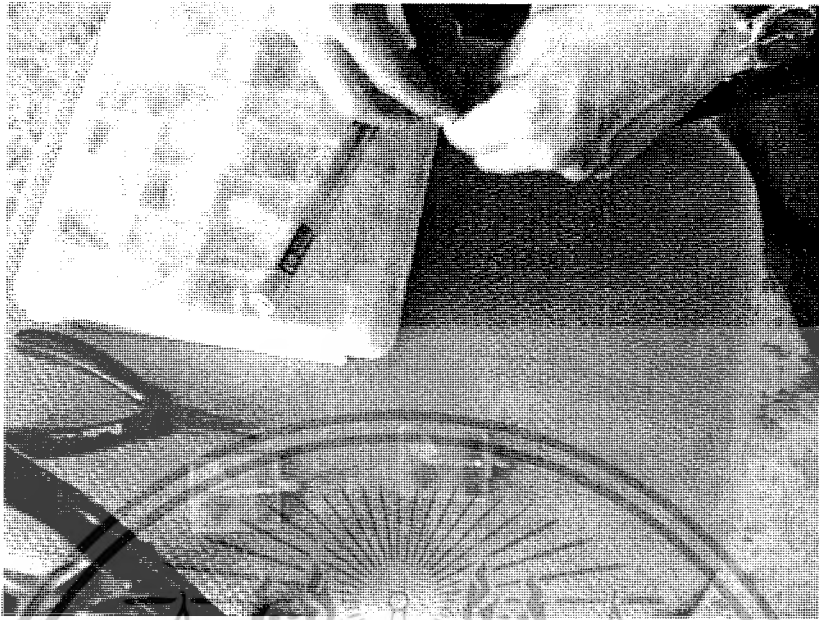
มาติดตั้งดังรูป



รูปที่ 5.28 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของชิ้นงานจริง  
ของสายอากาศต้นแบบแบบหุกระด้าย

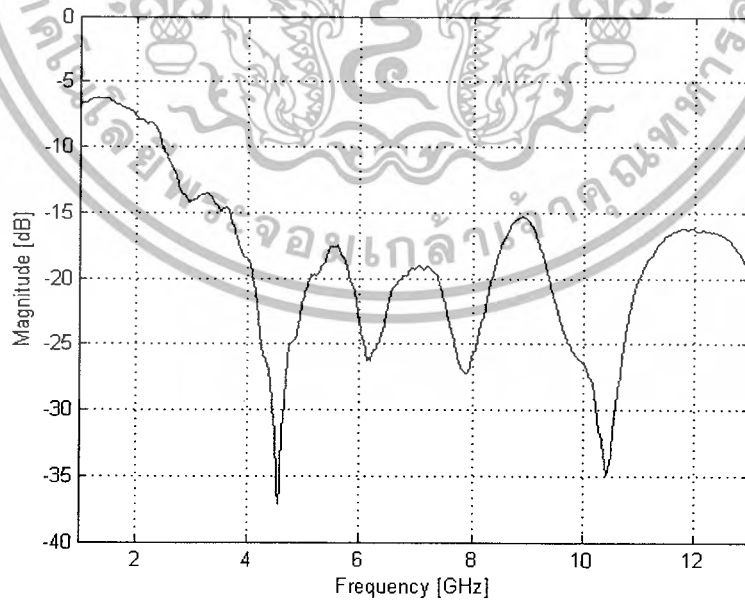
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## นำสายอากาศต้นแบบมาทำการวัดทดสอบ



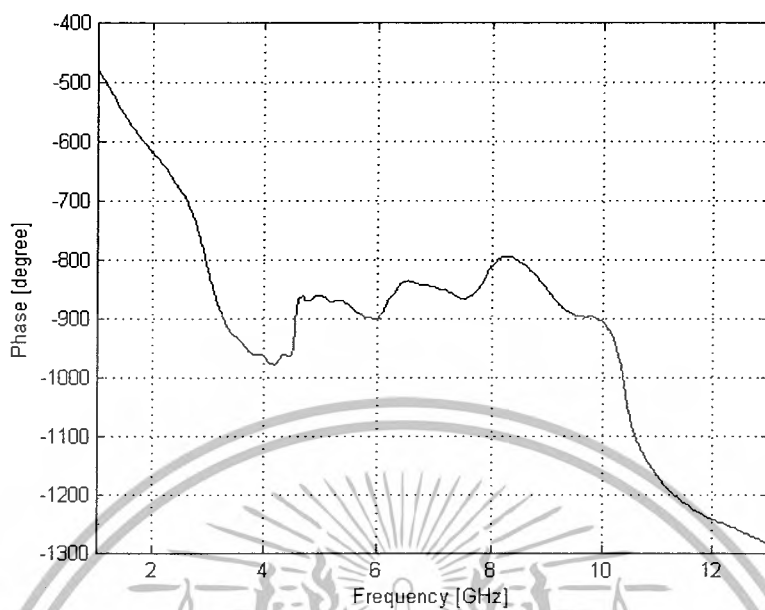
รูปที่ 5.29 ขั้นตอนในการวัดทดสอบหาคุณลักษณะของชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบแบบหุกระต่าย

### 5.3.2.2 ผลการทดลอง



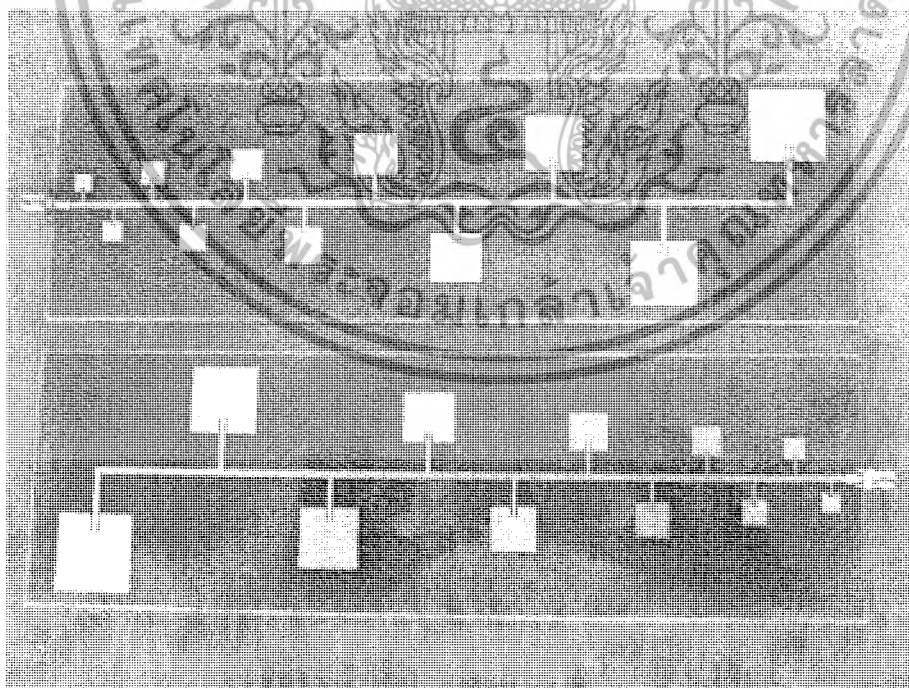
รูปที่ 5.30  $S_{11}$  คุณลักษณะของสายอากาศแบบหุกระต่ายที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



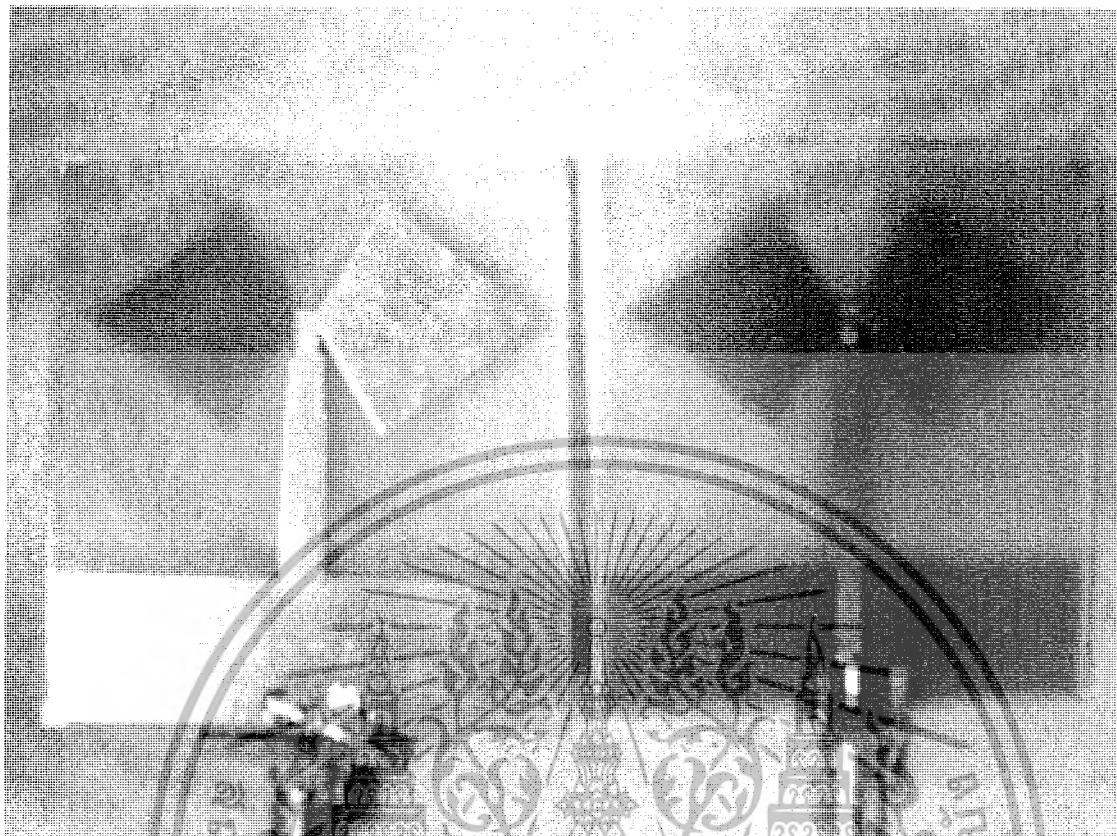
รูปที่ 5.31 เฟสของสายอากาศแบบหุกระต่ายที่ได้จากการวัด

ชั้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบทั้ง 2 ชนิด ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม  
เลียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 5.32 รูปชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบแบบรายคาบล็อกที่นำมาใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 รูปชิ้นงานจริงของสายอากาศต้นแบบแบบหุกระด้ายที่นำมาใช้ในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุป

#### 6.1 สรุปผลจากการออกแบบและการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลที่ได้รับจากการออกแบบและเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะพบว่ามียังมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานสำหรับระบบแถบกว้างยิ่งเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามต้องการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานสำหรับระบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้วิธีการของไมโครสตริป เราสามารถนำหลักการระบายคาบลิอมาเพื่อใช้ออกแบบขนาดแพตช์ให้สายอากาศทำงานโดยเรียงลำดับตามความถี่แบบระบายคาบลิอ แต่ในส่วนของการออกแบบ โครงสร้างของเส้นพีดจะต้องนำหลักการของสายส่ง (Transmission line) มาช่วยในการออกแบบ เพื่อให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์

2. ปัจจัยที่มีผลสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการออกแบบสายอากาศแบบไมโครสตริปก็คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ในการออกแบบ ถ้าหากเลือกใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูง จะทำให้สายอากาศที่ออกแบบได้ มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ต่ำ

3. รูปร่างของแพตช์มีผลต่อการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศแบบไมโครสตริป ซึ่งเห็นได้จากการผลการทดลองของสายอากาศชนิดหุกระต่าย

#### 6.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการดำเนินโครงการ

1. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการช่วยออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงมากนัก ทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผล ที่ยาวนาน

2. เอกสารคู่มือประกอบการใช้งาน โปรแกรมเพื่อเลียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์มีจำนวนน้อย ทำให้ไม่สามารถใช้งานโปรแกรมได้เต็มประสิทธิภาพ

#### 6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้งานสำหรับแถบความถี่แบบกว้างยิ่ง โดยใช้วิธีการของไมโครสตริป เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและเพื่อให้ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำ ควรเลือกใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกที่มีค่าสูงๆ

2. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการประมวลผลเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ควรจะต้องมีประสิทธิภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบสร้างชิ้นงาน ในการบัดกรีหัวต่อ SMA เข้ากับชิ้นงานสายอากาศต้นแบบ จะต้องระวังไม่ให้สายนำสัญญาณและกราวด์ต่อถึงกัน และจะต้องบัดกรีให้แกนกลางตั้งฉากกันกับสายอากาศ เพราะจะมีผลต่อการวัดสนามไฟฟ้าของสายอากาศและการวัดทดสอบค่าความสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ อิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และในการทดสอบควรเลือกสถานที่ที่ไม่มีความถี่ใช้งานอื่นมารบกวนการทดสอบ หรือควรทดสอบในห้องที่ใช้สำหรับทดสอบเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Constantine A. Balanis. 2005. **“Antenna Theory Analysis and Design,”** 3rd ed. New Jersey, USA : A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- [2] John D. Kraus and Ronald J. Marhefka. 2003. **“Antennas for All Applications,”** 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill Companies, Inc..
- [3] Randy Bancroft. 2004. **“Microstrip and Printed Antenna Design,”** Atlanta, USA : Noble Publishing Corporation.
- [4] Zhi Ning Chen. 2007. **“Antenna for Portable Devices,”** West Sussex, England : John Wiley & Sons Ltd.
- [5] Hubregt J. Visser. 2005. **“Array and Phased Array Antenna Basics,”** West Sussex, England : John Wiley & Sons Ltd.
- [6] Zhi Ning Chen and Michael Y. W. Chia. 2006. **“Broadband Planar Antennas,”** West Sussex, England : John Wiley & Son Ltd.
- [7] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Inder Bahl and Apisak Ittipiboon. 2001. **“Microstrip Antenna Design Handbook,”** Norwood, USA : Artech House, Inc.
- [8] R. B. Waterhouse. 2003. **“Microstrip Patch Antennas: A Designer’s Guide,”** Norwell, USA : Kluwer Academic Publishers.
- [9] Kai Fong Lee and Wei Chen. 1997. **“Advances in Microstrip and Printed Antenna,”** New York, USA : John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Frantisek Hutira, Jan Bezek and Vladimir Bilik, **“Advances Design and Investigation of a Log-Periodic Antenna for DCS, PCS and UMTS Mobile Communications Bands,”** Bratislava, Slovakia.
- [11] Vibha Rani Gupta, Susanta Kumar Sahoo and Nisha Gupta. **“Design of Compact Microstrip Patch Array for Wide band Communication,”** Ranchi, India.
- [12] M I Ali and S Ohshima. 2005. **“Effect of inset feeding on antenna properties in a superconducting microstrip antenna,”** Yonezawa, Japan.
- [13] ณรงค์ศักดิ์ มโนสิทธิ์ชัย. 2548. **“สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปบนวัสดุฐานรองกระจก สำหรับสายอากาศรวมแบบแอกทีฟ,”** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] ฉัตรชัย ไวยาพัฒนากร. 2547. “การวิเคราะห์สายอากาศ,” กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์วิทยาลัย.
- [15] โมไนย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์. 2540. “ทฤษฎีสายอากาศ,” กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] ปกรณ์ เปรมสมบัติ และพงศ์ฤช อยู่ประจำ. 2548. “การออกแบบ และสร้างสายอากาศแบบกว้างสำหรับ วิทยุแถบกว้างยิ่ง,” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] พิทักษ์ อนุรักษย์, เฉลิมพล ชื่นอารมณ์ และอริญ เหลืองอนุศาสตร์ 2550. “การศึกษาทดลองวัดของการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผิวอาคารในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง,” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] กระวี ศรีสุวรรณ, กำพล สอนดี และไตรรัตน์ นิลไพโรจน์. 2540. “การออกแบบสายอากาศลิออกเพอริโอดิก,” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ดนัย เรืองเดชอนันต์ และสราวุธ วงศ์วิชัยรัตน์. 2538. “การออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศลิออกเพอริโอดิก,” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] พิทักษ์ อนุรักษย์, เฉลิมพล ชื่นอารมณ์ และอริญ เหลืองอนุศาสตร์. 2550. “การศึกษาทดลองวัดของการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากผิวอาคารในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง,” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] <http://elearning.spu.ac.th/homepage/een424/lesson2.htm>
- [22] M. K. A. Rahim and P. Gardner. 2003. “Microstrip Log Periotic Antenna Using Circuit Simulator,” Birmingham, England.
- [23] M. K. A. Rahim and P. Gardner. 2004. “Microstrip Bandwidth Enhancement Using Log Periotic Technique with Inset Feed,” Malaysia : Jurnal Teknologi.
- [24] Thomas A. Milligan. 2005. “Modern Antenna Design,” 2nd ed. New Jersey, USA : A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้