



## การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

โดย

นางสาวยุวดี กริชาธร B4909682  
นายเทพประทาน มุ่งนคร B4917021  
นายเจษฎา มณฑาทูวรรณ B4916246

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม  
และวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ประจำภาคการศึกษาที่ 2 และ 3 ปีการศึกษา 2552

โครงการ	การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น	
โดย	นางสาวยุวดี กริธาธร	B4909682
	นายเทพประทาน มุ่งนคร	B4917021
	นายเจษฎา มณฑาสวรรณ	B4916246
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม	
ภาคเรียนที่	2/2552 และ 3/2552	

---

### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น โดยนำหลักความรู้ความเข้าใจในเรื่องสายอากาศที่ได้ศึกษาเรียนรู้มาประยุกต์ใช้เข้ากับโปรแกรมทางการคำนวณผล (MATLAB GUI) ซึ่งโปรแกรมช่วยสอนนี้จะช่วยให้ ผู้ศึกษาสามารถ มองเห็นค่าพารามิเตอร์และ ภาพความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ ในสายอากาศชนิดต่าง ๆ อย่างคร่าว ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถเข้าใจในหลักการของสายอากาศได้ดียิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก อาจารย์ที่ปรึกษา โครงการ คณะผู้จัดทำโครงการใคร่ขอขอบพระคุณ เป็นอย่างสูงที่ให้แนวความคิดในการจัดทำโครงการ ผู้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ปัญหา และให้ข้อเสนอแนะแนวทางต่างๆจนทำให้การจัดทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญที่นำมาใช้ในการจัดทำโครงการนี้ และให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด พี่นักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกวิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

ขอบคุณ นายรัช ชูจิต ที่ช่วยแนะนำและให้ทำความเข้าใจการใช้งานโปรแกรม MATLAB ในตอนเริ่มทำโครงการทำให้ผู้จัดทำสามารถทำงานได้ง่ายขึ้น

ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และขอขอบพระคุณ ผู้ที่มีส่วนร่วมทุกท่านที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่ได้กล่าวมาไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวยุวดี กริชาธร

นายเทพประทาน มุ่งนคร

นายเจษฎา มณฑาสวรรณ

## สารบัญ

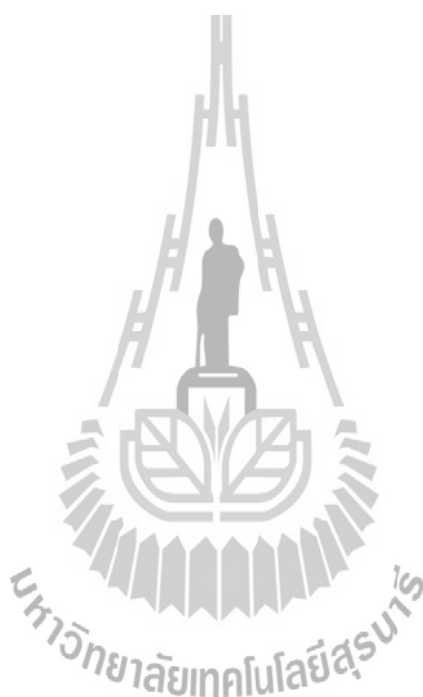
	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 คำอธิบายความหมายของตัวแปรต่างๆ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ	5
2.2.1 สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)	5
2.2.2 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)	15
2.2.3 สายอากาศแบบปวง (Loop Antenna)	24
2.2.4 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna )	43
2.3 สรุป	62
<b>บทที่ 3 การศึกษาและออกแบบโครงงาน</b>	<b>63</b>
3.    1 กล่าวนำ	63
3.2 การศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB (GUI)	63
3.2.1 ฟังก์ชันที่สำคัญในการสร้าง GUI	66
3.2.2 เครื่องมือในการออกแบบ GUI	69
3.2.3 ตัวเลื่อน (Slider)	72
3.2.4 ปุ่มวิทยุ (Radio Button)	73

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.5 กล่องตรวจสอบ (Check Box)	74
3.2.6 ตัวอักษรที่สามารถแก้ไขได้ (Edit Text)	75
3.2.7 ตัวอักษรที่แก้ไขไม่ได้ (Static Text)	76
3.2.8 เมนุรายการที่เลื่อนได้ (Pop-up Menu)	76
3.2.9 กล่องรายการ (List box)	78
3.2.10 ปุ่มสวิตช์ (Toggle Button)	78
3.2.11 กรอบ (Panel)	79
3.2.12 ฟังก์ชันทั่วไปในการ Callback ของ Handle Graphic Object	80
3.3 การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นด้วย MATLAB (GUI)	80
3.3.1 การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น	80
3.3.1.1 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate1.fig)	80
3.3.1.2 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate2.fig) ชนิดของสายอากาศ	88
ที่ทำการศึกษา	88
3.3.1.3 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (caldipole.fig) การคำนวณ	101
ค่าพารามิเตอร์สายอากาศไดโพล	101
3.4 การทำงานของโปรแกรม	110
3.5 สรุป	111
<b>บทที่ 4 การทดสอบการใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น</b>	<b>112</b>
4.1 กล่าวนำ	112
4.2 วิธีการใช้งานโปรแกรม	112
4.2.1 ตัวอย่างวิธีการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้	112
สายอากาศเบื้องต้น	112
4.3 การทดสอบการใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น	116
4.4 สรุป	131

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 5 บทสรุป</b>	132
5.1 สรุป	132
5.2 ปัญหาที่พบบ่อยระหว่างการทดสอบ	132
5.3 ข้อเสนอแนะ	133
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	134
<b>บรรณานุกรม</b>	135
<b>ภาคผนวก</b>	136
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	157



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมีบทบาทกับชีวิตประจำวันมาก และจำนวนของผู้ใช้บริการมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จึงทำให้มีผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการสื่อสารไร้สายเพิ่มขึ้น เมื่อกล่าวถึงการสื่อสารแบบไร้สายแล้ว เป็นไปไม่ได้เลยถ้าไม่กล่าวถึงสายอากาศ เพราะสายอากาศเป็นหลักสำคัญของการสื่อสารแบบไร้สาย แต่การที่จะทำความเข้าใจในหลักการของสายอากาศนั้น เป็นเรื่องที่ยากและจำเป็นต้องใช้เวลาในการศึกษาและทำความเข้าใจในหลักการของสายอากาศ เพื่อนำไปต่อยอดความรู้ในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศต่อไป ดังนั้นสื่อการเรียนรู้ที่สามารถเข้าถึงบุคคลที่สนใจเกี่ยวกับวิชาสายอากาศได้ง่าย สะดวก และประหยัดเวลามากที่สุด คือการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เนื่องจากข้อดีของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ ง่ายและสะดวกเมื่อต้องการแสดงภาพความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ ทำให้ผู้ศึกษามีความเข้าใจอย่างชัดเจนและสามารถปรับเปลี่ยนได้ตาม ความต้องการของผู้ศึกษา ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นกับการศึกษาผ่านทางตำราเรียน จากข้อดีดังกล่าว โครงการนี้จะทำการศึกษาและออกแบบ โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น เพื่อให้ผู้ที่สนใจการสื่อสารแบบไร้สาย ได้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสายอากาศได้ง่ายขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาสายอากาศแต่ละชนิด รวมถึงสมการต่าง ๆ ที่ต้องใช้ในการออกแบบ
- 2 เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB รวมถึงทักษะการเขียนโปรแกรม
- 3 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาในภาคทฤษฎี ในรายวิชาต่าง ๆ มาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ได้จริง
- 4 สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประกอบวิชาชีพได้

### 1.3 ขอบเขตงาน

- 1 ศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับสายอากาศชนิดต่าง ๆ
- 2 ศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม MATLAB
- 3 ทดสอบนำสมการของสายอากาศชนิดต่างๆ เช่น ไดโพล ไมโครสตริป สายอากาศแบบบ่วง เป็นต้น มาวิเคราะห์และออกแบบด้วยการคำนวณและการใช้โปรแกรมประมวลผล MATLAB (GUI)

- 4 ทดสอบโปรแกรมโดยผู้ที่พอมีความรู้เกี่ยวกับสายอากาศ
- 5 วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น โดยดูจากสิ่งที่ได้รับจากการใช้โปรแกรม ทั้งพล็อตกราฟ และ  
คำนวณ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมถึง ความผิดพลาด จากโปรแกรมที่เขียนขึ้นมา
- 6 นำผลจากการทดลองมาปรับปรุงแก้ไขให้ถูกต้องและสวยงาม

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแต่ละชนิดเพิ่มมากขึ้น
2. มีความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐานทางด้าน  
วิศวกรรมศาสตร์
3. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ
4. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการประกอบอาชีพ

#### 1.5 คำอธิบายความหมายของตัวแปรต่าง ๆ

$P$  = Power (in radial directional)

$P_{rad}$  = The average power radiated by an antenna (radiated power)

$U$  = Radiation intensity (w/unit solid angle)

$W_{rad}$  = Radiation density (w/m<sup>2</sup>)

$E$  = Far-zone electric field

$E_{\theta}, E_{\phi}$  = Far – zone electric field components of the antenna

$\eta$  = Intrinsic impedance of the medium

$E_r$  = E – field component

$H_{\phi}, H_r$  = H – field component

$R$  = Observation distance from target (m)

$\hat{a}$  = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยทิศตามแกน z

$\mathcal{E}$  = Emissivity



$\mu$	=	permittivity
$I_e$	=	Electric current
$I_0$	=	constant current
$L$	=	ความยาวของ dipole
$W_{av}$	=	The average pointing vector
$\lambda$	=	ความยาวคลื่น
$\beta_0$	=	ค่าคงที่
$F(\theta, \phi)$	=	Related to the radiation intensity
$D_0$	=	ค่า Directivity (dimensionless)
$\phi$	=	Phase shift ของสัญญาณที่เข้าไปในแต่ละ elements
$d$	=	Spacing
$AF$	=	Array factor
$W$	=	Power Density
$\gamma$	=	$kl/2$
$\beta$	=	The difference in phase excitation between the element
$\alpha$	=	$jk \cos \theta$
$Z_s$	=	อิมพีแดนซ์ที่ต้นสาย
$Z_T$	=	อิมพีแดนซ์ที่ปลายสาย
$Z_0$	=	อิมพีแดนซ์ลักษณะ (Characteristic impedance) หรือ อิมพีแดนซ์ ลูกคลื่น (Surge impedance)
$\beta$	=	ค่าคงตัวเฟส

- $d$  = ความยาวของสายส่ง  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่น  
 $\alpha$  = ค่าคงตัวลดทอน  
 $\Gamma_T$  = สปส. การสะท้อนที่ปลายสาย  
 $V_T^+$  = คลื่นของแรงดันตกกระทบ (ต้นสายไปปลายสาย)  
 $V_T^-$  = คลื่นของแรงดันสะท้อนกลับ (ปลายสายกลับมายังต้นสาย)  
 $I_T^+$  = คลื่นของกระแสตกกระทบ  
 $I_T^-$  = คลื่นของกระแสสะท้อนกลับ  
 $\Gamma$  = สปส. การสะท้อน  
 $Z$  = แสดงทิศทางตามแกน  $z$   
 $V_{\max}$  = แรงดันที่มีค่ามากที่สุดที่จุดใดในสายส่ง  
 $V_{\min}$  = แรงดันที่มีค่าน้อยที่สุดที่จุดใดในสายส่ง  
 $I_{\max}$  = กระแสที่มีค่ามากที่สุดในสายส่ง  
 $I_{\min}$  = กระแสที่มีค่าน้อยที่สุดในสายส่ง  
 $Z_{\max}$  = อิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งที่เกิดจากแรงดันสูงสุดและกระแสต่ำสุดอินเฟสกัน  
 ทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงสุด  
 $Z_{\min}$  = อิมพีแดนซ์ที่จุดในสายเป็นค่าจริงและเป็นค่าต่ำสุด  
 $d_1$  = ระยะทางจากโหลด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความรู้เบื้องต้นของสายอากาศ (Antenna) ชนิดต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา พารามิเตอร์ (parameter) ที่จำเป็นในการเรียนรู้ แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ของสายอากาศแต่ละชนิด และรายละเอียดที่จำเป็นต้องทราบเบื้องต้นในการศึกษาสายอากาศ ซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนา และจะเป็นประโยชน์ต่อไปในการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นในโครงการงานชิ้นนี้

#### 2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแผ่กระจายกำลังงานและรับคลื่นวิทยุ โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านระหว่างท่อนำคลื่น หรือสายส่งกับอากาศอิสระ (Free Space) โดยทั่วไปสายอากาศชนิดหนึ่ง ๆ สามารถใช้ในการส่งหรือรับสัญญาณได้เหมือนกัน แต่สิ่งที่สำคัญมากสำหรับการใช้งานทั้งสองกรณีนั้นก็คือ ทิศทางและการวางตัวของสายอากาศทั้งสองในขณะที่ทำการรับส่งสัญญาณนั้น ระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ในทิศทางที่ถูกต้องจะมีมากกว่าในทิศทางอื่นๆ หากใช้สายอากาศส่งก็จะมีกำลังงานที่แผ่กระจายออกไปในทิศทางดังกล่าวสูงกว่าทิศทางอื่นๆ ด้วยเช่นกัน นั่นแสดงว่าทิศทางที่แผ่กระจายคลื่นได้สูงสุดของสายอากาศส่ง จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสายอากาศรับที่รับคลื่นได้สูงสุด

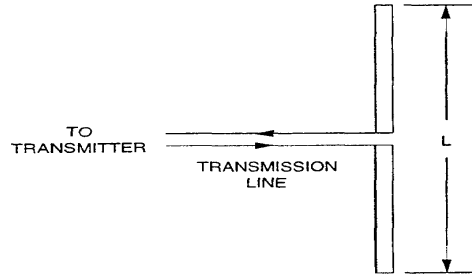
##### 2.2.1 ความรู้เกี่ยวกับสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

###### สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด มีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว  $L$  วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.1 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพล จะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่ง โดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพล ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันโดยที่ปลาย

ทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.1 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบของไดโพล จีว (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงกระแสที่เท่ากันตลอดความยาวคุณลักษณะทางทฤษฎี ของไดโพล อุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

#### การแจกแจงกระแส (Current distribution)

สำหรับสายอากาศไดโพลที่บางมากๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณศูนย์) มีค่ากระแสที่สามารถ ประมาณ ได้ด้วยสมการ

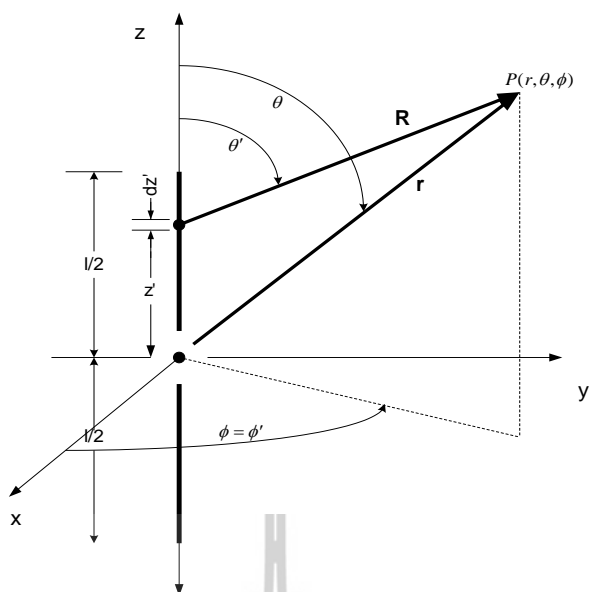
$$\begin{aligned} I_e(x', y', z') &= \hat{a}_z I_0 \sin[k(l/2 - z')] \quad , \quad 2 \leq z' \leq l/2 \\ &= \hat{a}_z I_0 \sin[k(l/2 + z')] \quad , \quad -l/2 \leq z' \leq 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดยที่

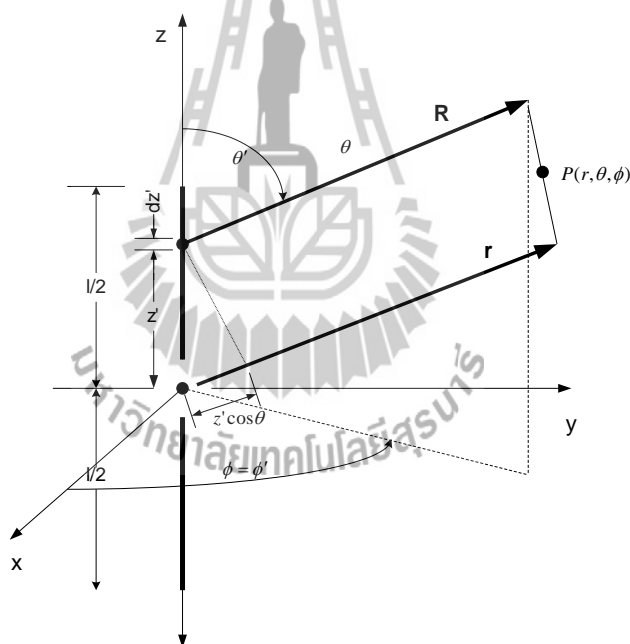
$(x, y, z)$  แสดงถึงพิกัดของจุดสังเกต

$(x', y', z')$  แสดงถึงพิกัดของแหล่งจ่าย (ตำแหน่งของไดโพล)

เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2: โครงสร้างของสายอากาศไดโพลความยาวจำกัด



รูปที่ 2.3: การประมาณสนามระยะไกลของสายอากาศไดโพล

### Radiated Fields: (Element Factor, Space Factor, And Pattern Multiplication)

เมื่อเราแบ่งสายอากาศไดโพลให้มีขนาดเล็กลง  $\Delta z'$  จำนวนของสายอากาศไดโพลจะมากขึ้น โดยมีความยาวประมาณ  $dz'$

สำหรับไดโพลจิ๋วที่มีความยาว  $dz'$  ตามแกน  $z$  ที่ตำแหน่ง  $z'$  จะมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังสมการ (2.2)

$$\left. \begin{aligned} dE_\theta &\approx j\eta k I_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta dz' \\ dE_r &\approx dE_\phi = dH_r = dH_\theta = 0 \\ dH_\phi &\approx j(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \sin\theta dz' \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} R &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \\ &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z-z')^2} \\ &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2) - 2zz' - z'^2} \\ &= \sqrt{r^2 - 2rz'\cos\theta + z'^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ z &= r \cos\theta \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อเราประมาณค่า  $R \approx r$  สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$dE_\theta \cong j\eta \frac{k I_e(x', y', z') e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta e^{+jkz'\cos\theta} dz' \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} E_\theta &= \int_{-1/2}^{+1/2} dE_\theta \\ &= j\eta \frac{k e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \left[ \int_{-1/2}^{+1/2} I_e(x', y', z') e^{jkz'\cos\theta} dz' \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Element factor คือ 
$$j\eta \frac{k e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \quad (2.7)$$

Space factor คือ 
$$\left[ \int_{-1/2}^{+1/2} I_e(x', y', z') e^{jkz'\cos\theta} dz' \right] \quad (2.8)$$

Element factor จะเท่ากับสนามของ ไดโพลที่มีความยาวหนึ่งหน่วย ที่อยู่ตำแหน่ง อ้างอิง (Reference) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและทิศทางการไหลของกระแส ในขณะที่ Space factor เป็นฟังก์ชัน (Function) ของกระแสจากแหล่งจ่าย (Source)

สนามรวมของสายอากาศสามารถหาได้จากสมการ

Total field = (Element factor)\*(Space factor)

$$E_{\theta} \cong j\eta \frac{kI_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left[ \int_{-l/2}^0 \sin \left( k \left( \frac{l}{2} + z' \right) \right) e^{+jkz' \cos \theta} dz' + \int_0^{+l/2} \sin \left( k \left( \frac{l}{2} - z' \right) \right) e^{+jkz' \cos \theta} dz' \right] \quad (2.9)$$

$$E_{\theta} \cong j\eta \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos \left( \frac{kl}{2} \cos \theta \right) - \cos \left( \frac{kl}{2} \right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.10)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง  $E_{\theta}$  และ  $H_{\phi}$  ในสนามระยะไกล (Far-field)

$$\eta \cong \frac{E_{\theta}}{H_{\phi}}$$

$$H_{\phi} \cong \frac{E_{\theta}}{\eta} \cong j \frac{I_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos \left( \frac{kl}{2} \cos \theta \right) - \cos \left( \frac{kl}{2} \right)}{\sin \theta} \right] \quad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้

$$k = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$k^2 = \omega^2 \mu / \epsilon$$

$$\eta \cong 120\pi \quad (ohm)$$

### POWER DENSITY, RADIATION INTENSITY, AND RADIATION RESISTANCE

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem)

ถ้าหับสายอากาศไดโพลค่าเฉลี่ยของ Poynting vector สามารถเขียนได้โดย

$$\begin{aligned}
 w_{av} &= \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \\
 &= \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{a}_\theta E_\theta \hat{a}_\phi H_\phi^*] \\
 &= \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{a}_\theta E_\theta \hat{a}_\phi \frac{E_\theta^*}{h}]
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned}
 w_{av} &= \hat{a}_r W_{av} \\
 &= \hat{a}_r \frac{1}{2\eta} |E_\theta|^2 \\
 &= \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2 r^2} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 \hat{a}_r
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

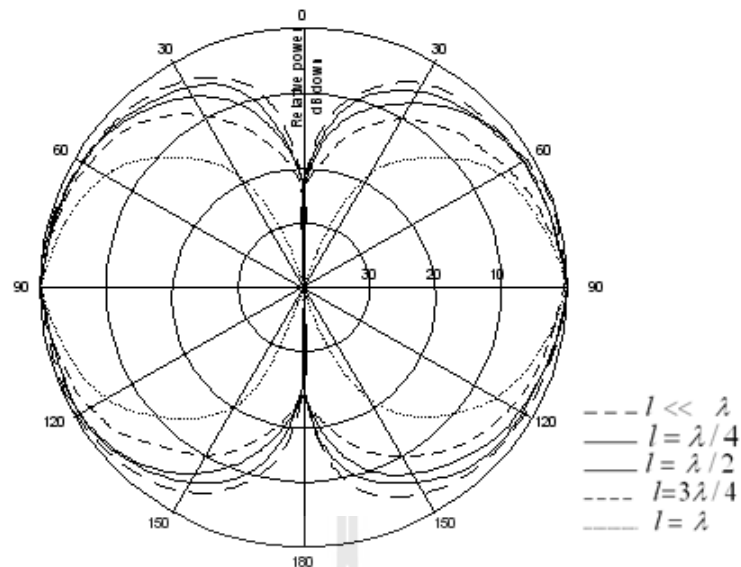
และค่า Radiation intensity จะเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 U &= r^2 W_{av} \\
 &= \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 \hat{a}_r
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบ  
ที่ 2.4

E-plane ณ  $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$  ดังแสดงในรูป





รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานของสายอากาศไดโพลในระนาบ E-plane ที่ความยาวต่าง ๆ ( $L = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$ )

จากรูปที่ 2.3 สามารถกล่าวได้ว่า เมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ ความกว้างลำคลื่น (Beam width) แคบเข้า เนื่องจาก สภาพเงาเงทศทาง จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของ สายอากาศ ไดโพล ดังตัวอย่างต่อไปนี้ที่อ้างอิงกำลังงาน ที่ค่า 3 dB ค่า ความกว้างลำคลื่น จะเปลี่ยนดังนี้

$$l \ll \lambda \quad 3\text{-dB beamwidth} = 90^\circ$$

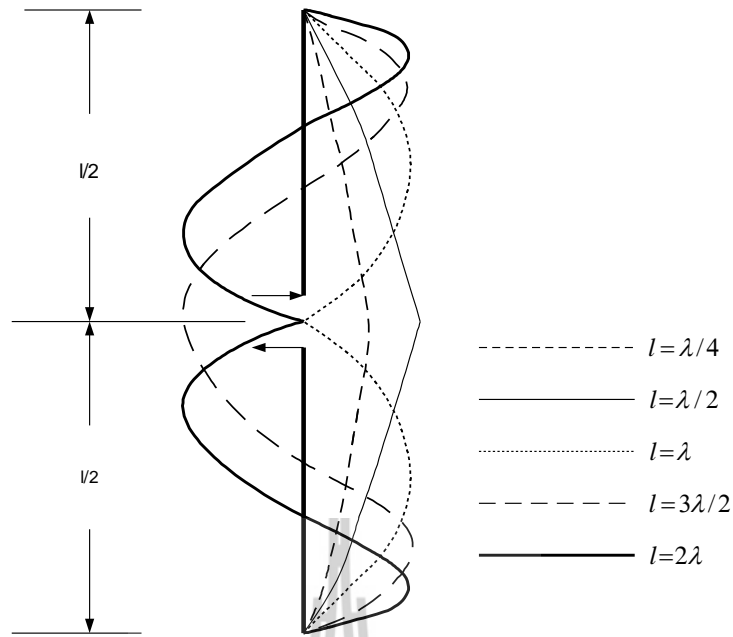
$$l = \lambda/4 \quad 3\text{-dB beamwidth} = 87^\circ$$

$$l = \lambda/2 \quad 3\text{-dB beamwidth} = 78^\circ$$

$$l = 3\lambda/4 \quad 3\text{-dB beamwidth} = 64^\circ$$

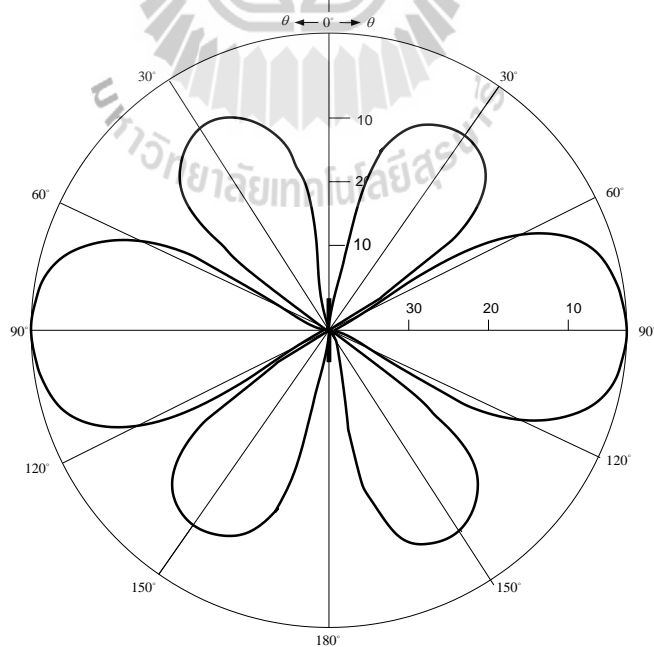
$$l = \lambda \quad 3\text{-dB beamwidth} = 47.8^\circ$$

ค่าการแจกแจงกระแสสำหรับสายอากาศไดโพลที่มีค่า  $l$  ตามข้างบนดังแสดงตามรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 การแจกแจงกระแสสำหรับสายอากาศไดโพลที่มีค่า  $l$  ใดๆ

เมื่อความยาวของ สายอากาศไดโพลมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ( $l > \lambda$ ) จำนวน โหลบ(Lobes) ก็จะเพิ่มขึ้น ดังอย่างเช่น  $l = 1.25\lambda$  จะมี แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบ Elevation plane ที่ความยาว  $l = 1.25\lambda$

การหาค่าพลังงานสูงสุดการแผ่กระจายคลื่น (Total power radiation) โดยการนำค่าเฉลี่ยของ Poynting vector มา อินทิเกรต (Integrate) บนพื้นที่ที่มี รัศมี (radius “r”)

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= \iiint_s w_{av} ds \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \hat{a}_r W_{av} \cdot \hat{a}_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W_{av} \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

จาก  $W_{av} = \hat{a}_r W_{av}$  สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi W_{av} r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\
 &= \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^\pi \frac{\left[ \cos\left(\frac{kl}{2} \cos \theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]^2}{\sin \theta} d\theta
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

### สภาพเจาะงทิศทางของสายอากาศไดโพล (DIRECTIVITY OF A SINGLE DIPOLE)

แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน (Radiation Pattern) ของไดโพลจะมีค่า directional เพิ่มขึ้นตามความยาวที่เพิ่มขึ้นของสายอากาศไดโพล ค่าสภาพเจาะงทิศทาง ถูกกำหนดได้โดยสมการ (2.17)

$$D_0 = 4\pi \frac{F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \tag{2.17}$$

ที่  $F(\theta, \phi)$  มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะงทิศทาง (Radiation intensity ( $U$ ))

$$U = \beta_0 F(\theta, \phi) \tag{2.18}$$

สายอากาศไดโพลที่มีความยาว  $l$

$$F(\theta, \phi) = F(\theta) = \frac{\left[ \cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right) \right]^2}{\sin\theta} \quad (2.19)$$

และ  $U_0 = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2}$  เนื่องจากแบบรูปจะไม่ใช่ ฟังก์ชัน ของ  $\phi$  จะได้

$$D_0 = \frac{2F(\theta)|_{\max}}{\int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (2.20)$$

ตัวอย่างในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล

จงหาค่า สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity,  $D_0$ ), พื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Effective Area,  $A_{em}$ ) และความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance,  $R_r$ )

วิธีทำ โดยกำหนดให้

$U$  แทน ความเข้มการแผ่พลังงาน

$P_{rad}$  แทน กำลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกจากสายอากาศ

$C_{in}(2\pi) = 2.435$  แทน ค่าคงที่ของออยเลอร์

$I_0$  แทน กระแสสูงสุดของสายอากาศ

เราสามารถหาสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity,  $D_0$ ) ได้จากสมการ

$$D_0 = 4\pi \frac{U|_{\max}}{P_{rad}} = \frac{U|_{\theta=\frac{\pi}{2}}}{P_{rad}} \frac{4}{C_{in}(2\pi)} = \frac{4}{2.435} = 1.643 \quad \#$$

เราสามารถหาพื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Effective Area,  $A_{em}$ ) ได้จากสมการ

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} (1.643) = 0.13\lambda^2 \quad \#$$

เราสามารถหาความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance,  $R_r$ ) ได้จากสมการ

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{4\pi} C_{in}(2\pi) = 30(2.4335) \approx 73\Omega \quad \#$$

### 2.2.2. ความรู้เกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

สายอากาศไมโครสตริป เป็น สายอากาศที่มีวิธีการและทฤษฎีที่ดีกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ โดยใช้แผ่น ทองแดง (Copper) หรือแผ่น Dielectric Substrates ที่มีขนาดกว้างยาวคงที่ และได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในปัจจุบัน

#### คุณสมบัติที่พิเศษกว่า Antenna ชนิดอื่นๆ มีดังนี้

- น้ำหนักเบา
- ขนาดเล็ก
- สามารถนำมาดัดแปลงรูปร่างให้สมคูลได้
- ราคาถูก
- การผลิตง่าย
- สามารถทำให้บางได้
- ไม่มีเสียงรบกวนจากเครื่องบินหรือยานพาหนะต่างๆ
- สามารถดัดแปลงใช้ในการนำวิถีจรวดหรือดาวเทียมได้
- มีค่า scattering cross section ต่ำ
- แพร่กระจายคลื่นได้ทั้งแบบเส้นตรงและวงกลม
- สามารถรวมกับความถี่อื่นๆได้
- ไม่ต้องมี cavity backing
- Compatible with modular design
- Feed line and matching network are fabricated simultaneously with the antenna structure

#### ข้อเสียของ Microstrip antenna

- Narrow bandwidth
- มี loss มากซึ่งส่งผลให้ได้ gain ต่ำ
- Most microstrip antenna radiate into a half plane
- Poor endfire radiation performance
- Practical limitations on the maximum gain (~20 dB)
- Poor isolation between the feed and the radiating elements
- Possibility excitation of surface waves
- Low power handling capability

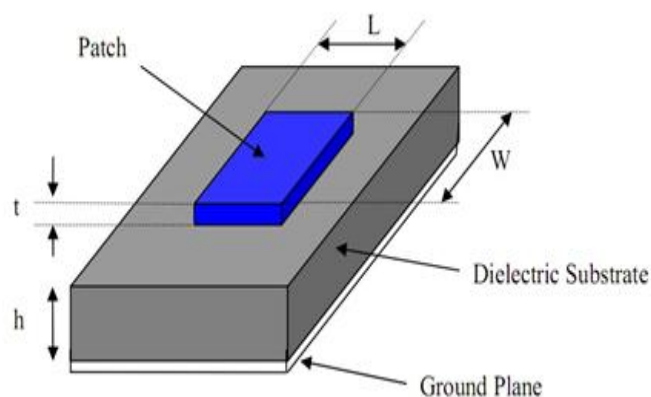
## การประยุกต์ใช้ Microstrip Antenna

- มีการนำ Microstrip Antenna มาใช้งานทางด้านต่างๆดังนี้
- ดาวเทียมติดต่อดสื่อสาร
- Doppler and other radars
- Command and control
- Missile telemetry
- Weapon fuzing
- Manpack equipment
- Environments instrumentation and remote sensing
- Feed elements in complex antenna
- Satellite navigation receiver
- Biomedical radiation

ซึ่งคาดว่าต่อไปในอนาคตจะมีการนำ สายอากาศไมโครสตริป มาใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น เนื่องจากความหนาของ สายอากาศไมโครสตริป บางมาก คลื่นที่เกิดขึ้นภายในสาร Dielectric (คือสารที่อยู่ระหว่าง Patched Antenna และ Ground Plane) สามารถพิจารณาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบของ สายอากาศไมโครสตริป ซึ่งเป็นเพียงกลุ่มเล็ก ๆ ที่แสดงถึงพลังงานที่ถูกแพร่กระจาย (Fringing Field) ดังนั้นสายอากาศที่พิจารณาจึงมีประสิทธิภาพต่ำ

### Radiation fields

โครงสร้างของสนามภายใน Substrate ระหว่าง Patched Antenna กับ Ground-plane แสดง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นสี่เหลี่ยม

เมื่อ  $W$  คือ ความกว้างของสายอากาศ  
 $h$  คือ ความหนาของแผ่นไมโครสตริป

ผลรวมสนามไฟฟ้า ของสายอากาศไมโครสตริปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_r \cong E_\theta \cong 0$$

$$E_\phi \cong -j \frac{h w k E_0 e^{-jkr}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \left[ \frac{\sin(x)}{x} \right] \left[ \frac{\sin(z)}{z} \right] \right\} \cos \left( \frac{kl}{z} \sin \theta \sin \phi \right) \quad (2.21)$$

โดย  $\cos \left( \frac{kl}{z} \sin \theta \sin \phi \right)$  เป็น Array Factor สำหรับ 2 ช่อง (2 slot) และ

$$x = \frac{kh}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$z = \frac{kw}{2} \cos \theta$$

ในกรณีที่  $h$  ที่มีค่าน้อยมาก  $h \ll \lambda$  (จะได้

$$E_\phi \cong -j 2 \frac{V_0 e^{-jkr}}{\pi r} \sin \theta \frac{\sin \left( \frac{kw}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \cos \left( \frac{kl}{2} \sin \theta \sin \phi \right) \quad (2.22)$$

$V_0 = hE_0$  เป็นค่า แรงดันที่ตกคร่อมช่องสัญญาณ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสาร Dielectric สามารถหาได้จากการสมมติค่าใดๆ ของสนามไฟฟ้าตามแกน  $x$  ( $E_x$  component) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ขึ้นกับค่า  $x$  และจะมีค่าระหว่างตัวสายอากาศ (Patched Antenna) และระนาบอ้างอิง (Ground plane)

สำหรับสายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยม (Rectangular Patched Antenna) ที่มีค่าความยาว ( $L$ ) และความกว้าง ( $W$ ) จะใช้ พิกัดในแนวสายอากาศแบบสี่เหลี่ยม โดยมีสมการคลื่น (Wave Equation) เป็น

$$\left( \nabla^2 + k_d^2 \right) E_x(y, z) = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_d^2 E_x(y, z) \\ = 0 & \text{(away from the feed)} \\ = j\omega m_0 j & \text{(at the feed)} \end{cases} \quad (2.23)$$

โดยที่  $kd = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon}$  และ  $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$

ผลเฉลยของสมการ Homogeneous wave (สมการที่ 2.23) สามารถเขียนได้ดังนี้ และค่าที่ได้จะขึ้นกับ Boundary Conditions

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial z}\Big|_{z=0} &= \frac{\partial E_x}{\partial z}\Big|_{z=w} = 0 \\ H_y(z=0) &= H_y(z=w) = 0 \\ \frac{\partial E_x}{\partial y}\Big|_{y=0} &= \frac{\partial E_x}{\partial y}\Big|_{y=l} = 0 \\ H_z(y=0) &= H_z(y=l) = 0\end{aligned}$$

$$E_{subx} = A_{mn} \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{l} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{w} z\right)$$

$$k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu_0 \epsilon = (2\pi fr)^2 \mu_0 \epsilon \quad (2.24)$$

หรือ

$$(f_r)_{mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2}$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$A_{mn}$  แสดงค่าคงที่สูงสุด

$(f_r)_{mn}$  เป็นความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) ของ  $mn_{th}$  mode

พิจารณาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสมการที่ (2.24) และสมการของแมกเวลล์ (Maxwell's curl) ที่  $M=0$  จะได้

$$H_x = 0$$

$$H_y = -j \frac{1}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z}$$

$$= j \frac{\eta\pi}{w\mu\omega} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{l} y\right) \sin\left(\frac{\eta\pi}{w} z\right)$$

$$H_z = j \frac{1}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j \frac{m\pi}{l\mu\omega} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{l} y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{w} z\right) \quad (2.25)$$



### RADIATION CONDUCTANCE of Single Strip Patched Microstrip Antenna

ค่าคงที่ ที่สัมพันธ์กับ  $P_{rad}$  ของไมโครสตริปแบบสล็อตเดี่ยวโดยไม่เกี่ยวกับค่า Array-Factor จะได้ดังสมการที่ (2.26)

$$G = \frac{2P_{rad}}{|V_0|^2} = \frac{1}{120\pi^2} I$$

$$I = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \quad (2.26)$$

$$G \cong \frac{1}{90} \left(\frac{w}{\lambda}\right)^2; w \ll \lambda$$

$$G \cong \frac{1}{120} \left(\frac{w}{\lambda}\right)^2; w \gg \lambda$$

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไมโครสตริป

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแต่ละช่องของสายอากาศไมโครสตริปจะเท่ากับ

$$D_0 = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \left(\frac{2\pi w}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{I} \quad (2.27)$$

และ

$$D_0 \cong 3 \cong 4.77 \text{ dB}; w \ll \lambda$$

ตัวอย่างในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม

ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม คือ

ความถี่ที่ใช้งาน ( $f_0$ ): คือความถี่ที่เราต้องการให้สายอากาศของเราทำงาน โดยในกรณีนี้เราจะออกแบบให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 1.9 GHz

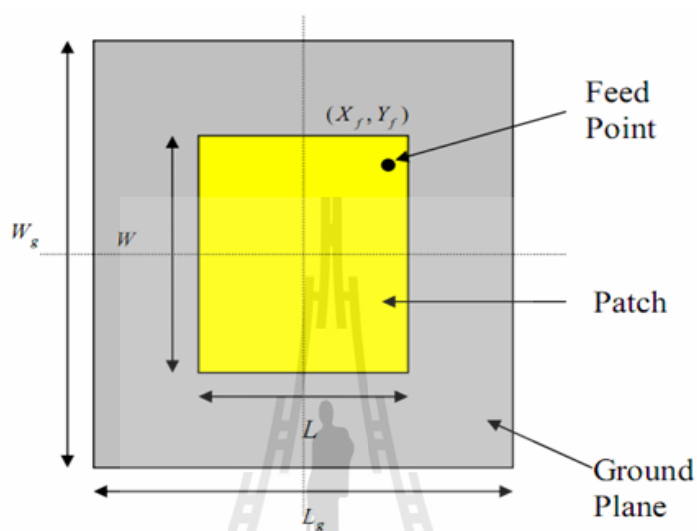
ค่า Dielectric constant ของ substrate ( $\epsilon_r$ ): คือค่าคงที่ของสาร Dielectric ที่ใช้ในการออกแบบในครั้งนี้ได้เลือก Silicon เป็น substrate ซึ่งมีค่า ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 11.9 โดยค่า ( $\epsilon_r$ ) ที่ทำการเลือกนี้มีค่าสูงซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดของแผ่นตัวนำของสายอากาศมีขนาดเล็กลง

ความหนาของ Dielectric substrate ( $h$ ): ในการออกแบบสายอากาศในที่นี้จะทำการ  
เลือกความหนาของ dielectric substrate เท่ากับ 1.5 mm  
ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการจะออกแบบคือ

$$(f_0) = 1.9 \text{ GHz}$$

$$(e_r) = 11.9$$

$$(h) = 1.5 \text{ mm}$$



Top view of Microstrip Patch Antenna

ขั้นที่ 1: กำหนดความกว้าง ( $W$ ) ความกว้างของแผ่นตัวของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{e_r + 1}{2}}}$$

เมื่อกำหนดให้

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$e_r = 11.9$$

$$f_0 = 1.9 \text{ GHz}$$

$$W = 0.0311 \text{ m}$$

$$= 31.1 \text{ mm}$$

#

ขั้นที่ 2 : คำนวณ Effective dielectric constant ( $e_{\text{reff}}$ ) : ตามสมการ

$$e_{\text{reff}} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} \frac{1 + \frac{12h}{W}}{1 + \frac{12h}{W} \cdot \frac{1}{2}}$$

เมื่อกำหนดให้

$$W = 31.1\text{mm}$$

$$e_r = 11.9$$

$$h = 1.5\text{mm}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871 \quad \#$$

ขั้นที่ 3 : คำนวณ Effective length ( $L_{\text{eff}}$ ) : ตามสมการ

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{e_{\text{reff}}}}$$

เมื่อกำหนดให้

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871$$

$$f_0 = 1.9\text{GHz}$$

$$L_{\text{eff}} = 0.024\text{m} = 24\text{mm} \quad \#$$

ขั้นที่

4 : คำนวณ length extension (D L) : ตามสมการ

$$D L = 0.412h \frac{(e_{\text{reff}} + 0.3) \frac{W}{h} + 0.264}{(e_{\text{reff}} - 0.258) \frac{W}{h} + 0.8}$$

เมื่อกำหนดให้

$$W = 31.1\text{mm}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871$$

$$h = 1.5\text{mm}$$

$$D L = 6.3455 \times 10^{-4} \text{mm} \quad \#$$

ขั้นที่ 5 : คำนวณ actual length of patch ( $L$ ) : ตามสมการ

$$L = L_{eff} - 2D L$$

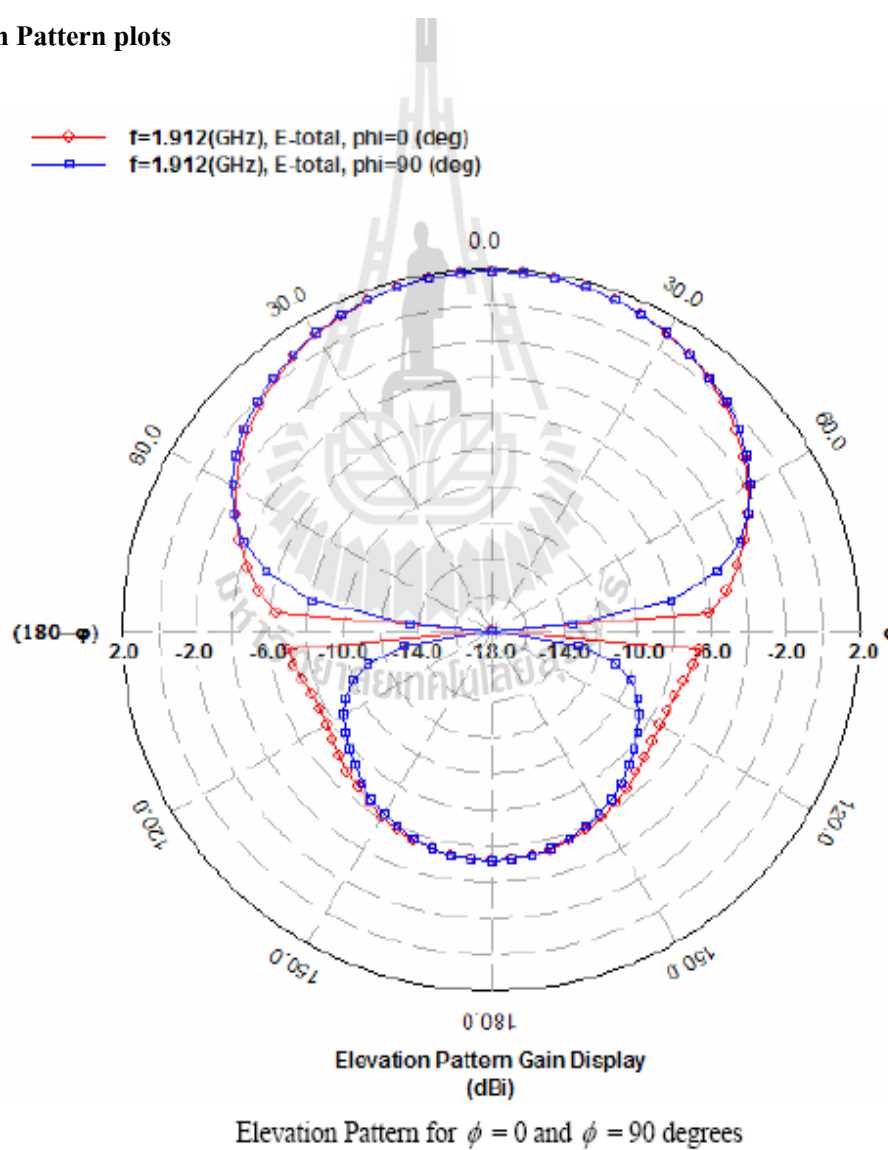
เมื่อกำหนดให้

$$L_{eff} = 24mm$$

$$D L = 6.3455 \times 10^{-4} mm$$

$$L = 0.0228m = 22.8mm \quad \#$$

Radiation Pattern plots



รูป 2.8: ในรูปเป็นการแสดงอัตรการขยายของสายอากาศที่ความถี่ 1.9120 GHz

### ตัวอย่างการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม

จงทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลมโดยใช้ Substrate (RT/duroid 5880) ซึ่งมีค่า dielectric constant = 2.2 และหนา 0.1588 cm (0.0625 in.) ให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ = 10 GHz

วิธีทำ

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}}$$

จากสมการหารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม ได้คิดค่าตัวแปร  $F$  ซึ่งเราสามารถหาตัวแปร  $F$  ได้จากสมการ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{8.791 \times 10^9}{10 \times 10^9 \sqrt{2.2}} = 0.593$$

นำค่าที่ได้จากการหาค่า

$F$  แทนในสมการหารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} = 0.525 \text{ cm} (0.207 \text{ in})$$

กำหนดให้  $a$  เป็นรัศมีของสายอากาศ จะได้ว่า

สายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลมที่มีรัศมี 0.525 cm ที่ทำงานที่ความถี่ 10 GHz #

### 2.2.3 ความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna)

สายอากาศแบบบ่วง(Loop Antenna) เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งในกลุ่มของสายอากาศชนิดที่เป็นเส้นลวดที่มีโครงสร้างง่าย ๆ ราคาไม่แพง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายลักษณะ สายอากาศแบบบ่วงมีรูปร่างหลายแบบ เช่น วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมจตุรัส หรือวงรี เป็นต้นในปัจจุบัน ได้มีการนำเอาสายอากาศแบบบ่วงไปใช้งานอย่างกว้างขวางในย่านความถี่ไมโครเวฟ (ตั้งแต่ 3 GHz ขึ้นไป) นอกจากนี้ยังนิยมนำไปใช้เป็นโพรบสำหรับวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟอีกด้วย

ปัจจุบันมีการแบ่งสายอากาศแบบบ่วงออกเป็น 2 กลุ่ม โดยใช้ขนาดของเส้นรอบรูปของบ่วงเป็นตัวกำหนด ได้แก่

1. บ่วงเล็ก (Small Loop) ความยาวรวมทั้งหมดของบ่วง จะต่ำกว่า หนึ่งในสิบของความยาวคลื่น ( $N \times C < 1/10$ )

2. บ่วงใหญ่ (Large Loop) เส้นรอบวงของบ่วง จะมีความยาวประมาณหนึ่งความยาวคลื่นที่เดินทางในอากาศว่าง ( $C \approx \lambda$ )

สำหรับสายอากาศแบบบ่วงเล็กที่มีโครงสร้างเพียงหนึ่งรอบนั้น จะมีค่าของความต้านทานการแผ่พลังงานที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับความต้านทานการสูญเสีย การเพิ่มค่าของความต้านทานดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของบ่วงให้มากขึ้น ซึ่งถูกเรียกว่า บ่วงหลายรอบ (Multi-Turn Loop) อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีความต้านทานการแผ่พลังงานที่ดีขึ้นแต่ประสิทธิภาพของสายอากาศในการส่งคลื่นยังอยู่ในระดับที่ไม่ดีนัก

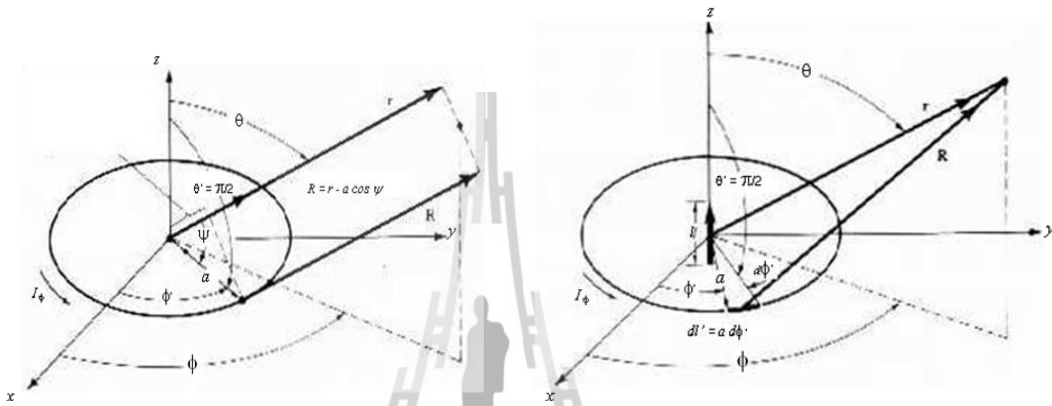
#### คุณสมบัติสายอากาศแบบบ่วงเล็ก (Small Loop)

เป็นตัวแผ่กระจายกำลังงานที่ไม่ดีนัก และไม่ค่อยใช้สำหรับการส่งในระบบสื่อสารวิทยุ เนื่องจากเป็นสายอากาศที่มีค่าความต้านทานของการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Resistance) ค่อนข้างต่ำ และมักจะต่ำกว่าค่าความต้านทานที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss Resistance) อีกด้วย มักจะถูกนำไปใช้สำหรับโหมคการรับเสมอ เช่น วิทยุและเพจเจอร์แบบเคลื่อนที่ ซึ่งประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) ไม่สำคัญเหมือนกับค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) และยังสามารถนำมาใช้เป็นโพรบสำหรับใช้วัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสายอากาศแบบมีทิศทางสำหรับระบบการนำทางด้วยคลื่นวิทยุอีกด้วย

แบบรูปการแผ่กระจายสนามของสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กไม่ว่าจะมีรูปร่างแบบใด ก็ตามจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลจั่ว ซึ่งตำแหน่งของสัญญาณที่เป็นศูนย์ (Null) ตั้งฉากกับระนาบของบ่วง และตำแหน่งที่มีสัญญาณสูงสุดจะอยู่ในแนวเดียวกับระนาบของบ่วง การเพิ่มขนาดความยาวทั้งหมดของบ่วง และเพิ่มขนาดของเส้นรอบวง ให้มีค่าเข้าใกล้กับขนาดหนึ่งความยาวคลื่น

ที่เดินทางในอากาศว่าง จะทำให้ค่าสูงสุดของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเลื่อนจากแนวระนาบของบ่วงไปอยู่ที่แกนของบ่วงซึ่งตั้งฉากกับระนาบของบ่วงแทน

ค่าความต้านทานของการแผ่กระจายกำลังงาน สามารถทำให้มีค่าสูงขึ้นได้โดยการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าของเส้นรอบรูปและ / หรือเพิ่มจำนวนรอบของบ่วงให้มีจำนวนมากขึ้น นอกจากนี้อาจจะทำได้โดยการใส่แกนเฟอร์ไรท์ ที่มีค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็ก (Permeability) สูงมาก ลงไปในบ่วงจะสามารถยกระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นได้ ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานของการแผ่กระจายกำลังงานเพิ่มขึ้นด้วย จึงเรียกสายอากาศแบบนี้ว่า บ่วงเฟอร์ไรท์ (Ferrite Loop)



(ก) รูปทรงของบ่วงวงกลม

(ข) รูปทรงในกรณีที่เป็นการสังเกตสนาม

รูปที่

2.9: การจัดรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สายอากาศแบบบ่วง

**บ่วงวงกลมขนาดเล็ก (Small Circular Loop)**

$$I_f = I_0 \tag{2.28}$$

โดยที่  $I_0$  เป็นค่าคงที่

สนามที่แผ่กระจายกำลังงาน ( Radiated Fields)

ในการหาสนามที่แผ่กระจายกำลังงานโดยบ่วง จะใช้วิธีการเดียวกันกับที่ใช้หาสนามที่ได้จากสายอากาศแบบเส้นลวด ฟังก์ชันศักร์  $A$  ซึ่งกำหนดไว้ในสมการ (2.29) จะถูกหาค่อนลำดับแรก

$$A(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi C} \int_C I_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \tag{2.29}$$

โดยที่  $R$  คือ ระยะจากจุดใดๆ ที่อยู่บนบ่วงไปยังจุดสังเกต และ  $dl'$  คือ ส่วนย่อยๆ ของสายอากาศแบบบ่วง การแจกแจงของกระแสในสมการ (2.29) สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{I}_e(x', y', z') = \hat{\mathbf{a}}_x I_x(x', y', z') + \hat{\mathbf{a}}_y I_y(x', y', z') + \hat{\mathbf{a}}_z I_z(x', y', z') \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.9 (ก) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ควรเปลี่ยนองค์ประกอบของกระแสจากที่เป็นพิกัดฉากในสมการ (2.30) ให้อยู่ในเทอมขององค์ประกอบของกระแสในพิกัดทรงกระบอกก่อน

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi' & -\sin \phi' & 0 \\ \sin \phi' & \cos \phi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\rho \\ I_\phi \\ I_z \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

เมื่อกระจายออกมาจะได้เท่ากับ

$$\left. \begin{aligned} I_x &= I_\rho \cos \phi' - I_\phi \sin \phi' \\ I_y &= I_\rho \sin \phi' + I_\phi \cos \phi' \\ I_z &= I_z \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

เนื่องจากสนามที่แผ่ออกไปมักจะพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบในพิกัดทรงกลมเสมอ ดังนั้นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ในพิกัดฉากในสมการ (2.30) จะถูกเปลี่ยนรูปให้อยู่ในพิกัดทรงกลม

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{a}}_x &= \hat{\mathbf{a}}_r \sin \theta \cos \phi + \hat{\mathbf{a}}_\theta \cos \theta \cos \phi - \hat{\mathbf{a}}_\phi \sin \phi \\ \hat{\mathbf{a}}_y &= \hat{\mathbf{a}}_r \sin \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_\theta \cos \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_\phi \cos \phi \\ \hat{\mathbf{a}}_z &= \hat{\mathbf{a}}_r \cos \theta - \hat{\mathbf{a}}_\theta \sin \theta \end{aligned} \quad (2.33)$$

แทนสมการ (2.32) และ (2.33) ลงในสมการ (2.30) จะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_e &= \hat{\mathbf{a}}_r [I_\rho \sin \theta \cos(\phi - \phi') + I_\phi \sin \theta \sin(\phi - \phi') + I_z \cos \theta] \\ &\quad + \hat{\mathbf{a}}_\theta [I_\rho \cos \theta \cos(\phi - \phi') + I_\phi \cos \theta \sin(\phi - \phi') - I_z \sin \theta] \\ &\quad + \hat{\mathbf{a}}_\phi [-I_\rho \sin(\phi - \phi') + I_\phi \cos(\phi - \phi')] \end{aligned} \quad (2.34)$$

พิกัดของแหล่งกำเนิดจะถูกกำหนดเป็น  $(r', \phi', z')$  และพิกัดของการสังเกตจะถูกกำหนดเป็น  $(r, \phi, z)$  ในกรณีของบ่วงวงกลม กระแสจะไหลไปในทิศทางของ  $\hat{\mathbf{a}}_\phi$  หรือ  $I_\phi$  ดังนั้นสมการ (2.34) จะลดรูปไปเป็น



$$\mathbf{I}_e = \hat{\mathbf{a}}_r I_\phi \sin \theta \sin(\phi - \phi') + \hat{\mathbf{a}}_\theta I_\phi \cos \theta \sin(\phi - \phi') + \hat{\mathbf{a}}_\phi I_\phi \cos(\phi - \phi') \quad (2.35)$$

ระยะทาง  $R$  จากจุดใดๆ บนบ่วงไปยังจุดที่มีการสังเกต สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการ

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.36)$$

เนื่องจาก

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \phi \\ y = r \sin \theta \sin \phi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad \begin{cases} x' = a \cos \phi' \\ y' = a \sin \phi' \\ z' = 0 \end{cases} \quad x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 = a^2 \quad (2.37)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.36) จะกลายเป็น

$$R = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos(\phi - \phi')} \quad (2.38)$$

โดยอ้างอิงจากรูปที่ 2.8(ก) ความยาวของอีลีเมนต์ย่อยของบ่วง จะกำหนดได้โดย

$$dl' = a d\phi' \quad (2.39)$$

จากสมการ ( 2.35), (2.38) และ (2.39) องค์ประกอบในแนว  $f$  จากสมการ ( 2.29) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$A_\phi = \frac{a\mu}{4\pi} \int_0^{2\pi} I_\phi \cos(\phi - \phi') \frac{e^{-jk\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos(\phi - \phi')}}}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos(\phi - \phi')}} d\phi' \quad (2.40)$$

เนื่องจาก  $I_f$  ที่กำหนดไว้ในสมการ ( 2.28) เป็นค่าคงที่ สนามที่แผ่ออกไปจากบ่วงจะไม่ใช่ฟังก์ชันกับมุมสังเกตในทิศทาง  $f$  ดังนั้นที่มุมสังเกต  $f$  ใด ๆ สามารถที่จะเลือกได้ ตำแหน่งที่ง่ายที่สุดก็คือเลือกที่มุม  $f=0$  ดังนั้นสมการ (240) สามารถเขียนได้เป็น

$$A_\phi = \frac{a\mu I_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \cos \phi' \frac{e^{-jk\sqrt{r^2+a^2-2ar\sin\theta\cos\phi'}}}{\sqrt{r^2+a^2-2ar\sin\theta\cos\phi'}} d\phi' \quad (2.41)$$

สมการ (2.41) จะไม่สามารถอินทิเกรตได้ จำเป็นต้องใช้วิธีประมาณการแทน ในกรณีที่เป็น บ่วงขนาดเล็ก จะกำหนดให้ฟังก์ชัน

$$f = \frac{e^{-jk\sqrt{r^2+a^2-2ar\sin\theta\cos\phi'}}}{\sqrt{r^2+a^2-2ar\sin\theta\cos\phi'}} \quad (2.42)$$

ใช้การกระจายอนุกรมแมคลอริน (Maclaurin Series Expansion) ในเทอมของ  $a$  เราจะได้ค่า โดยประมาณของสมการ (2.42) เท่ากับ

$$f \approx \left[ \frac{1}{r} + a \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \cos\phi' \right] e^{-jkr}$$

ซึ่งจะลดรูปสมการ (2.41) ลงได้เป็น

$$\begin{aligned} A_\phi &\approx \frac{a\mu I_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \cos \phi' \left[ \frac{1}{r} + a \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \cos\phi' \right] e^{-jkr} d\phi' \\ &\approx \frac{a^2 \mu I_0}{4} e^{-jkr} \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \end{aligned} \quad (2.43)$$

เมื่อใช้วิธีแบบเดียวกันขององค์ประกอบของ  $r$  และ  $q$  ในสมการ (2.29) จะสามารถหาได้เช่นเดียวกัน

$$A_r \approx \frac{a\mu I_0}{4\pi} \sin\theta \int_0^{2\pi} \sin \phi' \left[ \frac{1}{r} + a \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \cos\phi' \right] e^{-jkr} d\phi' \quad (2.44ก)$$

$$A_\theta \approx -\frac{a\mu I_0}{4\pi} \cos\theta \int_0^{2\pi} \sin \phi' \left[ \frac{1}{r} + a \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \cos\phi' \right] e^{-jkr} d\phi' \quad (2.44ข)$$

และเมื่อทำการอินทิเกรต จะได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ ดังนั้นศักย์เวกเตอร์จะเหลือเพียง องค์ประกอบในทิศทาง  $f$  เท่านั้น

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{a}}_\phi A_\phi &= \hat{\mathbf{a}}_\phi \frac{a^2 \mu I_0}{4} e^{-jkr} \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin \theta \\ &= \hat{\mathbf{a}}_\phi j \frac{k \mu a^2 I_0 \sin \theta}{4r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \quad (2.45)$$

แทนสมการ (2.45) ลงในสมการสนามจะสามารถหาค่าประกอบของสนามแม่เหล็กได้ เท่ากับ

$$\begin{aligned} H_r &= j \frac{ka^2 I_0 \cos \theta}{2r^2} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \\ H_\theta &= -\frac{(ka)^2 I_0 \sin \theta}{4r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right) e^{-jkr} \\ H_\phi &= 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

จากสมการ เมื่อกำหนดให้  $J = 0$  จะสามารถหาค่าประกอบของสนามไฟฟ้าได้ในรูปของสมการ

$$\begin{aligned} E_r &= E_\theta = 0 \\ E_\phi &= \eta \frac{(ka)^2 I_0 \sin \theta}{4r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \quad (2.47)$$

### บ่วงขนาดเล็กและไดโพลแม่เหล็กจิ๋ว

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.44ก)-(2.44ข) กับสมการของไดโพลแม่เหล็กจิ๋ว จะเห็นว่า มีรูปแบบของสมการที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของไดโพลแม่เหล็กจิ๋วที่มีความยาว  $L$  และกระแสแม่เหล็กค่าคงที่  $I_m$  ได้ถูกกำหนดโดย

$$E_\phi = -j \frac{k I_m L \sin \theta}{4\pi r} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} \quad (2.48ก)$$

$$E_r = E_\theta = H_\phi = 0 \quad (2.48ข)$$

$$H_r = \frac{I_m l \cos \theta}{2\pi\eta r^2} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} \quad (2.48ก)$$

$$H_\theta = j \frac{kI_m l \sin \theta}{4\pi\eta r} \left(1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2}\right) e^{-jkr} \quad (2.48ง)$$

เมื่อนำสมการ ( 2.48ก)-(2.48ง) มาเปรียบเทียบกับสมการ ( 2.44ก)-(2.44ข) แสดงให้เห็นว่า ไดโพลแม่เหล็กของโมเมนต์แม่เหล็ก ( Magnetic Dipole of Magnetic Moment ;  $I_m l$  ) นั้นสมมูลกับ บ่วงไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีรัศมี  $a$  และค่ากระแสไฟฟ้าคงที่  $I_0$  แสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ คือ

$$I_m l = jS\omega\mu I_0 \quad (2.49)$$

โดยที่  $S = \pi a^2$  (พื้นที่ของบ่วง)

#### ความหนาแน่นกำลังงานและความต้านทานการแผ่กำลังงาน

เพื่อแสดงสนามซึ่งแผ่กระจายกำลังงานออกจากบ่วงขนาดเล็ก ดังแสดงในสมการ (2.44ก)-(2.44ข) ซึ่งจะใช้ได้ทีทุกๆ ตำแหน่งยกเว้นที่จุดกำเนิดค่าความหนาแน่นกำลังงานเชิงซ้อนจะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนลำดับแรก นั่นคือ

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \frac{1}{2}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = \frac{1}{2}[(\hat{\mathbf{a}}_\phi E_\phi) \times (\hat{\mathbf{a}}_r H_r^* + \hat{\mathbf{a}}_\theta H_\theta^*)] \\ &= \frac{1}{2}[(-\hat{\mathbf{a}}_r E_\phi H_\theta^* + \hat{\mathbf{a}}_\theta E_\phi H_r^*)] \end{aligned} \quad (2.50)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ ( 2.50) ตลอดพื้นผิวปิดทรงกลม จะได้เฉพาะองค์ประกอบในแนวรัศมี ซึ่งเท่ากับ

$$W_r = \eta \frac{(ka)^4}{32} |I_0|^2 \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \left(1 + j \frac{1}{(kr)^3}\right) \quad (2.50ก)$$

ซึ่งสามารถนำมาหาค่ากำลังงานเชิงซ้อน  $P_r$  ได้ ดังนี้

$$P_r = \iiint_s \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \eta \frac{(ka)^4}{32} |I_0|^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(1 + j \frac{1}{(kr)^3}\right) \sin^3 \theta \, d\theta d\phi \quad (2.51)$$

และจะลดรูปลงเหลือเท่ากับ

$$P_r = \eta \left(\frac{\pi}{12}\right) (ka)^4 |I_0|^2 \left(1 + j \frac{1}{(kr)^3}\right) \quad (2.51ก)$$

ซึ่งค่าจำนวนจริงของมันจะเท่ากับ

$$P_{\text{rad}} = \eta \left(\frac{\pi}{12}\right) (ka)^4 |I_0|^2 \quad (2.51ข)$$

ในกรณีที่  $kr \ll 1$  เทอมที่สองของสมการ (2.51ก) จะมีค่าเป็นใหญ่ ทำให้กำลังงานส่วนใหญ่มีค่าเป็นจำนวนจินตภาพ ส่วนกรณีสนามระยะไกล ( $kr \gg 1$ ) เทอมที่สองภายในวงเล็บใหญ่จะหายไป ทำให้กำลังงานส่วนใหญ่มีค่าเป็นจำนวนจริง และเมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.51ก) จะได้ว่าเท่ากับ

$$P = \eta \frac{\pi}{3} \frac{|I_0 I|^2}{\lambda} \left[1 - j \frac{1}{(kr)^3}\right]$$

แสดงว่าในกรณีของไดโพลจิ๋ว นั้น ค่าความหนาแน่นกำลังงานในแนวรัศมีในสนามระยะไกลจะเป็นค่าความจุไฟฟ้า แต่ถ้าเป็นกรณีบ่วงขนาดเล็กจะแสดงค่าเป็นค่าความเหนี่ยวนำซึ่งแสดงว่ากำลังงานแม่เหล็กจะมีค่าสูงกว่ากำลังงานไฟฟ้า

ค่าความต้านทานการแผ่กำลังงานของบ่วง สามารถหาได้โดยเทียบกับสมการ (2.51ข) กับ  $\frac{1}{2} |I_0|^2 R_r$  และสามารถเขียนค่าความต้านทานดังกล่าวได้เท่ากับ

$$R_r = \eta \left(\frac{\pi}{6}\right) \left(k^2 a^2\right)^2 = \eta \frac{2\pi}{3} \left(\frac{kS}{\lambda}\right)^2 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^4 \approx 31,171 \left(\frac{S^2}{\lambda^4}\right) \quad (2.52)$$

โดยที่  $S = pa^2$  คือ พื้นที่ของบ่วง และ  $C = 2\pi pa$  คือ เส้นรอบวงของบ่วง

ค่าความต้านทานการแผ่กระจายกำลังงานซึ่งกำหนดไว้ในสมการ ( 2.52) จะเป็นของสายอากาศบ่วงแบบรอบเดียว (Single-Turn Loop) แต่ถ้าบ่วงมีจำนวน  $N$  รอบ สนามแม่เหล็กก็จะไหลผ่านบ่วงตลอดความยาวทั้งหมด ค่าความต้านทานการแผ่กระจายกำลังงานจะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของบ่วงที่มีรอบเดียวคูณด้วย นั่นคือ

$$R_r = \eta \left( \frac{2\pi}{3} \right) \left( \frac{kS}{\lambda} \right)^2 N^2 = 20\pi^2 \left( \frac{C}{\lambda} \right)^4 N^2 \quad \square \quad 31,171 N^2 \left( \frac{S^2}{\lambda^4} \right) \quad (2.52ก)$$

สายอากาศแบบบ่วงที่มีจำนวน  $N$  รอบ ระยะห่างระหว่างบ่วงแต่ละรอบเท่ากับ  $2c$  รัศมีของบ่วงและของเส้นลวดเท่ากับ  $a$  และ  $b$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) ค่าความต้านทานโอห์มมิกรวมของบ่วงนี้ จะหาได้จาก

$$R_{\text{ohmic}} = \frac{Na}{b} R_s \left( \frac{R_p}{R_0} + 1 \right) \quad (2.53)$$

โดยที่

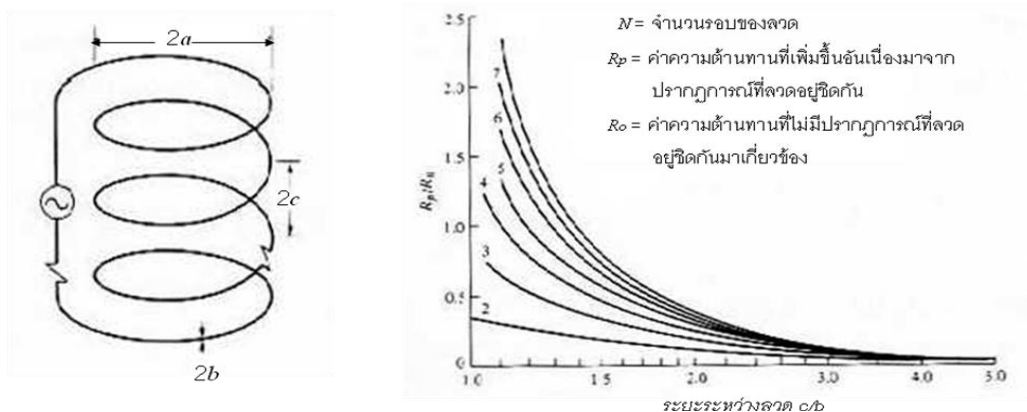
$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}$$

ความต้านทานทางผิวของตัวนำ  $R_p$  คือ ค่าความต้านทานโอห์มมิกต่อหน่วยความยาวซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ที่ลวดอยู่ใกล้ชิดกัน

$$R_0 = \frac{NR'_s}{2\pi b} \quad \text{คือ ความต้านทานโอห์มมิกที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางผิวต่อหน่วย}$$

ความยาว (W/m)

อัตราส่วนของ  $R_p/R_0$  จะถูกคำนวณให้เป็นฟังก์ชันของระยะระหว่างบ่วง  $c/b$  สำหรับบ่วงที่มีจำนวนรอบอยู่ในช่วง โดยแสดงเป็นกราฟไว้ใน 2.10(ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะระหว่างบ่วงยิ่งอยู่ชิดกันมากเท่าใด ค่าความต้านทานโอห์มมิกต่อหน่วยความยาว  $R_p$  ก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



(ก) บ่วงวงกลมที่มีจำนวน  $N$  รอบ (ข) ค่าความต้านทานโอห์มมิกซึ่งเกิดจากการที่ลวดอยู่ชิดกัน  
รูปที่ 2.10 บ่วงวงกลมที่มีจำนวน  $N$  รอบ และค่าความต้านทานโอห์มมิกซึ่งเกิดจากการที่ลวดอยู่ชิดกัน

**บริเวณสนามระยะใกล้ (Near-Field ( $kr \ll 1$ ) Region)**

จากสมการ (2.48ก)-(2.48ข) เมื่ออยู่ในบริเวณที่  $kr \ll 1$  จะได้

$$\left. \begin{aligned}
 H_r &\approx \frac{a^2 I_0 e^{-jkr}}{2r^3} \cos \theta \\
 H_\theta &\approx \frac{a^2 I_0 e^{-jkr}}{4r^3} \sin \theta \\
 H_\phi = E_r = E_\theta &= 0 \\
 E_\phi &\approx -j \frac{a^2 k I_0 e^{-jkr}}{4r^2} \sin \theta
 \end{aligned} \right\} kr \ll 1 \tag{2.54}$$

องค์ประกอบของสนามแม่เหล็ก ทั้งสองจะอยู่ในเฟสเดียวกัน และต่างเฟสกัน 90 องศา กับสนามไฟฟ้า ซึ่งแสดงว่าค่ากำลังงานเฉลี่ย (กำลังงานที่เป็นจำนวนจริง) จะมีค่าเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับกรณีของไดโพลไฟฟ้าจิว เงื่อนไขที่  $kr \ll 1$  จะสามารถใช้ได้เมื่อระยะทางจากสายอากาศอยู่ในระดับปานกลาง และสายอากาศทำงานที่ความถี่ต่ำมาก สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากสมการ (2.54ก)-(2.54ค) มักจะถูกอ้างอิงว่าเป็นแบบคล้ายจะอยู่กับที่หรือ Quasi-Stationary

### บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field ( $kr \gg 1$ ) Region)

จากสมการ (2.44ก)-(2.44ข) เมื่ออยู่ในบริเวณที่  $kr \gg 1$  จะได้

$$\left. \begin{aligned} H_\theta &\approx -\frac{k^2 a^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta = -\frac{\pi S I_0 e^{-jkr}}{\lambda^2 r} \sin \theta \\ E_\phi &\approx \eta \frac{k^2 a^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta = \eta \frac{\pi S I_0 e^{-jkr}}{\lambda^2 r} \sin \theta \end{aligned} \right\} kr \gg 1 \quad (2.55)$$

$$H_r \approx H_\phi = E_r = E_\theta = 0$$

โดยที่  $S = pa^2$  เป็นพื้นที่เชิงเรขาคณิตของบ่วง

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ  $-E_\phi/H_\theta$  เราจะได้คำตอบของค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น

$$Z_w = -\frac{E_\phi}{H_\theta} \approx \eta \quad (2.56)$$

โดยที่  $Z_w$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น และ  $h$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์อินทรินซิก

### ความเข้มการแผ่กระจายกำลังงานและสภาพเจาะจงทิศทาง

#### (Radiation Intensity and Directivity)

ค่าที่เกิดขึ้นมาพร้อมกับกำลังงานที่แผ่กระจายออกมา  $P_{\text{rad}}$  ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ในสมการ (2.51ข) ก็คือ ความหนาแน่นของกำลังงานเฉลี่ย  $W_{\text{av}}$  ซึ่งจะมีเฉพาะองค์ประกอบในแนวรัศมี  $W_r$  เท่านั้น และจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงาน  $U$  นั่นคือ

$$U = r^2 W_r = \frac{\eta}{2} \left( \frac{k^2 a^2}{4} \right)^2 |I_0|^2 \sin^2 \theta = \frac{r^2}{2\eta} |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2 \quad (2.57)$$

แบบรูปการแผ่คลื่นนอร์มัลไลซ์ของบ่วง ซึ่งได้กำหนดไว้ในสมการ (2.57) จะเหมือนกันกับที่ได้จากสายอากาศไดโพลจิว ในรูปที่ 2.10 ค่าสูงสุดจะปรากฏอยู่ที่มุม  $q = p/2$  ซึ่งกำหนดได้โดย

$$U_{\text{max}} = U|_{\theta=\pi/2} = \frac{\eta}{2} \left( \frac{k^2 a^2}{4} \right)^2 |I_0|^2 \quad (2.58)$$



และเมื่อใช้สมการ ( 2.58) และสมการของ  $P_{\text{rad}}$  ใน ( 2.51) สภาพเจาะงทศของบ่วงจะสามารถหาได้จาก

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = \frac{3}{2} \quad (2.59)$$

และอะเพอเจอร์ประสิทธิภาพสูงสุดจะเท่ากับ

$$A_{em} = \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) D_0 = \frac{3\lambda^2}{8\pi} \quad (2.60)$$

สังเกตได้ว่าสภาพเจาะงทศทางจะส่งผลต่อค่าของพื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุดของบ่วงขนาดเล็กนี้ จะเหมือนกับกรณีของไดโพลจิวไฟฟ้า ทำให้มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเหมือนกัน

#### สายอากาศแบบบ่วงวงกลมที่มีกระแสคงที่

ถ้าสมมติให้การแจกแจงของกระแสในสายอากาศแบบบ่วงในรูปที่ 2.9(ก) มีค่าคงที่ ซึ่งกำหนดไว้ในสมการ (2.28) จะสามารถนำมาหาค่าศักย์เวกเตอร์ได้ โดยใช้สมการ ( 2.43) แต่จะไม่สามารถแก้สมการที่ติดอยู่ในรูปของการอินทิเกรตได้เลย ถ้าไม่ใช้วิธีการประมาณค่า อย่างไรก็ตามถ้าผู้สังเกตถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณสนามระยะไกล ค่าประมาณในกรณีที่บ่วงมีรัศมีขนาดเล็กจะสามารถหาได้โดยไม่ต้องอินทิเกรตสมการ (2.43)

ถึงแม้ว่าการแจกแจงของกระแสแบบสม่ำเสมอบนเส้นรอบวงของบ่วงจะใช้ได้กับบ่วงที่มีเส้นรอบวงน้อยกว่า  $0.2\lambda$  เท่านั้น (รัศมีน้อยกว่า  $0.003\lambda$ ) แต่ขั้นตอนที่จะพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับกระแสคงที่ต่อไปนี้ สามารถนำมาหาค่าสนามระยะไกลของบ่วงที่มีขนาดใดๆ โดยไม่จำเป็นต้อง ใช้การสมมติกระแสเป็นแบบค่าคงที่

#### สนามจากการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiated Fields)

เพื่อหาสนามในบริเวณสนามระยะไกล ระยะ  $R$  สามารถประมาณค่าได้ เท่ากับ

$$R = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos \phi} \quad \square \quad \sqrt{r^2 - 2ar \sin \theta \cos \phi} \quad \text{กรณี } r \gg a \quad (2.61)$$

ซึ่งสามารถดัดรูปได้ โดยใช้การกระจายทวินาม (Binomial Expansion)

ในเทอมที่เป็นเฟส  $R \square r \sqrt{1 - \frac{2a}{r} \sin \theta \cos \phi'} = r - a \sin \theta \cos \phi' = r - a \cos \psi_0$

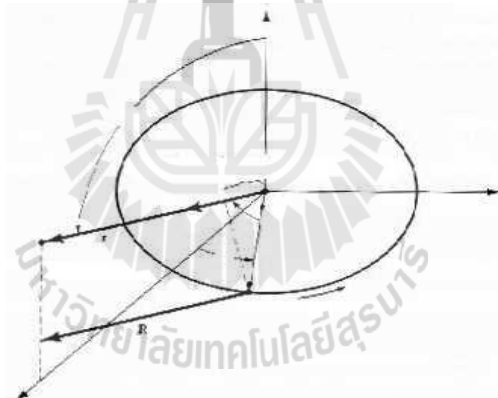
(2.62)

ในเทอมที่เป็นแอมพลิจูด  $R \square r$

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \cos \psi_0 &= \hat{\mathbf{a}}'_\rho \cdot \hat{\mathbf{a}}_r \Big|_{\phi=0} = (\hat{\mathbf{a}}_x \cos \phi' + \hat{\mathbf{a}}_y \sin \phi') \\ &\quad \cdot (\hat{\mathbf{a}}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos \theta) \Big|_{\phi=0} \\ &= \sin \theta \cos \phi' \end{aligned} \quad (2.62ก)$$

ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่าง  $R$  และ  $r$  ณ ที่มุมสังเกต  $f$  ใดๆ ในบริเวณสนามระยะไกล ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9(ข) สำหรับที่มุมสังเกต  $f=0$  จะพิจารณาได้โดยง่ายเมื่อใช้สมการที่กำหนดให้ในสมการ (2.62) และแสดงไว้ในรูปที่ 2.11.



รูป 2.11 ภาพเรขาคณิตสำหรับการวิเคราะห์สนามระยะไกลของสายอากาศแบบบ่วง

ดังนั้นสมการ (2.43) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$A_\phi \square \frac{a\mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \cos \phi' e^{+jk a \sin \theta \cos \phi'} d\phi' \quad (2.63)$$

และสามารถเขียนแยกออกเป็น 2 เทอม คือ

$$A_\phi \square \frac{a\mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ \int_0^\pi \cos \phi' e^{+jk \sin \theta \cos \phi'} d\phi' + \int_\pi^{2\pi} \cos \phi' e^{+jk \sin \theta \cos \phi'} d\phi' \right] \quad (2.64)$$

เทอมที่สองซึ่งอยู่ภายในวงเล็บใหญ่สามารถเขียนใหม่ได้โดยการเปลี่ยนตัวแปรในรูปของ

$$\phi' = \phi'' + \pi \quad (2.65)$$

ดังนั้นสมการ (2.63) อาจเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ

$$A_\phi \square \frac{a\mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ \int_0^\pi \cos \phi' e^{+jk \sin \theta \cos \phi'} d\phi' + \int_0^\pi \cos \phi'' e^{+jk \sin \theta \cos \phi''} d\phi'' \right] \quad (2.66)$$

แต่ละเทอมของการอินทิเกรตในสมการ (2.65) สามารถจะอินทิเกรตได้โดยการใช้สูตร

$$\pi j^n J_n(z) = \int_0^{2\pi} \cos(n\phi) e^{+jz \cos \phi} d\phi \quad (2.67)$$

โดยที่  $J_n(z)$  คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ชนิดที่หนึ่งของอันดับที่  $n$  เมื่อใช้สมการ (2.66) จะลดรูปสมการ (2.64) ลงได้เป็น

$$A_\phi \square \frac{a\mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ \pi j J_1(ka \sin \theta) - \pi j J_1(-ka \sin \theta) \right] \quad (2.68)$$

กรณีที่  $n = 1$  ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$J_1(-z) = -J_1(z) \quad (2.69)$$

จะเขียนสมการ (2.68) ใหม่ได้เป็น

$$A_\phi \square j \frac{a\mu I_0 e^{-jkr}}{2r} J_1(ka \sin \theta) \quad (2.70)$$

ขั้นตอนต่อไปคือ การหาสนาม สนามไฟฟ้า และสนามสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์ ในสมการ (2.70) ซึ่งนำมาใช้อย่างถูกต้องได้ ในกรณีที่มีการสังเกตในสนามระยะไกลเท่านั้น ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก ( $A$ ) ในสมการ (2.70) จะอยู่ในรูปของ ตัวแปร  $r$  ซึ่งจะถูกแยกออกจากตัวแปร  $\phi$  และ  $f$  ดังนั้นจึงสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$E_r \square E_\theta = 0 \quad (2.71)$$

$$E_\phi \square \frac{ak\eta I_0 e^{-jkr}}{2r} J_1(ka \sin \theta) \quad (2.72)$$

$$H_r \square E_\phi = 0 \quad (2.73)$$

$$H_\theta \square -\frac{E_\phi}{\eta} = -\frac{akI_0 e^{-jkr}}{2r} J_1(ka \sin \theta) \quad (2.74)$$

ความหนาแน่นกำลัง ความเข้มการแผ่กำลังงาน ความต้านทานการแผ่กำลังงานและสภาพ  
เจาะจงทิศทาง (Power Density, Radiation Intensity, Radiation Resistance, and Directivity)

การหาค่าของความหนาแน่นกำลัง ความเข้มการแผ่กำลังงาน ความต้านทานการแผ่กำลังงาน  
และสภาพเจาะจงทิศทางนั้น ลำดับแรกจะต้องเขียนสมการของค่าความหนาแน่นกำลังงานเฉลี่ยตาม  
เวลาเสียก่อน นั่นคือ

$$\mathbf{W}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] = \frac{1}{2} \text{Re}[\hat{\mathbf{a}}_\phi E_\phi \times \hat{\mathbf{a}}_\theta H_\theta^*] = \hat{\mathbf{a}}_r \frac{1}{2\eta} |E_\phi|^2 \quad (2.75)$$

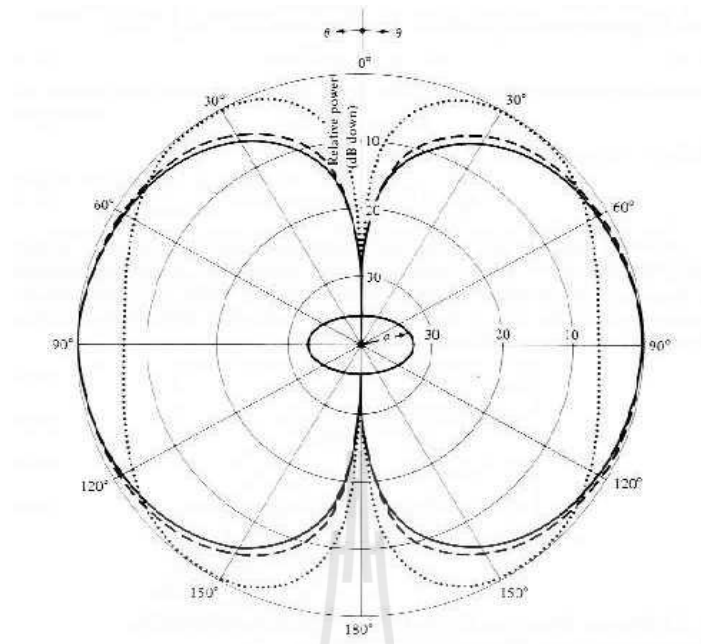
เมื่อใช้สมการ (2.72) จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\mathbf{W}_{av} = \hat{\mathbf{a}}_r W_r = \frac{(a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{8\eta r^2} J_1^2(ka \sin \theta) \quad (2.76)$$

ค่าความเข้มการแผ่กำลังงานจะกำหนดได้โดย

$$U = r^2 W_r = \frac{(a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{8\eta} J_1^2(ka \sin \theta) \quad (2.77)$$

แบบรูปการแผ่กำลังงานในกรณีที่มี  $a = 1/10, 1/5$  และ  $1/2$  ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12: แบบรูปของแอมพลิจูดในระนาบเงย (Elevation Plane) ของสายอากาศแบบบ่วงวงกลมที่มีกระแสแสดงที่

กำลังงานที่เกิดจากการแผ่กำลังงาน สามารถเขียนเป็นสมการได้โดยใช้สมการ (2.74)

$$P_{\text{rad}} = \iint_s \mathbf{W}_{\text{av}} \cdot d\mathbf{s} = \frac{\pi (a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{4\eta} \int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (2.78)$$

เทอมอินทิกรัลในสมการ (2.78) จะไม่สามารถแก้การอินทิเกรตได้ อย่างไรก็ตามอาจจะเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{ka} \int_0^{2ka} J_2(x) dx \quad (2.79)$$

ถึงแม้ว่าสมการ (2.79) จะไม่สามารถแก้การอินทิเกรตได้ แต่ก็สามารถหาคำตอบโดยการประมาณได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของค่าจำกัดตัวบนของการอินทิเกรต นั่นคือ รัศมีของบ่วง

ก. การประมาณค่ากรณีช่วงขนาดใหญ่ ( $a \geq \lambda/2$ )

ในกรณีนี้ การอินทิเกรตในสมการ (2.97) สามารถประมาณค่าได้โดยสมการ

$$\int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{ka} \int_0^{2ka} J_2(x) dx \approx \frac{1}{ka} \quad (2.80)$$

กำลังของการแผ่กำลังงานในสมการ (2.78) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ สามารถถูกหาได้โดยใช้สมการ

$$P_{\text{rad}} \approx \frac{\pi(a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{4\eta(ka)} \quad (2.81)$$

ค่าความเข้มการแผ่กำลังงานสูงสุดจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ  $ka \sin \theta = 1.84$  ดังนั้น

$$U|_{\text{max}} = \frac{(a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{8\eta} J_1^2(ka \sin \theta) \Big|_{ka \sin \theta = 1.84} = \frac{(a\omega\mu)^2 |I_0|^2}{8\eta} (0.584)^2 \quad (2.82)$$

ดังนั้น

$$R_r = \frac{2P_{\text{rad}}}{|I_0|^2} = \frac{2\pi(a\omega\mu)^2}{4\eta(ka)} = \eta \left( \frac{\pi}{2} \right) ka = 60\pi^2 (ka) = 60\pi^2 \left( \frac{C}{\lambda} \right) \quad (2.83ก)$$

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = 4\pi \frac{ka(0.584)^2}{2\pi} = 2ka(0.584)^2 = 0.682 \left( \frac{C}{\lambda} \right) \quad (2.83ข)$$

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} [0.682] \left( \frac{C}{\lambda} \right) = 5.43 \times 10^{-2} \lambda C \quad (2.83ค)$$

โดยที่  $C$  คือเส้นรอบวง ซึ่งเท่ากับ  $2pa$  และ  $h \sim 120 p$

ข. การประมาณค่ากรณีช่วงขนาดกลาง ( $\lambda/6\pi \leq a < \lambda/2$ )

$$\int_0^\pi J_1^2(ka \sin \theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{ka} \int_0^{2ka} J_2(x) dx \quad (2.84)$$

$$\approx \frac{1}{ka} \left[ -2J_1(2ka) + \int_0^{2ka} J_0(y) dy \right]$$

ขณะที่  $J_0(y)$  คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับที่ศูนย์ ซึ่งจะไม่สามารถลดลงได้มากกว่านี้ ค่าที่ได้จากการอินทิเกรตของ  $J_0(y)$  ในสมการ ( 2.83) ค่าความต้านทานการแผ่กำลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และพื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด จะสามารถหาได้โดยใช้สมการ ( 2.83) เพื่อให้ได้คำตอบของ  $P_{\text{rad}}$  ในสมการ (2.81)

### การประมาณค่ากรณีปวงขนาดเล็ก ( $a < \lambda/6\pi$ )

ในกรณีนี้ สมการของสนามที่กำหนดไว้ในสมการ ( 2.71)-(2.74) สามารถทำให้ง่ายขึ้น โดยการกระจายฟังก์ชันเบสเซล  $J_1(ka \sin \theta)$  โดยใช้นิยามของสมการ ( 2.69) ในรูปของอนุกรมอนันต์

$$J_1(ka \sin \theta) = \frac{1}{2}(ka \sin \theta) - \frac{1}{16}(ka \sin \theta)^3 + \dots \quad (2.85)$$

ในกรณีที่  $ka$  มีค่าน้อย ( $ka < 1/3$ ) สมการ ( 2.85) สามารถจะประมาณค่าได้ โดยพิจารณาเทอมแรกของสมการ หรือ

$$J_1(ka \sin \theta) \approx \frac{ka \sin \theta}{2} \quad (2.85ก)$$

ดังนั้น สมการ (2.71)-(2.74) สามารถเขียนได้เป็น

$$E_r \approx E_\theta = 0 \quad (2.89ก)$$

$$E_\phi \approx \frac{a^2 \omega \mu k I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta = \eta \frac{a^2 k^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta \quad (2.89ข)$$

$$H_r \approx E_\phi = 0 \quad (2.89ค)$$

$$H_\theta \approx -\frac{a^2 \omega \mu k I_0 e^{-jkr}}{4\eta r} \sin \theta = -\frac{a^2 k^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin \theta \quad (2.89ง)$$

ดังนั้นสมการสำหรับ ค่าความหนาแน่นกำลัง ค่าความเข้มการแผ่กำลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง อะเพอเจอร์ประสิทธิภาพสูงสุด และค่าความต้านทานการแผ่กำลังงาน จะถูกกำหนดโดยสมการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

### ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna)

จงหา Radiation efficiency ของสายอากาศแบบบ่วงจำนวน 1 รอบที่ความถี่  $(f) = 100\text{MHz}$  โดยรัศมีของบ่วงมีขนาด  $\frac{\lambda}{25}$  รัศมีขนาดของเส้นลวดเท่ากับ  $10^{-4}\lambda$  ระยะห่างระหว่างแต่ละบ่วงเท่ากับ  $4 \times 10^{-4}\lambda$  สมมติว่าสายอากาศดังกล่าวทำมาจากทองแดงโดยมีค่า Conductivity =  $5.7 \times 10^7 \text{ s/m}$

วิธีทำ ทำการหาค่าพื้นที่ของวงกลมของสายอากาศ

$$S = \pi a^2 = \pi \left( \frac{\lambda}{25} \right)^2 = \frac{\pi \lambda^2}{625}$$

ทำการหาค่าความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation resistant) ของสายอากาศ

$$R_r (\text{single turn}) = \eta \left( \frac{2\pi}{3} \right) \left( \frac{kS}{\lambda} \right)^2 = 120\pi \left( \frac{2\pi}{3} \right) \left( \frac{kS}{\lambda} \right)^2 = 0.788 \text{ ohms}$$

ทำการหาค่า Loss resistant ของสายอากาศจำนวน 1 รอบ

$$R_L = R_{hf} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} = \frac{1}{(25 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{\pi (10^8) (4\pi \times 10^{-7})}{5.7 \times 10^7}} = 1.053 \text{ ohms}$$

ทำการหา Radiation efficiency ตามสมการ

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} = \frac{0.788}{0.788 + 1.053} = 0.428 = 42.8\%$$

ค่า Radiation Efficiency ของสายอากาศแบบบ่วง จำนวน 1 รอบ มีค่าเท่ากับ 42.8% #



#### 2.2.4. ความรู้เกี่ยวกับสายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna)

สายอากาศแบบช่องเปิด เป็นสายอากาศที่มีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านออกมาทางช่องเปิดของสายอากาศที่มักเรียกทับศัพท์ว่า อะเพอร์เจอร์ (Aperture) การปล่อยกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิด ของสายอากาศประเภทนี้จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำงานของอุปกรณ์ขยายเสียงที่เรียกว่า เมกกะโฟน (Megaphone) หรือไมโครโฟนแบบที่ตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก (Parabolic Microphone) และในกรณีที่ใช้สายอากาศแบบช่องเปิดทำหน้าที่เป็นภาครับนั้น ให้นำนี้ถึงรูม่านตาของมนุษย์ซึ่งเป็นช่องเปิดสามารถรับภาพเข้ามาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงแสงได้นั่นเอง ซึ่งที่ความถี่วิทยุย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น ช่องเปิดของท่อนำคลื่น สายอากาศปากแตร และสายอากาศแบบตัวสะท้อนก็คือตัวอย่างที่ชัดเจนของสายอากาศแบบช่องเปิดซึ่งนิยมใช้กันในย่านความถี่ตั้งแต่ย่าน UHF ขึ้นไปเนื่องจากสายอากาศแบบนี้สามารถให้อัตราขยายสูงขึ้นได้และมีค่าเป็นสัดส่วนประมาณค่าของความถี่ยกกำลังสอง และหากต้องการให้สายอากาศมีประสิทธิภาพและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกำลังงาน ที่สูงขึ้นจะต้องออกแบบให้พื้นที่ของช่องเปิดมีขนาดที่กว้างกว่าความยาวคลื่นใช้งานยกกำลังสอง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานในย่านความถี่ต่ำเพราะจะทำให้สายอากาศมีขนาดที่ใหญ่เกินไป

สำหรับข้อดีของสายอากาศประเภทนี้คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ตัวป้อน (Feeder) ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นเป็นส่วนใหญ่

ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดในรูปแบบต่างๆ นั้นทฤษฎีที่ต้องนำมาใช้คือหลักการสมมูล (Equivalent Principle) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะช่วยวิเคราะห์หาสนามระยะไกลในส่วนที่อยู่ด้านนอกของช่องเปิดที่ใช้สำหรับการแผ่คลื่นได้เท่านั้น โดยจะต้องเรียนรู้เรื่องขององค์ประกอบของสนามสัมผัส (Tangential Fields) ที่มีทิศทางของเวกเตอร์ขนานกับช่องเปิด และตามด้วยหลักการสมมูลดังกล่าว

#### ทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียว

ผลเฉลยที่ได้จากทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียว (Uniqueness Theorem) นี้จะกล่าวได้ว่ามีลักษณะที่เป็นพิเศษเฉพาะตัวหรือเป็นหนึ่งเดียว ถ้าผลเฉลยนั้นมีความเป็นไปได้เพียงหนึ่งเดียวที่อยู่ในกลุ่มของผลเฉลยที่กำหนดให้อีกหลายคำตอบ โดยกำหนดนิยามของผลเฉลยจากทฤษฎีนี้ว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณหนึ่งๆ ที่กำหนดให้ จะมีลักษณะเฉพาะตัวหรือเป็นหนึ่งได้ก็ต่อเมื่อต้องกำหนดแหล่งกำเนิดทั้งหมดขึ้นมาต้องกำหนดให้องค์ประกอบของสนามสัมผัสอย่างใดอย่างหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กอยู่ที่ขอบเขต ซึ่งทฤษฎีนี้จะถูกนำมาใช้งานให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดยการนำทฤษฎีของพอยน์ดิง (Poynting's Theorem) ในรูปแบบอปริกัลมาช่วย จะทำให้

ได้สมการจากทฤษฎีของพอยน์ติงซึ่งแสดงให้เห็นถึงกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Law) ในระบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นคือ

$$\oint_S (\vec{E} \cdot \vec{H}^*) ds + j\omega \int_{V[S]} (\mu |\vec{H}|^2 - \epsilon |\vec{E}|^2) dv + \int_{V[S]} (\sigma |\vec{E}|^2) dv = - \int_{V[S]} (\vec{E} \cdot \vec{J} + \vec{H} \cdot \vec{M}) dv \quad (2.90)$$

ลำดับต่อไปต้องเข้าใจว่าการซ้อนทับกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำหนดให้นั้นจะมีผลเฉลยอยู่ 2 คำตอบ (เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดและเงื่อนไขขอบเขตที่เหมือนกัน) ดังนั้นความแตกต่างสนามที่เกิดขึ้นจากทั้งสองคำตอบจะอยู่ในรูปของ

$$\begin{aligned} \delta \vec{E} &= \vec{E}^a - \vec{E}^b \\ \delta \vec{H} &= \vec{H}^a - \vec{H}^b \end{aligned} \quad (2.91)$$

เนื่องจากสนามที่แตกต่างกันนี้จะไม่มีการกำเนิด จึงสอดคล้องกับสมการที่ 2.90 ซึ่งมีรูปแบบที่ปราศจากแหล่งกำเนิดเช่นเดียวกัน ดังนี้

$$\oint_S (\delta \vec{E} \times \delta \vec{H}^*) ds + j\omega \int_{V[S]} (\mu |\delta \vec{H}|^2 - \epsilon |\delta \vec{E}|^2) dv + \int_{V[S]} (\sigma |\delta \vec{E}|^2) dv = 0 \quad (2.92)$$

และเนื่องจากสนามทั้งสองเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่  $S$  ซึ่งเหมือนกัน ดังนั้นจึงทำให้  $\delta \vec{E} = 0$  และ  $\delta \vec{H} = 0$  ตลอดเงื่อนไขขอบเขตที่  $S$  จึงทำให้สมการที่ 2.92 เท่ากับ

$$j\omega \int_{V[S]} (\mu |\delta \vec{H}|^2 - \epsilon |\delta \vec{E}|^2) dv + \int_{V[S]} (\sigma |\delta \vec{E}|^2) dv = 0 \quad (2.93)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.93 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$j\omega \int_{V[S]} (\mu |\delta \vec{H}|^2 - \epsilon |\delta \vec{E}|^2) dv = 0$$

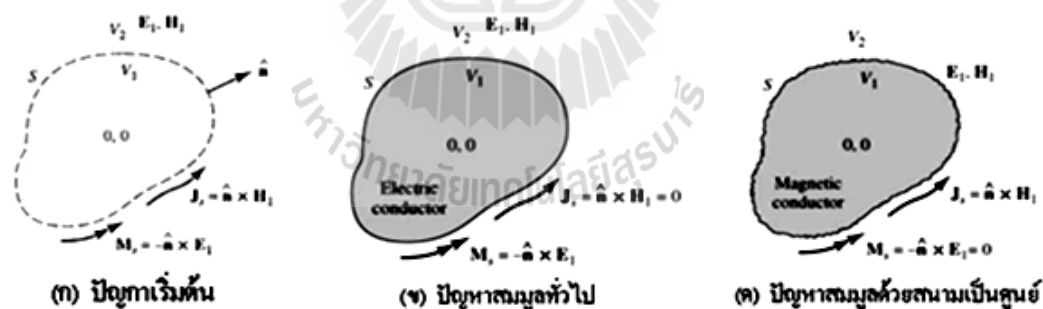
และ

$$\int_{V[S]} (\sigma |\delta \vec{E}|^2) dv = 0 \quad (2.94)$$

อย่างไรก็ตามถ้าสมมติว่ามีการสูญเสียเกิดขึ้นบ้างสมการที่ 2.94 จะถูกต้องเฉพาะในเงื่อนไขที่  $\delta \vec{E} = \delta \vec{H} = 0$  ในทุกๆตำแหน่งที่อยู่ในปริมาตร  $V_{[s]}$  ที่กำหนดให้ ซึ่งเงื่อนไขนี้จะบอกว่าเป็นผลเฉลยเฉพาะตัวหรือที่มีเพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น และถ้าในกรณีที่  $\delta = 0$  (ซึ่งแม้ว่าจะไม่มีทางเป็นไปได้ในทางกายภาพแต่ก็มักจะมีการกำหนดค่าดังกล่าวเพื่อใช้ในการประมาณค่าเสมอ) ก็อาจจะเกิดผลเฉลยของ  $\delta \vec{E}$  และ  $\delta \vec{H}$  ขึ้นมาหลายคำตอบ โดยอยู่ในรูป การเรโซแนนซ์ภายในตัวเองหลายๆ โหมด (Self-Resonant Modes) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่กำลังถูกพิจารณา ส่วนปัญหาที่มีลักษณะแบบเปิดหรือไม่มีเงื่อนไขขอบเขตกำหนดนั้น การเรโซแนนซ์ จะไม่สามารถเป็นไปได้ในบริเวณพื้นที่ทั้งหมด และสุดท้ายเราจะสังเกตเห็นว่าทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียวจะสามารถนำมาใช้ได้ถ้า  $\delta \vec{E} = 0$  หรือ  $\delta \vec{H} = 0$  อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นจริงบนส่วนใดๆของขอบเขต

### หลักการสมมูล

สำหรับหลักการสมมูล (Equivalence Principle) จะเป็นความรู้ที่ต่อเนื่องจากทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียวที่อธิบายไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจะช่วยให้สามารถแก้ไขปัญหาในการทดลองหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยหลักการสมมูลนี้จะยังคงรักษาเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเริ่มต้นซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปรากฏที่  $S$  และจะนำไปสู่การได้ผลเฉลยเพียงหนึ่งเดียวที่คำตอบมีความเป็นไปได้และเกิดขึ้นบริเวณด้านนอกของปริมาตร  $V_{[s]}$



รูปที่ 2.13: การจำลองปัญหาโดยการใชหลักการสมมูลของสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.13 (ก) จะเป็นการจำลองปัญหาเริ่มต้นโดยกำหนดให้มีแหล่งกำเนิดบนเงื่อนไขขอบเขตตามนิยามของทฤษฎีความเป็นหนึ่งเดียวและพิจารณาต่อด้วยหลักการสมมูลในรูป (ข) ด้วยการกำหนดให้บนขอบเขตเดิมปราศจากแหล่งกำเนิด ดังนั้นกระแสไฟฟ้า และกระแสแม่เหล็ก ซึ่งผิวสมมูลซึ่งเกิดจากเงื่อนไขขอบเขต ณ ตำแหน่งใดๆ บนบริเวณ  $S$  สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned}\vec{J}_{s_e} &= \hat{n} \times (\vec{H}_0 - \vec{H}_e) \\ \vec{M}_{s_e} &= (\vec{E}_0 - \vec{E}_e) \times \hat{n}\end{aligned}\quad (2.95)$$

และเมื่อเปลี่ยนการจำลองปัญหาให้ปราศจากทั้งแหล่งกำเนิดและสนามใด ๆ บนบริเวณ  $S$  ที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ค) ก็จะได้คำตอบของกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กเชิงผิวซึ่งเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ บนบริเวณ  $S$  จะแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.96

$$\begin{aligned}\vec{J}_{s_e} &= \hat{n} \times H_0 \\ \vec{M}_{s_e} &= E_0 \times \hat{n}\end{aligned}\quad (2.96)$$

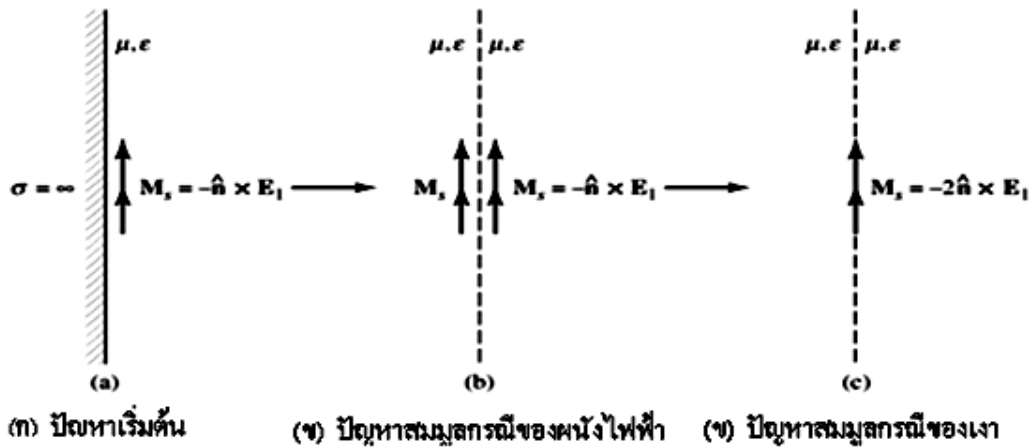
โดยสูตรหากระแสและสนามแม่เหล็กเชิงผิวดังกล่าวซึ่งเกิดจากการกำหนดให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์นั้น เมื่อเรียกว่า หลักการสมมูลของเลิฟ (Love's Equivalence Principle) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ 3 วิธีได้แก่

1). สามารถสมมติให้ขอบเขต  $S$  เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ซึ่งจะตัดค่าของกระแสไฟฟ้าเชิงผิวออกไปได้โดยจะทำให้  $\vec{J}_s = 0$  และจะเหลือเฉพาะค่าของกระแสแม่เหล็กเชิงผิว  $\vec{M}_s$  ซึ่งสามารถแผ่กระจายสนามออกมาจากขอบเขตซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าสมบูรณ์ได้

2). สามารถสมมติให้ขอบเขต  $S$  เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ซึ่งจะตัดค่าของกระแสแม่เหล็กเชิงผิวออกไปได้โดยจะทำให้  $\vec{M}_s = 0$  และจะเหลือเฉพาะค่าของกระแสไฟฟ้าเชิงผิว  $\vec{J}_s$  ซึ่งสามารถแผ่กระจายสนามออกมาจากขอบเขตซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าสมบูรณ์ได้

3). ไม่ต้องทำการสมมติเกี่ยวกับวัสดุที่อยู่ภายในขอบเขต  $S$  และกระแส  $\vec{J}_s, \vec{M}_s$  ซึ่งกำลังเกิดการแผ่กระจายออกไปในอากาศอิสระ (ด้านหลังของกระแสทั้งสองไม่ต้องสมมติว่ามีตัวนำ) สามารถแสดงได้ว่ากระแสสมมูลเหล่านี้จะให้สนามที่อยู่ภายใน  $V_{[s]}$  มีค่าเป็นศูนย์

วิธีการทั้งสามนี้จะนำไปสู่ผลเฉลยของสนามที่ได้มีค่าออกมาเหมือนกันและสอดคล้องกับทฤษฎีความเป็นหนึ่งที่ได้ศึกษาผ่านไป สองวิธีแรกนั้นจะไม่มีประโยชน์มากนักในกรณีทั่วไปที่ผิวของขอบเขต  $S$  เป็นเส้นโค้ง อย่างไรก็ตามในกรณีของแผ่นระนาบเรียบที่มีขนาดเป็นอนันต์ เราสามารถใช้ทฤษฎีเงา (Image Theory) มาประยุกต์ใช้กับผิวโค้งที่มีรัศมีมาก ๆ (เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น) และต่อไปนี้จะเป็นการแสดงวิธีการนำหลักการสมมูลของเลิฟมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับทฤษฎีเงา



รูปที่ 2.14: การจำลองปัญหาขอบเขตโดยใช้ทฤษฎีเงา

จากรูปที่ 2.14 เป็นวิธีการจำลองปัญหาเพื่อใช้ในการหาคำตอบของสนามในบริเวณครึ่งหนึ่งของสายอากาศ (Half-Space) เสมือนกับถูกกระตุ้นโดยช่องเปิด สนามที่อยู่ด้านหลังของขอบเขต  $S$  จะถูกสมมติว่าเราทราบค่า ซึ่งเพียงเท่านี้ก็สามารถที่จะกำหนดกระแสเชิงผิวสัมพันธ์ได้ ในการใช้ทฤษฎีเงานั้นผลเฉลยซึ่งอยู่ในบริเวณระยะไกลและเป็นบริเวณเปิดของศักย์เวกเตอร์  $A$  (เป็นผลที่เกิดจากกระแส  $\vec{J}_s$ ) และของศักย์เวกเตอร์  $F$  (เป็นผลที่เกิดจากกระแส  $\vec{M}_s$ ) จะสามารถหาได้จาก

$$\vec{A}(P) = \mu \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \iint_S \vec{J}_s(\vec{r}') e^{j\beta \hat{r} \cdot \vec{r}'} ds' \quad (2.97)$$

$$\vec{F}(P) = \varepsilon \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \iint_S \vec{M}_s(\vec{r}') e^{j\beta \hat{r} \cdot \vec{r}'} ds' \quad (2.98)$$

ขณะที่  $r'$  จะแทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งชี้ทิศทางจากจุดกำเนิดของระบบพิกัดไปยังจุดสังเกตที่ตำแหน่ง  $P$  การอินทิเกรตที่จุด  $Q$  จะถูกกำหนดให้กระทำผ่านทางเวกเตอร์ในรัศมี  $r'$  โดยในบริเวณสนามระยะไกลนั้นได้ถูกสมมติว่ามีการแพร่กระจายกำลังงานของสนามไกลออกไปในแนวรัศมี (พิกัดทรงกลม) โดยเวกเตอร์สำหรับใช้แสดงทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นจะเรียกว่า เวกเตอร์การแพร่กระจาย (Propagation Vector) ซึ่งเท่ากับ

$$\vec{\beta} = \beta \hat{r}$$

โดยเวกเตอร์นี้จะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของค่าคงที่เฟสและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นสมการศักย์เวกเตอร์จึงสามารถเขียนใหม่ได้ในรูปของ

$$\vec{A}(P) = \mu \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \iint_S \vec{J}_s(\vec{r}') e^{j\beta \vec{r} \cdot \vec{r}'} ds' \quad (2.99)$$

$$\vec{F}(P) = \varepsilon \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \iint_S \vec{M}_s(\vec{r}') e^{j\beta \vec{r} \cdot \vec{r}'} ds' \quad (2.100)$$

ความสัมพันธ์กันระหว่างสนามในบริเวณสนามระยะไกลและศักย์เวกเตอร์ สามารถแสดงในรูปแบบง่ายๆ ได้คือ

$$\vec{E}_A^{far} = -j\omega(A_\theta \hat{\theta} + A_\phi \hat{\phi}) \quad (2.101)$$

$$\vec{H}_F^{far} = -j\omega(F_\theta \hat{\theta} + F_\phi \hat{\phi}) \quad (2.102)$$

และเนื่องจาก  $\vec{E}_A^{far} = \eta \vec{H}_F^{far} \times \vec{r}$

ดังนั้นสนามรวมที่เกิดขึ้นในบริเวณระยะไกล จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.103

$$\vec{E}^{far} = \vec{E}_A^{far} + \vec{E}_F^{far} = -j\omega \left[ (A_\theta - \eta F_\phi) \hat{\theta} + (A_\phi - \eta F_\theta) \hat{\phi} \right] \quad (2.103)$$

คำตอบของสมการที่ 2.103 จะเป็นการรวมเอาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งจากศักย์ไฟฟ้า  $A$  ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้า  $\vec{J}_s$  และศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก  $F$  ซึ่งเกิดจากกระแสแม่เหล็ก  $\vec{M}_s$  สำหรับในการคำนวณนั้นจะสามารถลดขั้นตอนลงได้ครั้งหนึ่งถ้ามีการนำทฤษฎีเงามาใช้งานร่วมกับการสมมติให้มีผนังไฟฟ้าหรือผนังแม่เหล็กที่ขอบเขตของปัญหา

### การประยุกต์ใช้หลักการสมมูลกับปัญหาช่องเปิด

หลักการสมมูลได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดอย่างกว้างขวาง ในการคำนวณหาสนามระยะไกลที่แผ่ออกมาจากสายอากาศได้อย่างถูกต้องนั้น จำเป็นจะต้องทราบลักษณะการแจกแจงรูปของสนามที่แท้จริงที่เกิดขึ้นบริเวณช่องเปิดของสายอากาศ ซึ่งวิธีการแจกแจงรูปสนามที่เกิดขึ้นบนช่องเปิดทั้ง 3 วิธีที่ได้กล่าวไปแล้วจะให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นบ่อยครั้งที่ทั้งสามวิธีดังกล่าวก็ไม่สามารถที่จะทำได้และต้องนำวิธีการประมาณ

ค่าที่แม่นยำมาใช้ในการหาค่าคำตอบแทน ดังนั้นคำตอบที่ได้จากการใช้วิธีหลักการสมมูลทั้งสามวิธี จึงให้คำตอบที่แตกต่างกันเล็กน้อยส่วนจะตรงกันหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของแต่ละวิธีที่ใช้ในการพิจารณา สำหรับวิธีการที่ใช้กันมาโดยตลอดก็คือ จะสมมติว่าสนามที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นอยู่ในครึ่งหนึ่งของอากาศอิสระที่ออกมาจากตัวป้อนและสายอากาศซึ่งอยู่ด้านหลังผนังไฟฟ้าเหลือผนังแม่เหล็ก  $S$  ที่มีขนาดอนันต์เป็นช่องเปิด  $S_A$  ของสายอากาศจะเป็นส่วนหนึ่งของผนัง  $S$  ซึ่งมีวิธีการหาคำตอบของการแจกแจงของสนามที่เกิดขึ้นบนช่องเปิดนี้ด้วยวิธีประมาณค่าโดยพิจารณาจากชนิดของสายป้อนสัญญาณหรือจากคลื่นที่พุ่งกระทบไปยังช่องเปิดนี้ วิธีประมาณค่าดังกล่าวรู้จักกันในชื่อที่ว่าทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ (Physical Optics: PO) ซึ่งให้ผลเฉลยที่แม่นยำกว่าอีกวิธีหนึ่งที่มีชื่อว่า ทัศนศาสตร์เชิงเลขาคณิต (Geometrical Optics: GO) ซึ่งพิจารณาคำตอบจากการกวาดรังสีของคลื่น และการประมาณค่าของคำตอบด้วยวิธีดังกล่าว (PO) จะยังมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อขนาดของช่องเปิดมีขนาดใหญ่มากขึ้น (เมื่อเปรียบเทียบขนาดของความยาวคลื่น)

ต่อไปนี้ให้เราสมมติว่าเราทราบคำตอบของสนาม  $\vec{E}_a, \vec{H}_a$  ที่ช่องเปิดและจะมีค่าเป็นศูนย์ในทุกๆ จุดนอกจากที่  $S$  โดยความหนาแน่นของกระแสสมมูลจะเท่ากับ

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_s &= \hat{n} \times \vec{H}_a \\ \vec{M}_s &= \vec{E}_a \times \hat{n} \end{aligned} \right\} \quad (2.104)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.104 แทนลงในสมการที่ 2.99 และสมการที่ 2.100 จะได้

$$\vec{A}(P) = \mu \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \hat{n} \times \iint_S \vec{H}_a e^{j\beta \vec{r}'} ds \quad (2.105)$$

$$\vec{F}(P) = -\varepsilon \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \hat{n} \times \iint_S \vec{E}_a e^{j\beta \vec{r}'} ds' \quad (2.106)$$

ซึ่งสมการอินทิกรัลของการแผ่กระจายกำลังงานในสมการที่ 2.105 และ 2.106 สามารถแสดงได้ในรูปแบบง่ายๆ ได้คือ

$$\begin{aligned} \vec{S}^H &= \iint_S \vec{H}_a e^{j\beta \vec{r}'} ds' \\ \vec{S}^E &= \iint_S \vec{E}_a e^{j\beta \vec{r}'} ds' \end{aligned} \quad (2.107)$$

จากสมการ 2.103 สามารถนำมาแสดงเป็นสมการทั่วไปของสนามไฟฟ้าระยะไกลในรูปของเวกเตอร์ได้นั้นคือ

$$\vec{E}^{far} = -j\omega\vec{A} - j\omega\eta\vec{F} \times \hat{r} \quad (2.108)$$

ขณะที่องค์ประกอบของศักย์ไฟฟ้าในแนวรัศมี  $A_r$  จะถูกตัดทิ้งออกไป เนื่องจากไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามไฟฟ้าระยะไกล จากนั้นนำสมการที่ 2.105 และสมการที่ 2.106 แทนลงในสมการที่ 2.108 จะได้ว่า

$$\vec{E}^{far} = -j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \hat{r} \times \iint_{S_A} [\hat{n} \times \vec{E}_a - \eta \hat{r} \times (\hat{n} \times \vec{H}_a)] e^{j\beta \vec{r} \cdot \vec{s}'} ds' \quad (2.109)$$

จะเห็นว่าสมการในรูปของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เป็นผลออกมาจากสนามที่ช่องเปิดจะมีรูปแบบที่สมบูรณ์มากขึ้น เราเรียกสมการนี้ว่า อินทิกรัลเลี้ยวเบน ของเวกเตอร์ (Vector Diffraction Integral) หรือเรียกว่า อินทิกรัลเคอร์ชอฟฟ์เชิงเวกเตอร์ (Vector Kirchhoff Integral) ต่อไปนี้จะแสดงวิธีการพิจารณาในกรณีของช่องเปิดแบบเรียบซึ่งวางอยู่ในระนาบ  $x-y$  และมีเวกเตอร์ตั้งฉาก  $\hat{n} \equiv \hat{z}$  ดังนั้นสมการของศักย์เวกเตอร์จะเท่ากับ

$$\vec{A} = \mu \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left( -\mathfrak{I}_y^H \hat{x} + \mathfrak{I}_x^H \hat{y} \right) \quad (2.110)$$

$$\vec{F} = -\epsilon \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left( -\mathfrak{I}_y^E \hat{x} + \mathfrak{I}_x^E \hat{y} \right) \quad (2.111)$$

จากสมการอินทิกรัลที่ 2.110 และ 2.111 สามารถแยกเขียนเฉพาะเทอมที่อยู่ในวงเล็บออกมาได้ 4 สมการ โดยกำหนดให้  $\vec{r}' = x' \hat{x} + y' \hat{y}$

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_x^E &= \iint_{S_A} E_{a_x}(x', y') e^{j\beta(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \\ \mathfrak{I}_y^E &= \iint_{S_A} E_{a_y}(x', y') e^{j\beta(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \\ \mathfrak{I}_x^H &= \iint_{S_A} H_{a_x}(x', y') e^{j\beta(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \\ \mathfrak{I}_y^H &= \iint_{S_A} H_{a_y}(x', y') e^{j\beta(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \end{aligned} \quad (2.112)$$



สังเกตได้ว่าสมการอินทิกรัลทั้งสี่สมการนี้ก็คือ การแปลงกลับของสมการฟูเรียร์ สองครั้ง ขององค์ประกอบของสนามที่ช่องเปิดนั่นเอง เมื่อแปลง ศักย์เวกเตอร์ในสมการที่ 2.110 และ 2.111 ให้อยู่ในพิกัดทรงกลมจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{A} = \mu \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left[ \hat{\theta} \cos \theta (\mathfrak{V}_x^H \sin \varphi - \mathfrak{V}_y^H \cos \varphi) + \hat{\phi} (\mathfrak{V}_x^H \cos \varphi + \mathfrak{V}_y^H \sin \varphi) \right] \quad (2.113)$$

$$\bar{F} = -\varepsilon \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left[ \hat{\theta} \cos \theta (\mathfrak{V}_x^E \sin \varphi - \mathfrak{V}_y^E \cos \varphi) + \hat{\phi} (\mathfrak{V}_x^E \cos \varphi + \mathfrak{V}_y^E \sin \varphi) \right] \quad (2.114)$$

และเมื่อนำสมการศักย์เวกเตอร์ทั้งสองนี้ไปแทนในสมการที่ 2.103 ก็จะได้คำตอบซึ่งเป็นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกลม นั่นคือ

$$E_\theta = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left[ (\mathfrak{V}_x^E \cos \varphi + \mathfrak{V}_y^E \sin \varphi) + \eta \cos \theta (\mathfrak{V}_y^H \cos \varphi - \mathfrak{V}_x^H \sin \varphi) \right] \quad (2.115)$$

$$E_\phi = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left[ -\eta (\mathfrak{V}_x^H \cos \varphi + \mathfrak{V}_y^H \sin \varphi) + \cos \theta (\mathfrak{V}_y^E \cos \varphi - \mathfrak{V}_x^E \sin \varphi) \right] \quad (2.116)$$

ในกรณีที่ช่องเปิดติดตั้งอยู่บนแผ่นระนาบตัวนำ จะใช้วิธีจำลองปัญหาดังกล่าวให้เป็นผนังไฟฟ้าและมีความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กแผ่กระจายในอากาศบริเวณช่องเปิด เท่ากับ

$$\bar{M}_s = 2 \cdot (\bar{E}_a \times \hat{n}) \quad (2.117)$$

ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จะถูกตัดทิ้งก็ต่อเมื่อ  $z \geq 0$  เท่านั้น ซึ่งกรณีนี้จะทำให้  $\bar{V}^H = 0$

สำหรับกรณีช่องเปิดอยู่ในอากาศ การกำหนดความหนาแน่นของกระแส จะต้องรวมทั้งกระแสแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการสมมติสนามที่เกิดขึ้นบริเวณช่องเปิด จะต้องมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นโหมด TEM (Transverse Electromagnetic Mode) โดยที่

$$\bar{H}_a = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \bar{E}_a \quad (2.118)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ของสนามในโหมด TEM สามารถนำมาแสดงสนามที่เกี่ยวข้องได้นั้นคือ

$$\vec{J}^H = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \vec{J}^E \quad \text{หรือ} \quad J_x^H = -\frac{J_y^E}{\eta}, J_y^H = -\frac{J_x^E}{\eta}$$

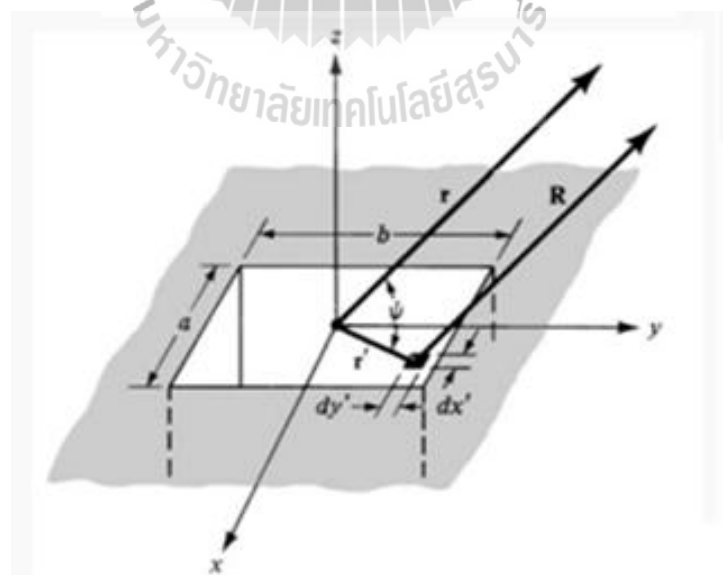
การสมมติในลักษณะนี้ จะมีความถูกต้องพอสมควรในกรณีที่เป็นช่องเปิดที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก และมีอัตราขยายสูง ดังนั้นช่องเปิดจึงควรมีขนาดอย่างน้อยสองเท่าของความยาวคลื่นการสมมติที่กำหนดขึ้นดังกล่าวจะทำให้สมการที่ 2.115 และ 2.116 ลดรูปเหลือเพียง

$$E_\theta = j\beta\eta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \frac{1 + \cos\theta}{2} (\mathfrak{I}_x^E \cos\varphi + \mathfrak{I}_y^E \sin\varphi) \quad (2.119)$$

$$E_\phi = j\beta\eta \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \frac{1 + \cos\theta}{2} (\mathfrak{I}_y^E \cos\varphi + \mathfrak{I}_x^E \sin\varphi) \quad (2.120)$$

### ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบกรวยอนันต์

จากรูปที่ 2.15 เป็นการจำลองช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่อยู่บนระนาบกรวยอนันต์ (Rectangular Aperture on Infinite Ground Plane) โดยช่องเปิดดังกล่าววางอยู่บนระนาบ  $x, y$  ในระนาบพิกัดฉากและขนาดของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับ  $L_x \times L_y$



รูปที่ 2.15 แบบจำลองช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบขนาดอนันต์

ในกรณีที่แอมพลิจูดและเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดช่องเปิดมีค่าคงที่จะเรียกช่องเปิดแบบนี้ว่า ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีสนามสม่ำเสมอ (Uniform Rectangular Aperture) โดยการโพลาไรซ์ของสนามที่ช่องเปิดจะสมมติให้เป็นแนวตั้งและอยู่ในแนวแกน  $y$  ดังสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงแสดงได้ด้วยสมการ

$$\vec{E}_a = E_0 \hat{y} \quad (2.121)$$

ขณะที่  $|x| \leq \frac{L_x}{2}$  และ  $|y| \leq \frac{L_y}{2}$  และเพื่อให้เป็นไปตามหลักการสมมูลที่ได้ศึกษาไปแล้ว เราจะสมมติให้ผนังสนามไฟฟ้าอยู่ที่ตำแหน่ง  $Z = 0$  ซึ่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดขึ้นจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\vec{M}_{s_e} = \vec{E} \times \hat{n}$  และเมื่อประยุกต์ทฤษฎีเงาเข้าไปก็จะสามารถหาคำตอบของแหล่งกำเนิดสมมูลซึ่งมีการแพร่กระจายในช่องว่างนั้นได้นั้นคือ

$$\vec{M}_s = 2\vec{M}_{s_e} = 2E_0 \hat{y} \times \hat{z} = 2E_0 \hat{x} \quad (2.122)$$

สำหรับสมการอินทิกรัลการแผ่กระจายกำลังงานที่ค่าไม่เป็นศูนย์ จะมีเพียงสมการเดียวเท่านั้นคือ

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_y^E &= 2E_0 \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} e^{j\beta x' \sin \theta \cos \varphi} e^{j\beta y' \sin \theta \sin \varphi} dx' dy' \\ &= 2E_0 L_x L_y \frac{\sin \left[ \frac{\beta L_x}{2} \sin \theta \cos \varphi \right]}{\frac{\beta L_x}{2} \sin \theta \cos \varphi} \times \frac{\sin \left[ \frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \sin \varphi \right]}{\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \sin \varphi} \end{aligned} \quad (2.123)$$

เพื่อจะพิจารณาให้ง่ายขึ้นจะแทนเทอมที่ปรากฏในสมการที่ 2.123 ด้วยตัวแปร  $u$  และ  $v$  โดยที่

$$u = \frac{\beta L_x}{2} \sin \theta \cos \varphi \quad (2.124)$$

$$v = \frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \sin \varphi$$

ดังนั้นสมการที่สมบูรณ์ของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปซึ่งเกิดจากการนำสมการที่ 2.124 แทนลงในสมการที่ 2.119 และ 2.120 จะได้เท่ากับ

$$E_\theta = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_0 L_x L_y \sin \varphi \frac{\sin u}{u} \frac{\sin v}{v} \quad (2.125)$$

$$E_\varphi = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_0 L_x L_y \cos \theta \cos \varphi \frac{\sin u}{u} \frac{\sin v}{v} \quad (2.126)$$

ส่วนแบบรูปแอมพลิจูด (Amplitude Pattern) ของสนามรวมทั้งหมดจะมีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} |\vec{E}| = F(\theta, \varphi) &= \sqrt{\sin^2 \varphi + \cos^2 \theta \cos^2 \varphi} \times \left( \frac{\sin u}{u} \frac{\sin v}{v} \right) \\ &= \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} \times \left( \frac{\sin u}{u} \frac{\sin v}{v} \right) \end{aligned} \quad (2.127)$$

เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ามาพล็อตเป็นแบบรูปหลักนอร์แมลไลซ์ (Normalized Principal Pattern) ซึ่งประกอบด้วยระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ก็จะได้

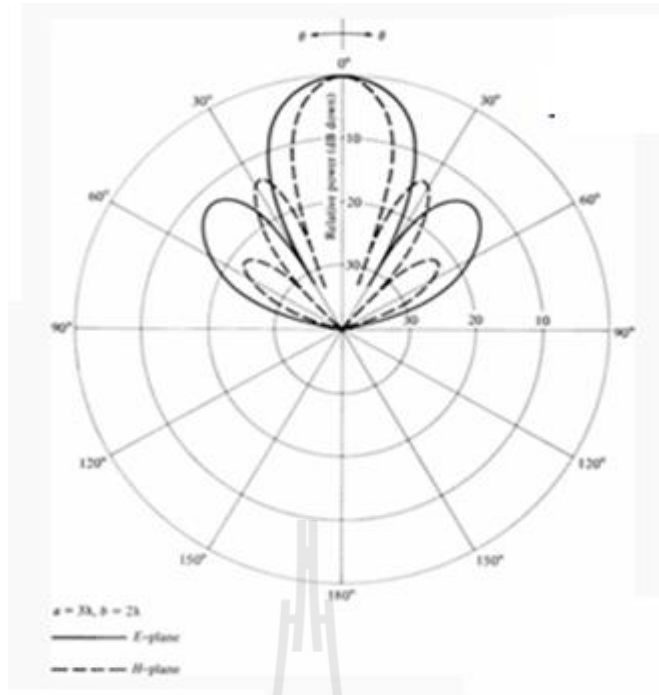
1) แบบรูปหลักในระนาบสนามไฟฟ้า ( $\varphi = 90^\circ$ )

$$\vec{E}_\theta = \frac{\sin\left(\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta} \quad (2.128)$$

2) แบบรูปหลักในระนาบสนามแม่เหล็ก ( $\varphi = 0^\circ$ )

$$\vec{E}_\varphi = \frac{\sin\left(\frac{\beta L_x}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\beta L_x}{2} \sin \theta} \quad (2.129)$$

เมื่อนำมาพล็อตเป็นแบบรูปกราฟฟีกวงกลมใด ๆ กำหนดให้ขนาดช่องเปิด  $L_x = 3\lambda$  และ  $L_y = 2\lambda$  จะได้แบบรูปดังรูปที่ 2.16



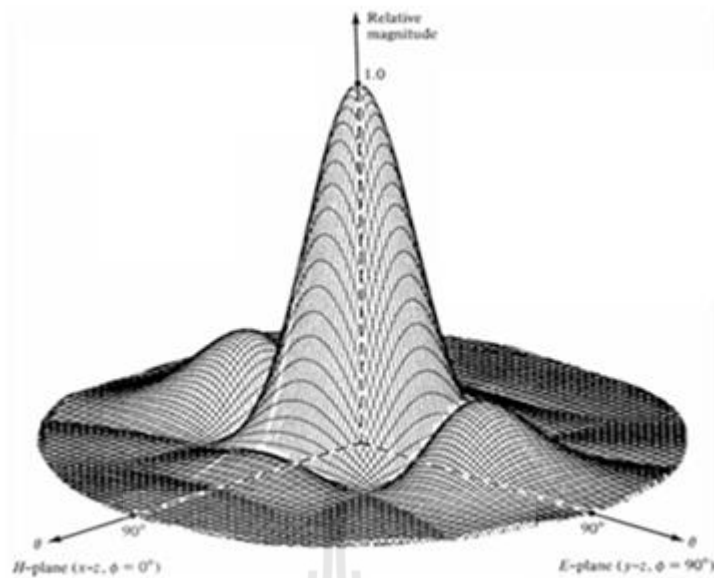
รูปที่ 2.16 แบบรูปหลักนอร์แมลไรซ์การแผ่กระจายกำลังงานของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยที่  $L_x = 3\lambda$  และ  $L_y = 2\lambda$

สำหรับกรณีที่ช่องเปิดมีขนาดทางไฟฟ้าที่กว้างมากๆ ลำคลื่นหลักที่แผ่กระจายออกมาจะมีความกว้างลำครึ่งกำลังที่แคบมากๆ และเทอม  $\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}$  ที่อยู่ในสมการที่ 1.217 จะสามารถตัดออกได้ เนื่องจากเทอมนี้จะมีค่าใกล้เคียงค่าหนึ่งในทุกๆ มุมสังเกตที่อยู่ในลำคลื่นหลัก นี้คือเหตุผลว่าทำไมในทฤษฎีของแถวลำดับขนาดใหญ่ (Large Array) จึงสมมติให้แบบรูปแอมพลิจูดของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าเป็นไปตามสมการ

$$f(u, v) \propto \left| \frac{\sin u}{u} \frac{\sin v}{v} \right| \quad (2.130)$$

โดยที่ 
$$u = \frac{\beta L_x}{2} \sin \theta \cos \varphi \quad \text{และ} \quad v = \frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \sin \varphi$$

ซึ่งกรณีที่เป็นแบบรูปนอร์แมลไรซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก ( $\varphi = 0^\circ$ ) สมการที่ 2.130 จะมีเฉพาะฟังก์ชันของ  $\left| \frac{\sin u}{u} \right|$  โดยที่  $L_x = 20\lambda$  จะทำให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบนี้ โดยพล็อตจาก  $\left| \frac{\sin u}{u} \right| = \left| \frac{\sin [20\pi \sin \theta]}{20\pi \sin \theta} \right|$  ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบรูปนอร์แมลไรซ์ในระนาบสนามแม่เหล็กของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า  
 $TE_{10}$  (mode)

ความกว้างลำคลื่น (Beam width) ของสายอากาศแบบช่องเปิด

ก). ความกว้างลำคลื่นตำแหน่งแรกที่สนามเป็นศูนย์

พารามิเตอร์นี้เป็นการพิจารณาหาตำแหน่งแรกที่ถัดจากโหนดคลื่นหลักทั้งสองข้างของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่มีค่าเป็นศูนย์ โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งทั้งสองที่มีค่าเป็นศูนย์นี้จะเรียกว่า ความกว้างลำคลื่นตำแหน่งแรกที่สนามเป็นศูนย์ (First-Null Beam width: FNBW) และโหนดของคลื่นที่ถัดจากตำแหน่งนี้จะพิจารณาให้เป็นโหนดด้านข้างลำดับแรก (First Side Lobe) ซึ่งจะได้พิจารณาในหัวข้อย่อต่อไป สำหรับตำแหน่งของแบบรูปที่สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์นี้จะหาได้จากสมการที่ 2.128 นั่นคือ

$$\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \Big|_{\theta=\theta_n} = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.131)$$

ทำให้

$$\theta_n = \sin^{-1} \left( \frac{n\lambda}{L_y} \right), \quad (\text{rad}) \quad (2.132)$$

โดยตำแหน่งแรกที่สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์อยู่ที่  $n=1$  ดังนั้นคำตอบของความกว้างลำคลื่นตำแหน่งแรกที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (FNBW<sub>E</sub>) จะหาได้จาก

$$FNBW_E = 2\theta_n = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{L_y} \right), \quad (\text{rad}) \quad (2.133)$$

เมื่อใช้วิธีเดียวกันนี้ก็จะสามารถหาคำตอบของความกว้างลำคลื่นตำแหน่งแรกที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ( $FNBW_H$ ) ได้ด้วยนั่นคือ

$$FNBW_H = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{L_x} \right), \quad (\text{rad}) \quad (2.134)$$

### ข). ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

การพิจารณาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beam width) จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกขนาดของลำคลื่นหลักกว่าแคบหรือกว้างอย่างไร โดยวัดจากแบบรูปการแผ่คลื่นที่ กำลังงานลดลงมาครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่สนามมีค่าสูงสุดซึ่งในกรณีของแบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้าตำแหน่งที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\sin \left( \frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \right)}{\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.135)$$

หรือจากสมการ

$$\frac{\beta L_y}{2} \sin \theta \Big|_{\theta=\theta_h} = 1.391 \quad (2.136)$$

ทำให้

$$\theta_h = \sin^{-1} \left( \frac{0.443\lambda}{L_y} \right), \quad (\text{rad}) \quad (2.137)$$

ดังนั้นค่าความกว้างลำครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่อยู่ในรูปสนามไฟฟ้า จะหาได้จากสมการ

$$HPBW_E = 2 \sin^{-1} \left( \frac{0.443\lambda}{L_y} \right) \quad (2.138)$$

อย่างไรก็ตามการประมาณค่าลำดับแรก (First Order Approximation) จะเป็นไปได้ในกรณีที่ค่าในวงเล็บของสมการที่ 2.138 มีค่าน้อยมากๆ ( $L_y \ll 0.443\lambda$ ) หรือในกรณีที่ช่องเปิดมีขนาดใหญ่โต ซึ่งจะทำให้สมการของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกลายเป็น

$$HPBW_E = 0.886 \left( \frac{\lambda}{L_y} \right) \quad (2.139)$$

ส่วนค่าความกว้างลำครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่อยู่ในระนาบสนามแม่เหล็ก จะมีสมการที่คล้ายคลึงกัน นั่นคือ

$$HPBW_H = 2 \sin^{-1} \left( \frac{0.443\lambda}{L_x} \right) \quad (2.140)$$

### ค). ระดับโวลต์ด้านข้าง

จะเห็นว่าคุณสมบัติของฟังก์ชัน  $\left| \frac{\sin x}{x} \right|$  นั้นจะทำให้โวลต์แรกมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโวลต์ย่อยอื่นๆ โดยระดับโวลต์สูงสุดของโวลต์นี้จะมีค่าเท่ากับ

$$|E_\theta(\theta = \theta_s)| = \left| \frac{\sin 4.494}{4.494} \right| = 0.217 = -13.26 \text{ dB} \quad (2.141)$$

อย่างไรก็ตามหากต้องการคำนวณหาโวลต์ด้านข้างและความกว้างลำครึ่งกำลังของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก จะต้องเพิ่มเทอมของ  $\cos \theta$  เข้าไปด้วย แต่ถ้ากรณีที่ช่องเปิดมีขนาดเล็กเทอมนี้ก็จะไม่จำเป็นต้องเพิ่มเข้าไป

### ง). สภาพเจาะจงทิศทาง

วิธีการทั่วไปสำหรับการใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางไม่ว่าจะเป็นของสายอากาศชนิดใดก็ตาม จะต้องทราบค่าของกำลังงานรวม ที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศ ซึ่งกรณีของช่องเปิดนี้จะคำนวณหาจากสมการของแบบรูปการแผ่กระจายของสนามระยะไกล เมื่อทราบคำตอบของกำลังงานรวมนี้ จะสามารถหาคำตอบของค่าสภาพเจาะจงทิศทางได้โดยใช้สมการ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = 4\pi \frac{U_{\max}}{\Pi_{\text{rad}}} \quad (2.142)$$



ซึ่งในกรณีของช่องเปิดนี้ จะมีค่าความเข้มของสนามเท่ากับ

$$U(\theta, \varphi) = \frac{1}{2\eta} \left[ |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2 \right] r^2 = U_{\max} |F(\theta, \varphi)|^2 \quad (2.143)$$

โดยที่

$$\Omega_A = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.144)$$

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ช่องเปิดที่ส่งคลื่นออกไปในโหมด TEM เราสามารถใช้วิธีการที่ง่ายกว่าโดยสมมติว่าคลื่นที่เกิดขึ้นที่ช่องเปิดใน โหมดที่มีค่าคงที่หรือมีความสม่ำเสมอ ( $\vec{E}_a = \hat{y}E_0$ ) ดังนั้น สนามแม่เหล็กที่ช่องเปิดจึงมีค่าเท่ากับ

$$\vec{H}_a = -\hat{x} \frac{E_0}{\eta} \quad (2.145)$$

ซึ่งจะทำให้คำตอบที่ต้องการค่อนข้างที่จะแม่นยำ ส่วนองค์ประกอบของสนามระยะไกลในกรณีนี้ได้แสดงไว้ ซึ่งเมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ 2.143 ก็จะได้ค่าความเข้มสนามซึ่งเท่ากับ

$$U(\theta, \varphi) = \frac{\beta^2}{32\pi^2\eta} (1 + \cos\theta)^2 \left[ |\mathfrak{F}_x^E|^2 + |\mathfrak{F}_y^E|^2 \right] \quad (2.146)$$

โดยที่ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในสมการที่ 2.146 สามารถหาได้โดยแทนสมการอินทิกรัลของการแผ่กระจายกำลังงานลงไปก็จะได้

$$U_{\max} = \frac{\beta^2}{8\pi^2\eta} \left| \iint_{S_A} \vec{E}_a ds' \right|^2 \quad (2.147)$$

อย่างไรก็ตามการอินทิเกรตตลอดพื้นผิวปิดทรงกลมเพื่อหาค่าความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานจากสมการที่ 2.147 จะทำได้ไม่ยากนัก แต่สามารถเลี่ยงวิธีนี้ได้ด้วยการสังเกตว่ากำลังงานรวมที่เดินทางมาถึงบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล จะต้องผ่านทะลุช่องเปิดออกมาเป็นตำแหน่งแรก โดยค่ากำลังงานที่บริเวณช่องเปิดทั่วไปสามารถหาได้จาก

$$\Pi_{rad} = \iint_S \vec{P}_{av} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{2\eta} \iint_{S_a} |\vec{E}_a|^2 ds \quad (2.148)$$

สุดท้ายเมื่อแทนสมการ 2.147 และ 2.148 ลงในสมการที่ 2.143 ก็จะได้คำตอบของค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของช่องเปิดดังกล่าวนี้คือ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \iint_{S_A} \vec{E}_a ds' \right|^2}{\iint_{S_A} |\vec{E}_a|^2 ds'} \quad (2.149)$$

สำหรับกรณีที่เป็นช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีกระแสและเฟสสม่ำเสมอ สมการในการแสดงกำลังของคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ได้แก่

$$\Pi = L_x L_y \frac{|E_0|^2}{2\eta} \quad (2.150)$$

และ

$$U_{max} = \left( \frac{L_x L_y}{\lambda} \right)^2 \frac{|E_0|^2}{2\eta} \quad (2.151)$$

ดังนั้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{max}}{\Pi} = \frac{4\pi}{\lambda^2} L_x L_y = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (2.152)$$

จะเห็นว่าในกรณีของช่องเปิดซึ่งมีกระแสและเฟสสม่ำเสมอนั้น จะมีพื้นที่ทางกายภาพและพื้นที่ประสิทธิผลของช่องเปิดเท่ากับ ( $A_p = A_{eff}$ )

### ตัวอย่างในการออกแบบสายอากาศสายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna)

ถ้าต้องการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิด โดยให้มีค่าสภาพเงาเชิงทิศทาง สูงสุดที่ทำมุม  $30^\circ$  จากตำแหน่งเดิมจงหาขนาดที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศตัวนี้ทำงานได้ตามต้องการ โดย

1. สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม
2. สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบวงกลม

#### วิธีทำ 1 สายอากาศตัวนี้เป็นช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม

เนื่องจากทุกด้านของสายอากาศ ช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม มีขนาดเท่ากันดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้สมการได้ 2 สมการ คือ

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ch}} \quad \text{และ} \quad b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ce}}$$

$$a = b = \frac{\lambda}{2 \sin 30} = \lambda$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถหาค่าสภาพเงาเชิงทิศทางได้จากสมการ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{em} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left( \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ce}} \right) \left( \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ch}} \right)$$

$$D_0 = \frac{\pi}{\sin^2(30^\circ)} = 12.5664 = 10.992 \text{ dB} \quad \#$$

#### 2. สายอากาศตัวนี้เป็นช่องเปิดแบบวงกลม

เนื่องจากสายอากาศ ช่องเปิดแบบวงกลม เราต้องหารัศมีของสายอากาศจากสมการ

$$a = \frac{1.841\lambda}{2\pi \sin \theta_c} = \frac{\lambda}{3.413 \sin \theta_c} = \frac{\lambda}{3.413 \sin 30^\circ} = 0.586\lambda$$

เราสามารถหาค่า สภาพเงาเชิงทิศทาง ได้จากสมการ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi \left( \frac{1.841}{2\pi \sin \theta_c} \right)^2 = \frac{3.4129}{\sin^2 \theta_c} = \frac{1.068\pi}{\sin^2 \theta_c}$$

$$D_0 = \frac{1.068\pi}{\sin^2 30^\circ} = \frac{1.068\pi}{\sin^2 30^\circ} = 13.647 = 11.35 \text{ dB} \quad \#$$

## 2.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวกับทฤษฎีสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังของการหาค่าพารามิเตอร์ และตัวอย่างในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละชนิดที่ได้นำมาศึกษา



## บทที่ 3

### การศึกษาและออกแบบโครงการ

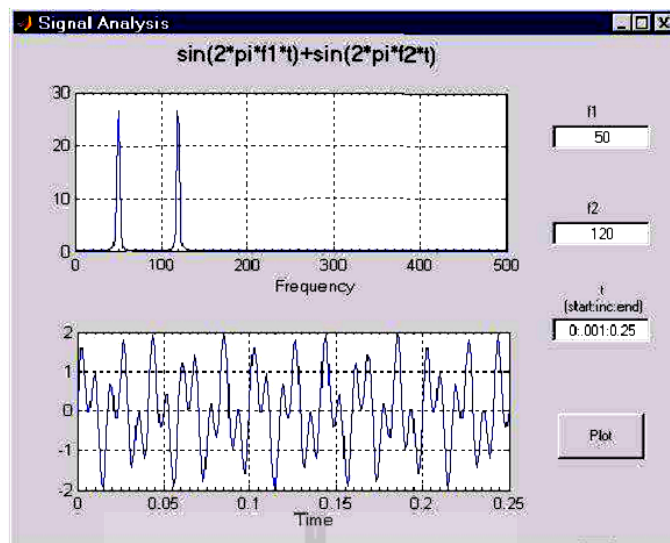
#### 3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB (GUI) เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น จากการศึกษาเรียนรู้ทฤษฎีในรายวิชาเกี่ยวกับสายอากาศชนิดต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศแต่ละชนิด ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดต่างมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องศึกษารายละเอียดต่างๆของโปรแกรม MATLAB (GUI) ให้เข้าใจเสียก่อน เพื่อความสะดวกในการนำไปออกแบบ และเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการใช้งานโปรแกรม

#### 3.2 การศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB (GUI)

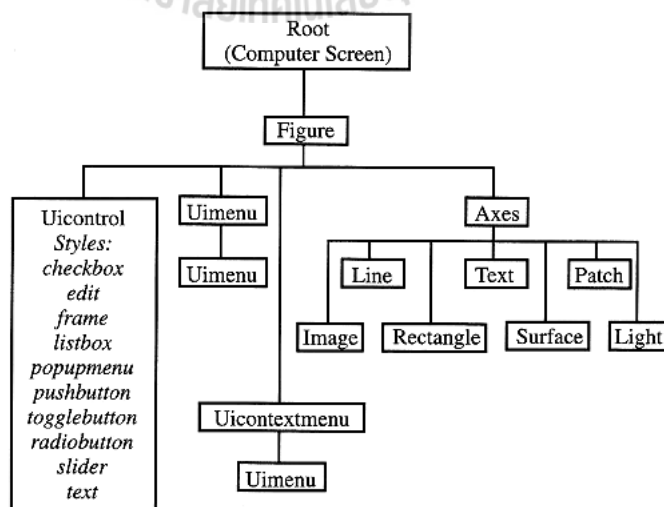
โปรแกรม MATLAB เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูง โดยย่อมาจาก matrix laboratory ใช้ในการคำนวณต่างๆไปซึ่งจะง่ายต่อการดำเนินงานทางเมทริกซ์และเวกเตอร์ จนถึงการคำนวณที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขและการแสดงผลทางกราฟิกทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ ในรูปแบบต่างๆ การเขียนโปรแกรมมีลักษณะที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ด้วยเหตุนี้โปรแกรม MATLAB จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

การสร้างการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้กับคอมพิวเตอร์ (Graphic User Interface : GUI) จะอยู่ในกรอบความคิดที่ว่าทุกๆสิ่งที่ปรากฏบนหน้าต่างรูปภาพ (Figure) ของโปรแกรม MATLAB จะเป็นวัตถุ(Object) ซึ่งมีเอกลักษณ์และคุณลักษณะเฉพาะตัว (Handle) ที่ไว้ใช้ในการติดต่อ โดยสามารถติดต่อระหว่างผู้ใช้กับคอมพิวเตอร์ได้ผ่านทางเมาส์ คีย์บอร์ด หรืออุปกรณ์อื่นๆ ดังแสดงตัวอย่าง GUI ได้ดังภาพ



รูปที่ 3.1 Handle Graphic

วัตถุที่ถูกสร้างโดยใช้คำสั่งทางกราฟิกจะถูกเรียกว่า Handle Graphic Object ซึ่งมีชนิดและส่วนประกอบต่างๆดังไดอะแกรมที่ปรากฏ ซึ่งจากไดอะแกรมจะสังเกตเห็นว่า Figure จะเป็นกึ่งระดับลูก (Child) ของ Root (ซึ่ง Root คือหน้าจอกอมพิวเตอร์ ไม่ใช่คำสั่งทางกราฟิก) หรืออาจเรียกว่า Root เป็นกึ่งระดับพ่อแม่ (Parent) ของ Figure ส่วน User-Interface Object (Uicontrol, Uimenu, Uicontextmenu) และ Axes จะเป็นกึ่งระดับลูกของ Figure ซึ่ง Root สามารถประกอบด้วย Figure มากกว่าหนึ่ง และแต่ละ Figure ก็สามารถประกอบด้วย Axes มากกว่าหนึ่ง โดยการจัดลำดับชั้นของวัตถุต่างๆสำหรับการสร้างหน้าต่างรูปภาพนี้ จะถูกเรียกว่า object hierarchy ซึ่งรายละเอียดของวัตถุต่างๆสามารถแสดงได้ตามตาราง

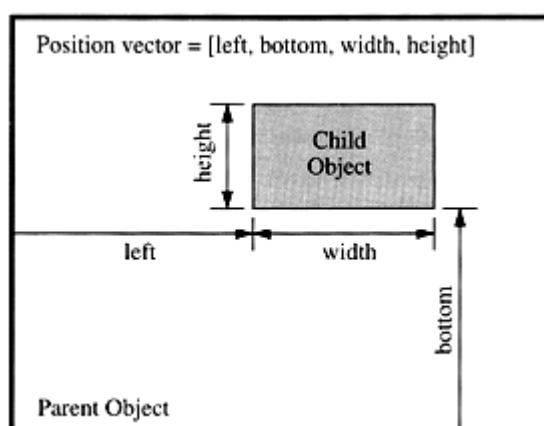


รูปที่ 3.2 รายละเอียดของส่วนประกอบใน Figure

ตารางแสดงรายละเอียดของ Handle Graphic Object

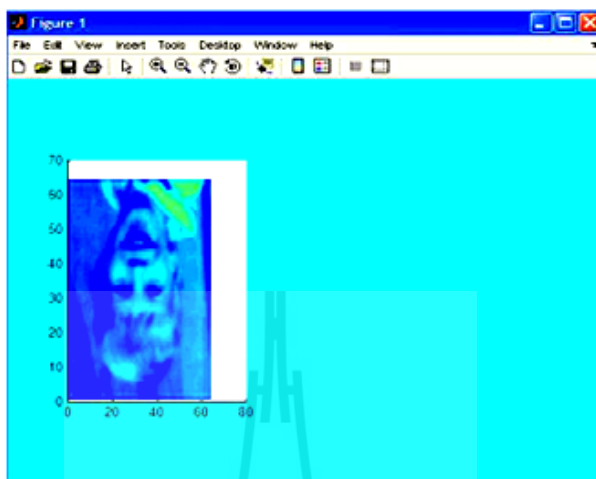
Object	Description
<i>root</i>	Computer platform running MATLAB.
<i>figure</i>	Window on the computer screen.
<i>uicontrol</i>	User interface control in a <i>figure</i> .
<i>uimenu</i>	User interface menu in a <i>figure</i> .
<i>uicontextmenu</i>	User interface contextual menu in a <i>figure</i> .
<i>axes</i>	Rectangular coordinate system for plotting in a <i>figure</i> .
<i>image</i>	2-D picture in an <i>axes</i> .
<i>light</i>	Directional light source shining on an <i>axes</i> .
<i>line</i>	Line connecting data points on an <i>axes</i> .
<i>patch</i>	Polygonal area defined by vertices on an <i>axes</i> .
<i>rectangle</i>	Rectangular to elliptical shape on an <i>axes</i> .
<i>surface</i>	3-D representation of a surface on an <i>axes</i> .
<i>text</i>	Character string placed on an <i>axes</i> .

ยกตัวอย่างการใช้คำสั่งต่างๆ ทางกราฟฟิกดังตารางข้างต้นเพื่อสร้างวัตถุ(ซึ่งพิจารณาทั้งแบบคุณสมบัติเป็นค่าเริ่มต้น (default value) หรือกำหนดค่าคุณสมบัติขึ้นเอง Object('PropertyName', PropertyValue) โดยต้องพิจารณาถึงหลักการ object hierarchy ด้วยและในการกำหนดตำแหน่ง (Position) และขนาดของภาพที่จะวางบนหน้าต่างรูปภาพ จะถูกกำหนดด้วยเวกเตอร์ทางตำแหน่ง (position vector) ทั้งหมด 4 ค่าด้วยกันคือ [left, bottom, width, height] ซึ่ง (0,0) คือตำแหน่งมุมล่างซ้าย และ (1,1) คือตำแหน่งมุมบนขวา ดังรายละเอียดที่แสดงในรูป



รูปที่ 3.3 การกำหนด position vector

```
>> figure('color','cyan');
>> axes('position',[0,1,0,2,0,3,0,6]);
>> image;
```



รูปที่ 3.4 การแทรกรูปภาพโดยใช้คำสั่ง image

(หมายเหตุ: รายละเอียด PropertyName และ PropertyValue ของวัตถุต่างๆ สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก Text MATLAB ที่เกี่ยวกับ GUI)

### 3.2.1 ฟังก์ชันที่สำคัญในการสร้าง GUI

`get(H,'PropertyName')` ใช้เรียกดูค่าคุณสมบัติตามชื่อคุณสมบัติ `PropertyName` ของ handle ชื่อ `H` ในกรณีที่ไม่มีชื่อคุณสมบัติ MATLAB จะแสดงรายละเอียดของคุณสมบัติทั้งหมด

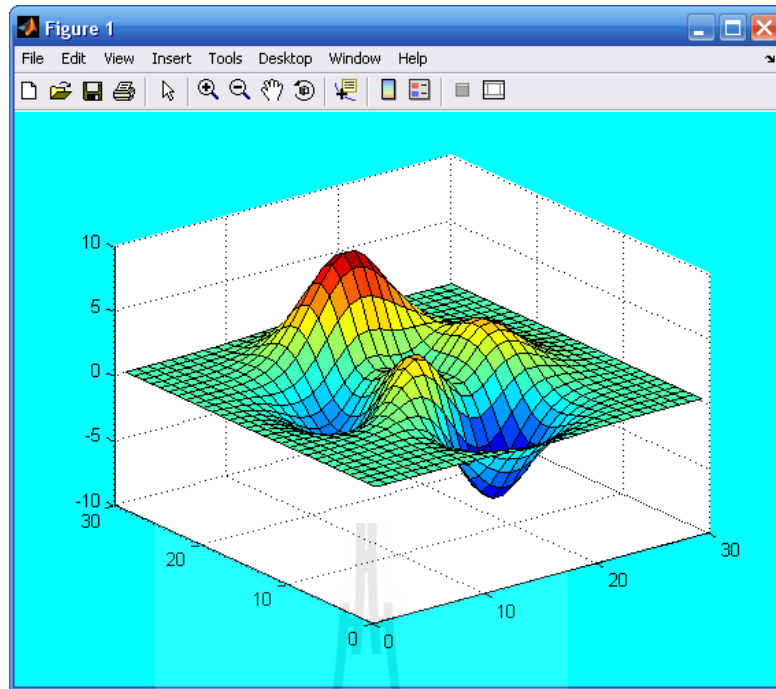
`set(H,'PropertyName', PropertyValue)` ใช้ปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติ `Property value` ตามชื่อคุณสมบัติ `PropertyName` ของ handle ชื่อ

`reset(H)` ใช้รีเซ็ตค่าทุกๆคุณสมบัติของ handle ชื่อ `H` กลับไปเป็นค่าเริ่มต้น(ยกเว้นในเรื่องของตำแหน่ง (position) และหน่วยทางด้านขนาด(unit))

`H=findobj('PropertyName', PropertyValue, ;)` ใช้ในการค้นหาวัตถุตามชื่อคุณสมบัติ `PropertyName` ประกอบกับค่าคุณสมบัติ `PropertyValue` ที่ต้องการหลายๆค่าพร้อมกัน โดยจะได้ค่ามาเก็บไว้ใน handle ชื่อ `H`

```
>> H=figure('color',[0 1 1]);           (หมายเหตุ: [0 1 1] คือการระบุสีในระบบแบบRGB)
>> surf(peaks(30));
```

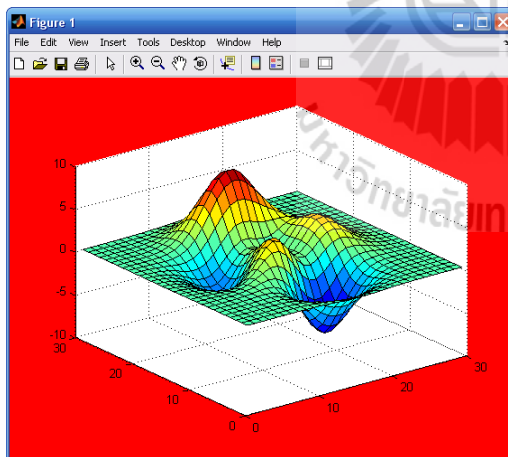




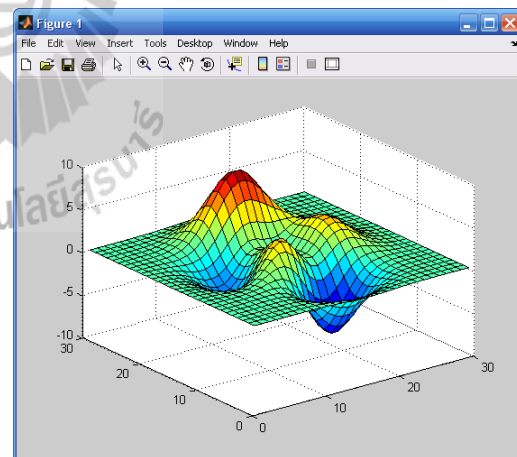
รูปที่ 3.5 surf(peaks(30))

```
>> set(H,'color','r');
```

```
>> reset(H)
```



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 การระบุสีในระบบ RGB Handle Graphic

การเรียกค่าคุณสมบัติ Handle Graphic Object ณ ค่าปัจจุบัน อาจทำได้โดยผ่านคำสั่ง `gcf` (get current figure), `gca` (get current axis), `gco` (get current object) A\_\_ `gcbo` (get current callback object)

`H = gcf` จะให้ handle ชื่อ H ของรูปปัจจุบัน โดยถ้าขณะนั้นยังไม่มีรูปใดได้รับการสร้างขึ้นมาก่อน MATLAB ก็จะทำการสร้างรูปขึ้นมาใหม่พร้อมกับให้ handle แก่รูปนั้น

`H = gca` จะให้ handle ชื่อ H ของแกนปัจจุบันในรูปภาพปัจจุบัน โดยถ้าขณะนั้นยังไม่มีแกนใดได้รับการสร้างขึ้นมาก่อน MATLAB ก็จะทำการสร้างแกนขึ้นมาใหม่พร้อมกับให้ handle แก่แกนนั้น

`H = gco` จะให้ handle ชื่อ H ของวัตถุปัจจุบัน

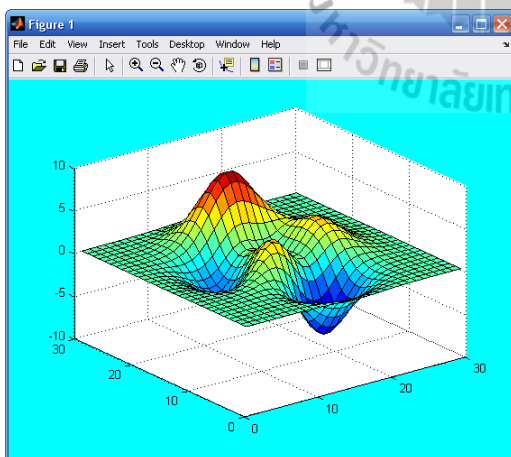
`H = gcbo` จะให้ handle ชื่อ H ของวัตถุที่ callback นั้นกำลังทำงานอยู่ ส่วน `[H, Fig] = gcbo` จะให้ handle ชื่อ H ของวัตถุที่ callback นั้นกำลังทำงานอยู่ พร้อมให้ handle ของรูปภาพชื่อ Fig ที่บรรจุวัตถุนั้นอยู่ด้วย

(หมายเหตุ : callback คือการให้โปรแกรมกระทำตามคำสั่งที่ผู้ออกแบบต้องการ เมื่อวัตถุที่สร้างไว้ถูกเลือกจากผู้ใช้)

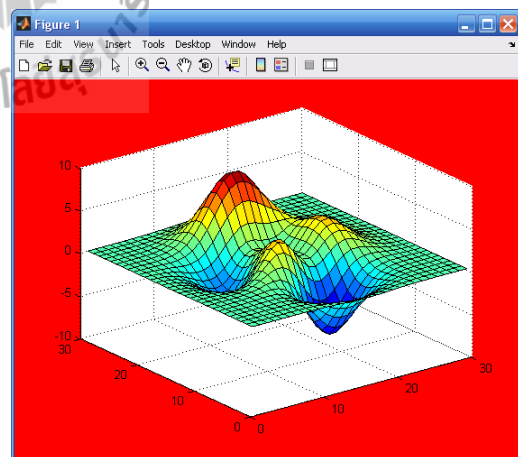
```
>> figure('color',[0 1 1]);
```

```
>> surf(peaks(30));
```

```
>> set(gcf,'color','r');
```




(ก)

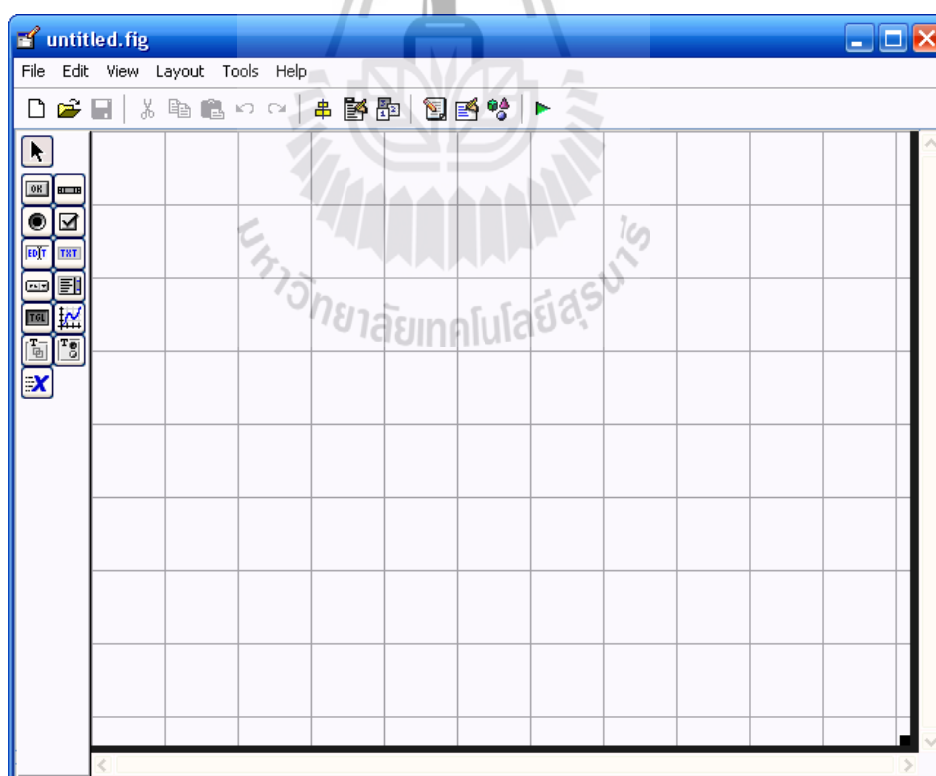


(ข)

รูปที่ 3.7 Handle Graphic ที่กระทำผ่านคำสั่ง callback

### 3.2.2 เครื่องมือในการออกแบบ GUI


การออกแบบ GUI สามารถดำเนินการได้โดยง่ายจากการใช้เมาส์กระทำโต้ตอบผ่านเครื่องมืออันเป็นแนวทางที่เรียกว่า Graphical User Interface Development Environment หรือ GUIDE (Version 7.0) ซึ่ง GUIDE นี้จะช่วยให้ผู้ออกแบบสร้าง จัดการ และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ Handle Graphic Object ได้อย่างรวดเร็ว แต่ถึงกระนั้นการออกแบบ GUI ก็สามารถกระทำโดยผ่านการเขียน M-file ได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งโดยปกติแล้วการใช้ GUIDE ใน MATLAB ก็จะมีปรากฏ M-file มาให้อัตโนมัติ (ประกอบด้วยฟังก์ชันที่กำหนดการทำงานของ GUI และ Callback ดั้งเดิมทั้งหมดที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันย่อย ยกเว้นรายละเอียดคุณสมบัติต่างๆของวัตถุ) พร้อมกับรูปภาพ Fig-file ที่ออกแบบแล้วหลังจากทำการบันทึกหรือสั่ง Run (สามารถเลือกได้ว่าจะให้มี M-file ด้วยหรือไม่ โดยพิจารณาที่ โหมด GUI Option) การใช้ GUID สามารถดำเนินการได้โดยการพิมพ์คำสั่ง `guide` บนหน้าต่างคำสั่ง (command window) ของ MATLAB หรืออาจเลือกไปที่ไอคอน  ได้เลยจากนั้นก็จะมีปรากฏหน้าต่าง (GUIDE Layout Editor) พร้อมเครื่องมืออันเป็นแนวทางที่ใช้ในการออกแบบ GUI ดังแสดงด้วยรูป (เป็นกรณีที่เลือกรูปแบบ (template) ในการสร้าง GUI แบบหน้าต่างว่าง ซึ่งเป็นรูปแบบ default ของโปรแกรม)

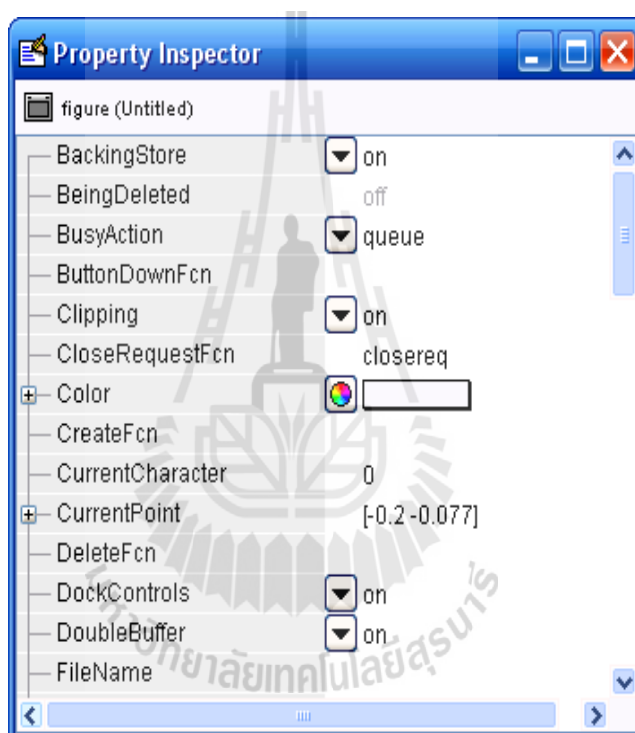


รูปที่ 3.8 GUI แบบหน้าต่างว่าง

เครื่องมืออันเป็นแนวทางที่ใช้ในการออกแบบ GUI จะประกอบไปด้วย 4 เครื่องมือหลักๆ ซึ่งในแต่ละเครื่องมือจะมีหน้าที่การทำงานสำหรับจัดการ Handle Graphic Object ที่แตกต่างกันออกไป แต่ก็จะมีการทำงานที่สัมพันธ์และเกี่ยวเนื่องกันอยู่ ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้


### 3.2.2.1 เครื่องมือในการตรวจเช็คและแก้ไขคุณสมบัติ (Property Inspector)

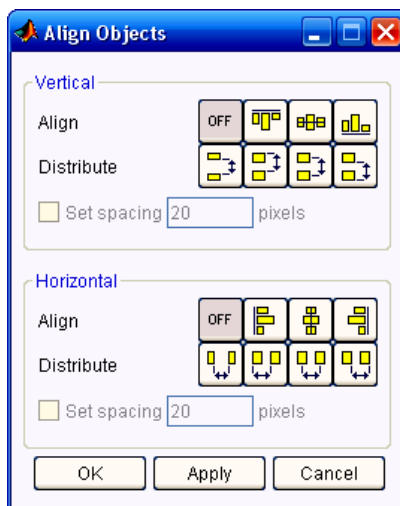
ดำเนินการได้โดยเลือกไปที่ไอคอน  ของหน้าต่าง GUI ซึ่งจะปรากฏรายการและรายละเอียดของคุณสมบัติต่างๆ ของวัตถุที่ถูกเลือกออกมา ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูป ซึ่งเป็นการแสดงรายละเอียดคุณสมบัติของรูปหน้าต่างว่างซึ่งเป็นวัตถุที่ถูกเลือกอยู่ในขณะนี้



รูปที่ 3.9 เครื่องมือในการตรวจเช็คและแก้ไขคุณสมบัติ


### 3.2.2.2 เครื่องมือในการจัดแนววัตถุ (Align Object)

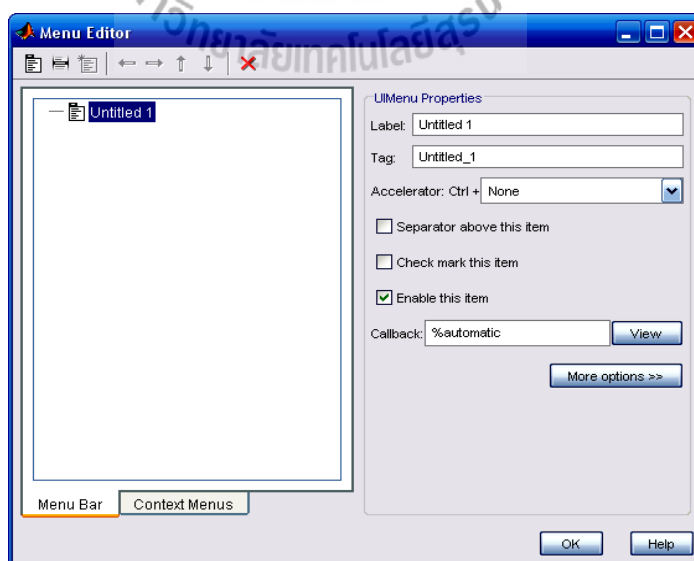
ดำเนินการโดยเลือก  ไปที่ไอคอนของหน้าต่าง GUIDE ซึ่งจะปรากฏเครื่องมือในการจัดแนวและหลักของวัตถุให้เป็นตามแนว (Align) ในการวางแบบต่างๆ ตามลักษณะของการกระจาย (Distribute) แบบต่างๆ ออกมา ดังแสดงด้วยรูป



รูปที่ 3.10 เครื่องมือในการจัดแนววัตถุ (Align Object)

### 3.2.2.3 เครื่องมือในการสร้างและแก้ไขเมนู (Menu Editor)

ซึ่งก็คือฟังก์ชัน Uimenu นั้นเอง ดำเนินการได้โดยเลือกไปที่ไอคอน  ของหน้าต่าง GUIDE ซึ่งจะปรากฏเครื่องมือในการเพิ่ม ลบ หรือแก้ไขเมนูบาร์ (Menu Bar) ต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ด้านบนของหน้าต่างรูปภาพให้สามารถใช้งานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ (ผ่านรูปแบบของการ Callback ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันย่อยใน M-file) รวมไปถึงการสร้างและแก้ไขเมนูที่เกิดจากการคลิกเมาส์ขวาบริเวณวัตถุที่สร้างเมนูไว้ (Context Menus) ซึ่งก็คือฟังก์ชัน Uicontextmenu นั้นเอง ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูป ซึ่งเป็นรูปการสร้างเมนูบาร์ผ่าน Menu Editor และรูปผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างตามลำดับ



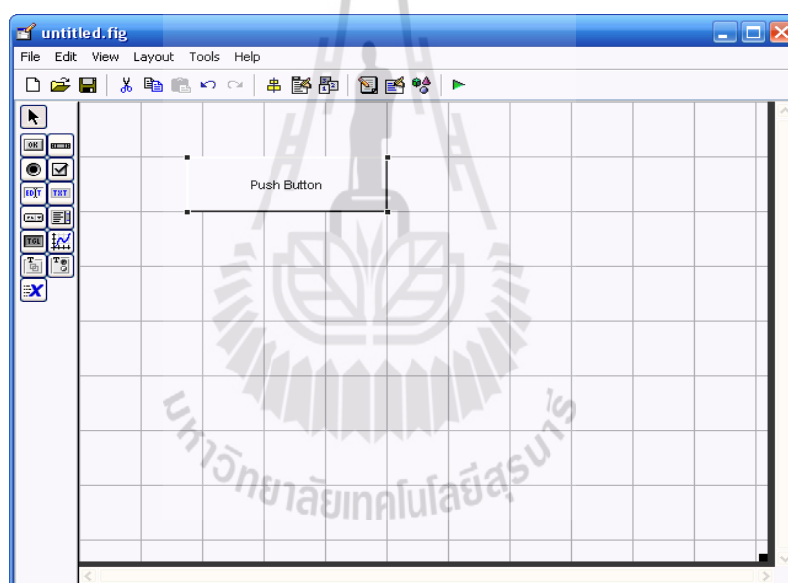
รูปที่ 3.11 เครื่องมือในการสร้างและแก้ไขเมนู (Menu Editor)

### 3.2.2.4 เครื่องมือในการสร้างรูปแบบวัตถุ (Styles Object)

ซึ่งก็คือฟังก์ชัน Unicontrol นั้นเอง โดยจะทำการสร้างรูปแบบต่างๆบนหน้าต่างรูปภาพผ่านผู้ออกแบบ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถกระทำการควบคุมได้ตามความต้องการ (ผ่านรูปแบบของการ Callback ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันย่อยใน M-file) อันประกอบด้วยปุ่มกด (Push Button) , ตัวเลื่อน (Slider) , ปุ่มวิทยุ (Radio Button) , กล่องตรวจสอบ (Check Box) , กล่องตัวอักษรที่สามารถแก้ไขได้ (Edit Text) , ตัวอักษรที่แก้ไขไม่ได้ (Static Text) , เมนูรายการที่เลื่อนได้ (Pop-up Menu) , กล่องรายการ (Listbox) , ปุ่มสวิตช์ (Toggle Button) และกรอบ (Panel) เป็นต้น

ปุ่มกด (Push Button)

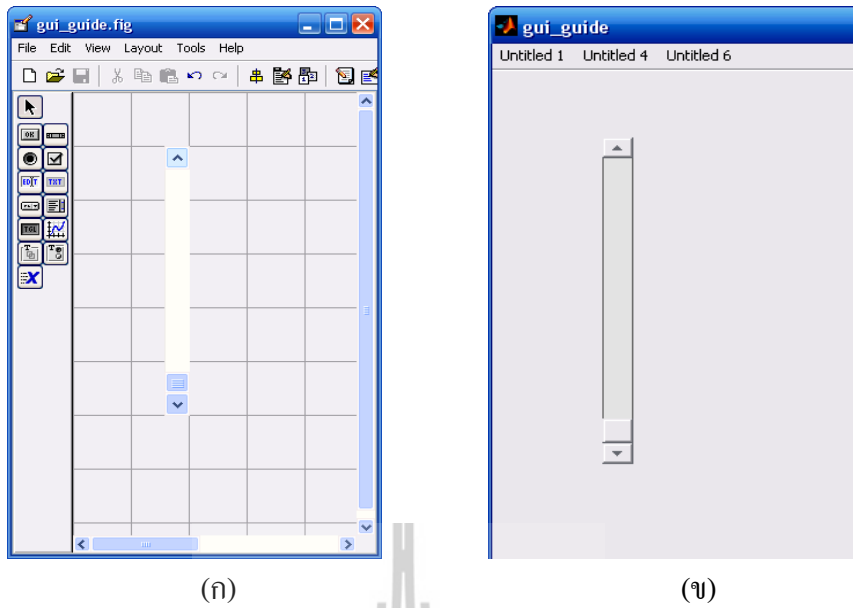
ใช้เป็นปุ่มกดสำหรับติดต่อกับผู้ใช้ โดยผู้ใช้สามารถคลิกเมาส์ที่ปุ่มบนหน้าต่างรูปภาพเพื่อเลือกกระทำตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมมนรอกการคลิกเลือกกระทำ ดังแสดง Push Button ได้ดังรูป



รูปที่ 3.12 เครื่องมือในการสร้างรูปแบบวัตถุ (Styles Object)

### 3.2.3 ตัวเลื่อน (Slider)

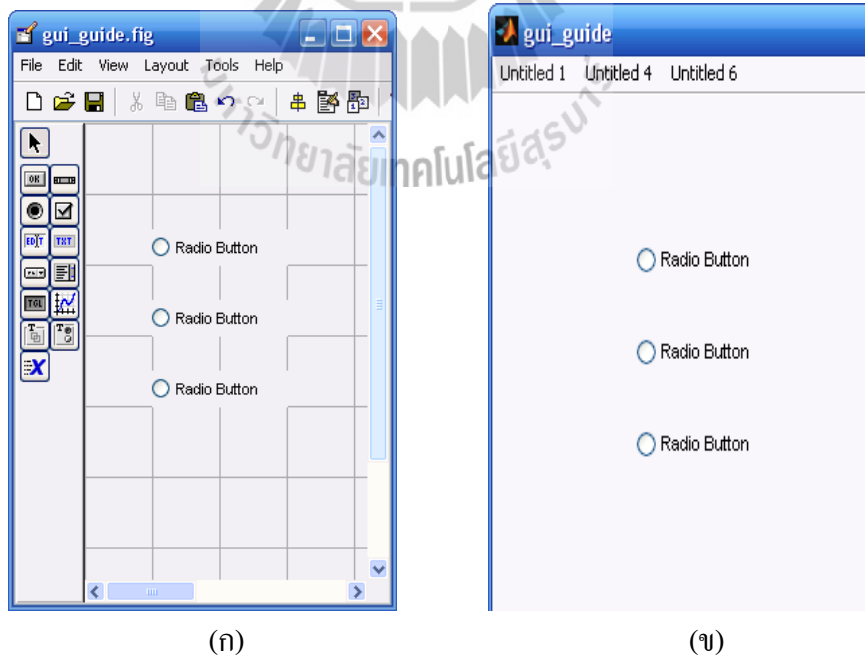
ผู้ใช้สามารถเลือกกระทำผ่านการใช้เมาส์เป็นตัวเลื่อนเพื่อเลือกค่าในย่านที่ผู้ออกแบบกำหนด หรือใช้เมาส์คลิกบนลูกศรเพื่อให้ตัวเลื่อนค่อยๆ เลื่อนไป โดยตำแหน่งของตัวเลื่อนตามสัดส่วนของระยะบนแท่งเลื่อนจะมีความสัมพันธ์กับค่าการเลือกกระทำที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดง Slider ได้ดังรูป



รูปที่ 3.13 ตัวเลื่อน (Slider)

### 3.2.4 ปุ่มวิทยุ (Radio Button)

มีลักษณะเป็นวงกลมเล็กๆ ประกอบกับตัวอักษรแสดงรายละเอียด เพื่อให้ผู้ใช้สามารถคลิกหรือเลือกการกระทำที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปุ่มวิทยุมักจะจัดไว้เป็นกลุ่มให้เลือกและในกลุ่มนั้นจะให้ถูกเลือกได้เพียงหนึ่ง ดังแสดง Radio Button ได้ดังรูป



รูปที่ 3.14 ปุ่มวิทยุ (Radio Button)

ลักษณะโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Radio Button ที่เป็นฟังก์ชันย่อยใน M-file โดยยกตัวอย่างเมื่อพิจารณาจากกลุ่มของ Radio Button ที่ประกอบด้วยปุ่มทั้งหมด 4 ปุ่ม คำสั่ง คำสั่ง Callback ของ Radio Button ปุ่มที่1 จะมีลักษณะโครงสร้างดังนี้

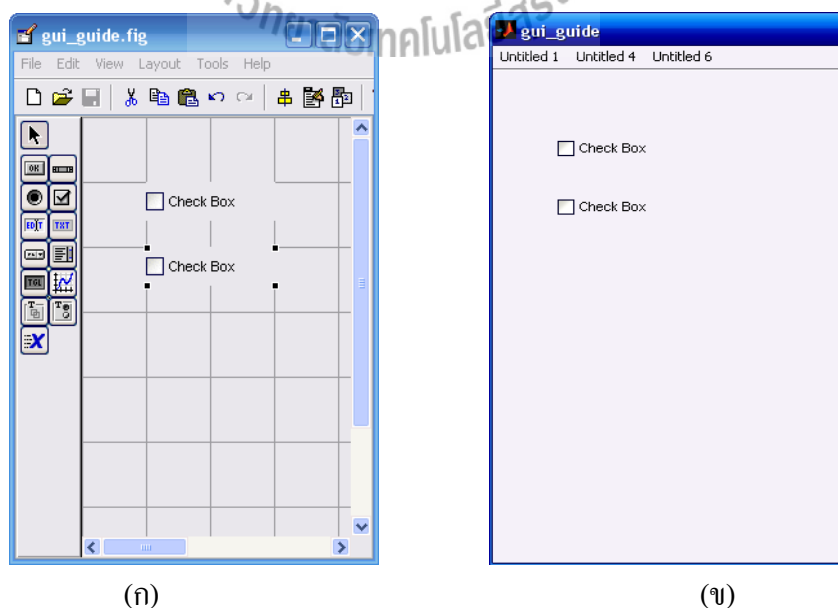
```
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
off=[handles.radiobutton2,handles.radiobutton3,handles.radiobutton4];
mutual_exclcd(off)
```

เขียนแบบโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Radio Button ปุ่มที่ 1 เพื่อนำไปใช้กับปุ่มที่ 2, 3 และ 4 จากนั้นที่บรรทัดสุดท้ายของ M-file ให้สร้างฟังก์ชันย่อยขึ้นมาใหม่เพิ่มเติมเพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันย่อยของ Radio Button ทั้ง 4 ปุ่ม

```
function mutual_exclcd(off)
set(off,'Value',0)
```

### 3.2.5 กล่องตรวจสอบ (Check Box)

มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ประกอบด้วยตัวอักษรแสดงรายละเอียด เพื่อให้ผู้ใช้งานมาคลิกเลือกการกระทำที่ต้องการ โดยผู้ออกแบบสามารถสร้างกล่องตรวจสอบมากกว่าหนึ่งกล่องได้ และแต่ละกล่องอาจจะอิสระหรือไม่อิสระต่อกันก็ได้ ดังแสดง Check Box ได้ดังรูป



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.15 กล่องตรวจสอบ (Check Box)

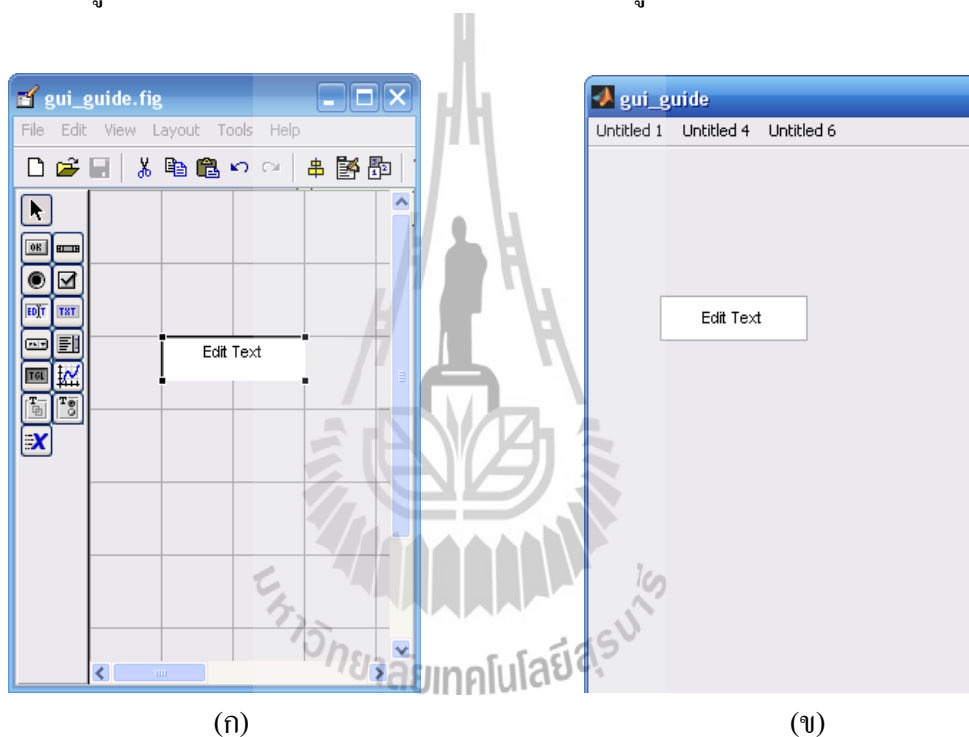


ลักษณะโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Check Box ที่เป็นฟังก์ชันย่อยใน M-file แสดงได้ดังนี้

```
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
if (get(hObject,'Value')==get(hObject,'Max'))
else
```

### 3.2.6 ตัวอักษรที่สามารถแก้ไขได้ (Edit Text)

มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อให้ผู้ใช้สามารถพิมพ์ตัวอักษรใด ที่ต้องการลงในช่องว่างได้ ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงแก้ไขตัวอักษรได้อยู่เสมอ ดังแสดง Edit Text ได้ดังรูป



(ก)

(ข)

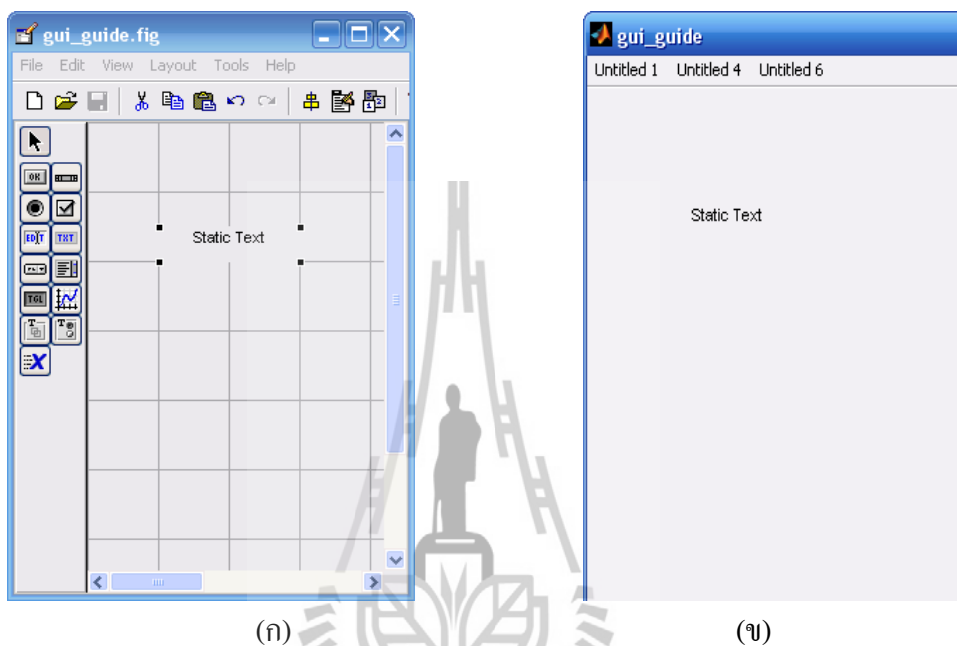
รูปที่ 3.16 ตัวอักษรที่สามารถแก้ไขได้ (Edit Text)

ลักษณะโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Edit Text ที่เป็นฟังก์ชันย่อยใน M-file แสดงได้ดังนี้

```
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
user_string = get(hObject,'string');
% proceed with callback...
```

### 3.2.7 ตัวอักษรที่แก้ไขไม่ได้ (Static Text)

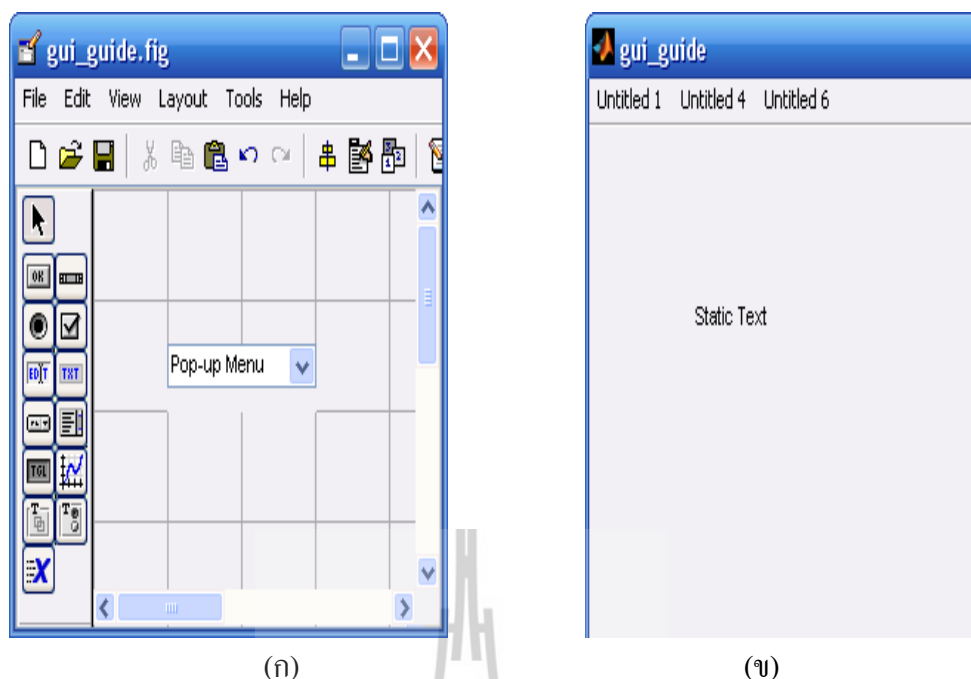
เป็นตัวอักษรที่ผู้ออกแบบเขียนลงบนหน้าต่างรูปภาพ ซึ่งตัวอักษรในลักษณะนี้จะไม่สามารถแก้ไขได้จากผู้ใช้ โดยอาจเป็นตัวอักษรที่เขียนไว้เพื่ออธิบายการทำงานของเมนูและรายการควบคุมต่างๆ บนหน้าต่างรูปภาพ ดังแสดง Static Text ได้ดังรูป ซึ่ง Static Text จะไม่มีรูปแบบสำหรับการ Callback



รูปที่ 3.17 ตัวอักษรที่แก้ไขไม่ได้ (Static Text)

### 3.2.8 เมนูรายการที่เลื่อนได้ (Pop-up Menu)

มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่ปรากฏชื่อเมนู ณ ปัจจุบันอยู่ แต่ยังมีเมนูอื่นๆ ให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้อีก โดยการนำเมาส์คลิกเลื่อนตรงลูกศรด้านขวาเพื่อเลือกเมนูอื่นๆ ที่ซ่อนอยู่ได้ตามต้องการ ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกเมนูได้เพียงเมนูใดเมนูหนึ่งเท่านั้น การกระทำอย่างนี้จะทำให้ผู้ออกแบบประหยัดพื้นที่บนหน้าต่างรูปภาพ ดังแสดง Pop-up Menu ได้ดังรูป



รูปที่ 3.18 เมนุรายการที่เลื่อนได้ (Pop-up Menu)

ลักษณะโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Pop-up Menu ที่เป็นฟังก์ชันย่อยใน M-file เมื่อใช้ค่าคุณสมบัติ Value ในการตัดสินใจ แสดงได้ดังนี้

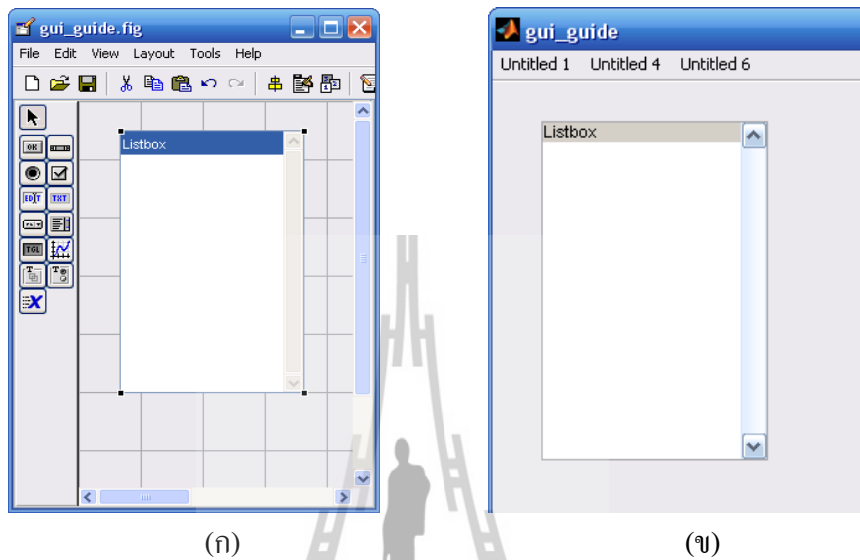
```
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
val = get(hObject,'Value');
switch val
    case 1
    case 2
```

แต่ถ้าใช้คุณสมบัติ String ในการตัดสินใจ แสดงได้ดังนี้

```
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
val = get(hObject,'Value');
string_list = get(hObject,'String');
selected_string = string_list{val};
% etc.
```

### 3.2.9 กล่องรายการ (Listbox)

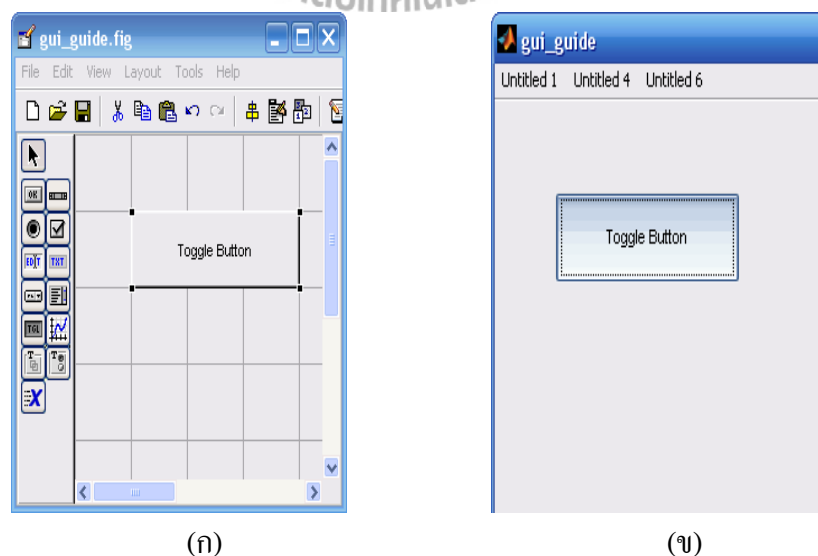
เป็นกล่องรายการที่มีรายการต่างๆ ให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้งานภายในกล่อง ซึ่งรายการจะไม่ซ่อนอยู่เหมือนอย่าง Pop-up Menu โดยผู้ใช้สามารถเลือกรายการได้ที่ละหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งรายการได้ ดังแสดง Listbox ได้ดังรูป



รูปที่ 3.19 กล่องรายการ (Listbox)

### 3.2.10 ปุ่มสวิตช์ (Toggle Button)

ใช้เป็นปุ่มสำหรับติดต่อกับผู้ใช้ในลักษณะที่คล้ายกับสวิตช์ on/off โดยถ้าผู้ใช้นำเมาส์คลิกเลือกที่ปุ่มเพื่อกระทำก็จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเว้าเข้าไป แต่ถ้าผู้ใช้ไม่ได้เลือกก็จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมน ดังแสดง Toggle Button ได้ดังรูป



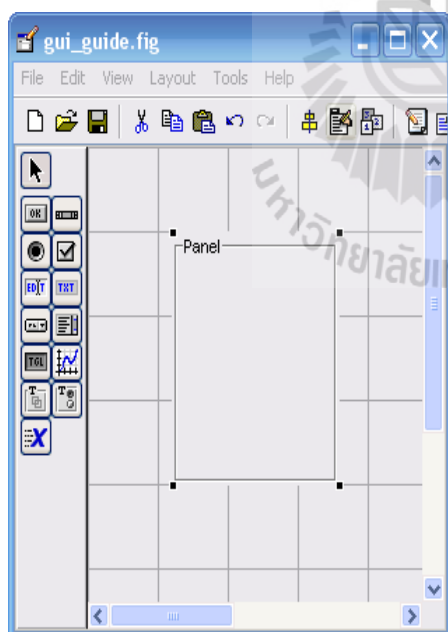
รูปที่ 3.20 ปุ่มสวิตช์ (Toggle Button)

ลักษณะโครงสร้างคำสั่ง Callback ของ Toggle Button ที่เป็นฟังก์ชันย่อยใน M-file แสดงได้ดังนี้

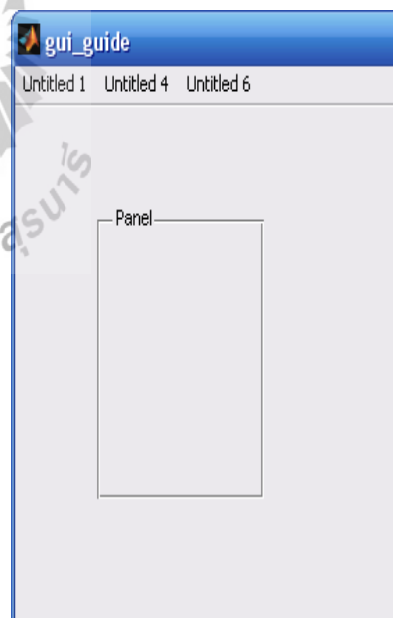
```
function togglebutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
button_state = get(hObject,'Value');
if button_state == get(hObject,'Min')
    % toggle button is pressed
elseif button_state == get(hObject,'Max')
    % toggle button is pressed
end
```

### 3.2.11 กรอบ (Panel)

มีลักษณะเป็นกรอบสี่เหลี่ยมเพื่อนำไปใช้บรรจุเพื่อจัดรูปแบบการควบคุมของปุ่มหรือกล่องควบคุมและตัวอักษรต่างๆ ให้อยู่ในกรอบเดียวกันตามที่ต้องการบนหน้าต่างรูปภาพ เพื่อให้ผู้ใช้พิจารณาส่วนต่างๆ ของหน้าต่างได้ง่ายขึ้น ดังแสดง Panel ได้ดังรูป โดย Panel จะไม่มีรูปแบบสำหรับการ Callback



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 กรอบ (Panel)

### 3.2.12 ฟังก์ชันทั่วไปในการ Callback ของ Handle Graphic Object

- CreateFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการสร้างวัตถุ
- DeleteFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการลบวัตถุ
- ButtonDownFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการคลิกเมาส์บริเวณวัตถุ
- windowButtonDownFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการคลิกเมาส์ภายในหน้าต่างรูปภาพ
- windowButtonMotionFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการเลื่อนตัวชี้เมาส์เข้าไปภายในหน้าต่างรูปภาพ
- windowButtonUpFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการปล่อยปุ่มเมาส์ภายในหน้าต่างรูปภาพ
- KeyPressFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการกดแป้นในรูปภาพ
- ResizeFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการปรับขนาดของรูปภาพ
- CloseRequesFcn กำหนดคำสั่งที่จะทำงานเมื่อมีการปิดรูปภาพ

## 3.3 การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นด้วย MATLAB (GUI)

หัวข้อนี้จะเป็นการสร้างและออกแบบ โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นด้วย MATLAB GUIDE โดยใช้เครื่องมือต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นมาดำเนินการ ดังมีขั้นตอนการดำเนินงานหลักๆ ดังนี้

1. วางรูปแบบของวัตถุที่ต้องการใน GUIDE Layout Editor
2. กำหนดรายละเอียดคุณสมบัติของวัตถุ
3. บันทึกและ Run GUI ที่ได้ออกแบบขึ้น
4. เขียนชุดคำสั่งที่ต้องการให้แก่ GUI โดยผ่าน M-file function
5. Run GUI เพื่อทดสอบความถูกต้องตามชุดคำสั่ง

### 3.3.1 การออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

จากการที่ได้ศึกษาเรียนรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับสายอากาศชนิดต่างๆ มานั้น ผู้จัดทำจึงได้คิดทำโปรแกรมช่วยสอนนี้ขึ้นมา ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงวิธีการสร้างและออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB (GUI) โดยใช้ GUIDE ในการออกแบบดังนี้ (จาก MATLAB7\demos\CreatingAGUIwithGUIDE\_viewlet\_swf.html)

### 3.3.1.1 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate1.fig)

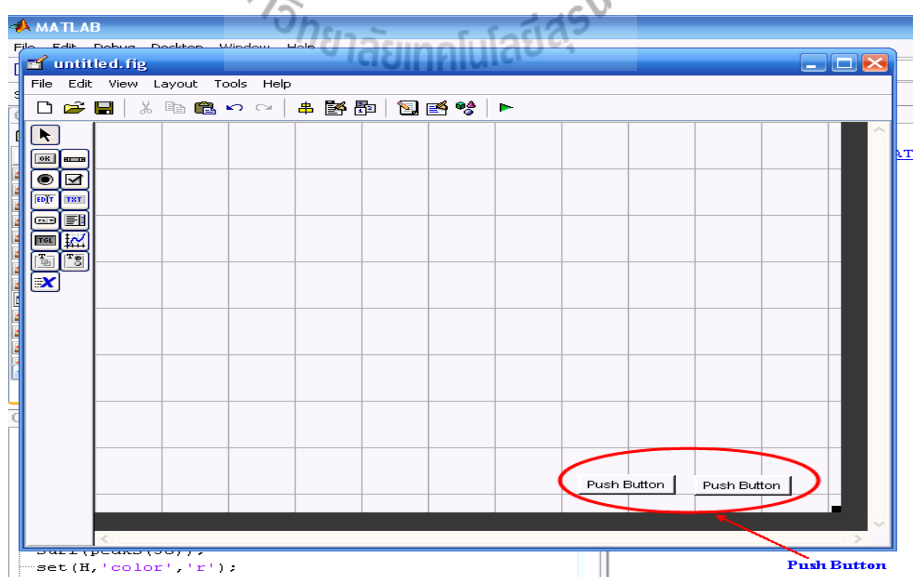


รูปที่ 3.22 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate1)

**วิธีทำ** เริ่มต้นด้วยการเรียกใช้ GUIDE แล้วดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

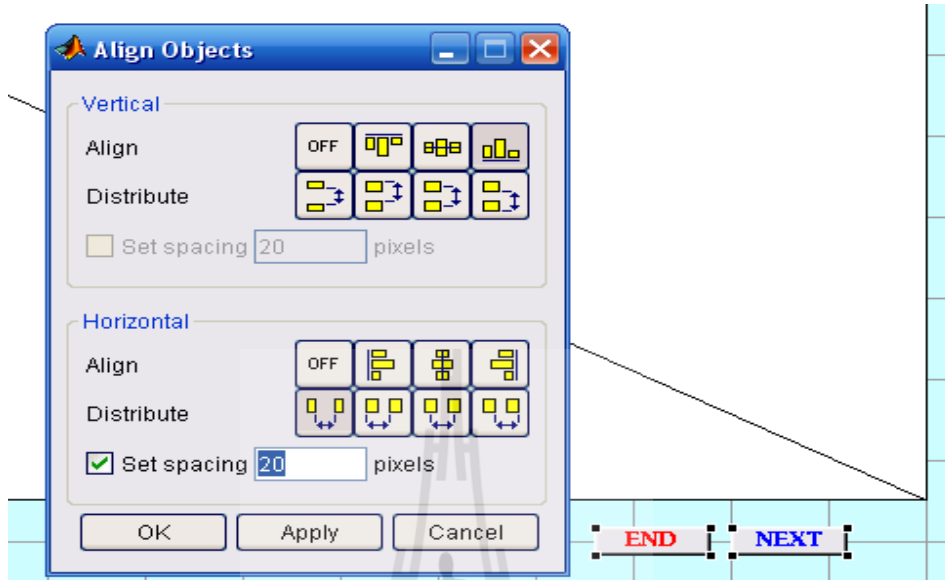
#### 1. วางรูปแบบของวัตถุที่ต้องการใน GUIDE Layout Editor

จากเครื่องมือในการสร้างรูปแบบวัตถุ (Uicontrol) ทำการเลือก Push Button มาวางลงใน GUIDE Layout Editor m ทั้ง 2 ปุ่ม



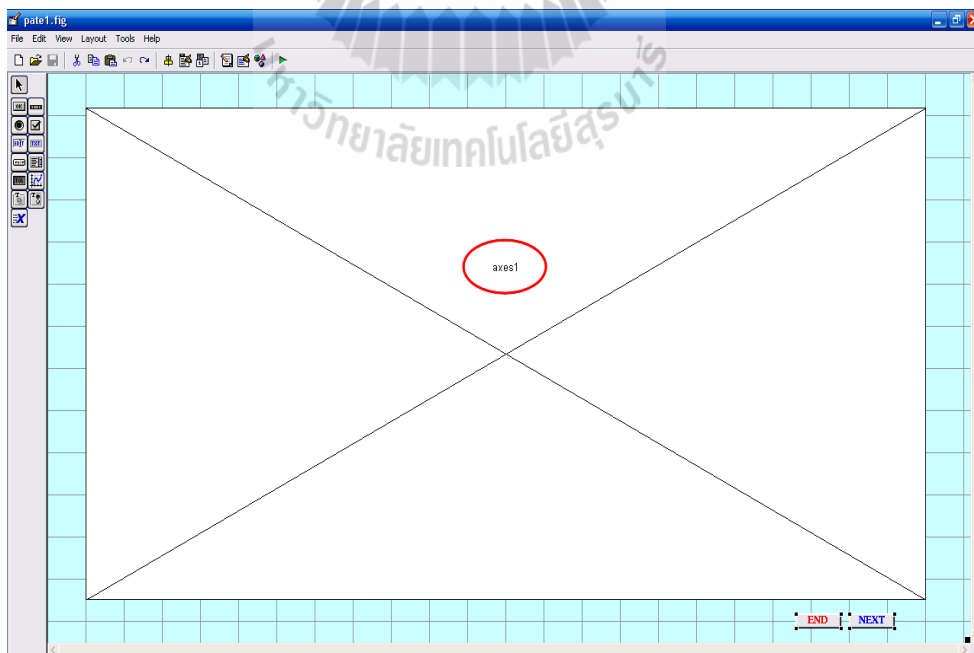
รูปที่ 3.23 การสร้างรูปแบบวัตถุ ของปุ่ม Push Button

จากเครื่องมือในการจัดแนววัตถุ (Align Objects) ทำการจัดแถวและหลักของ Push Button ทั้ง 2 ปุ่ม ให้อยู่ในแนวเดียวกัน



รูปที่ 3.24 การจัดแถวและหลักของ Push Button

สร้าง Axes1

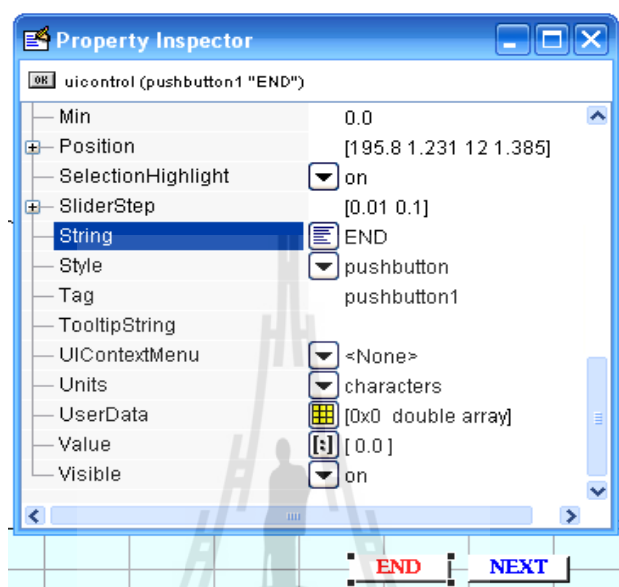


รูปที่ 3.25 การสร้างหน้าต่าง axes1



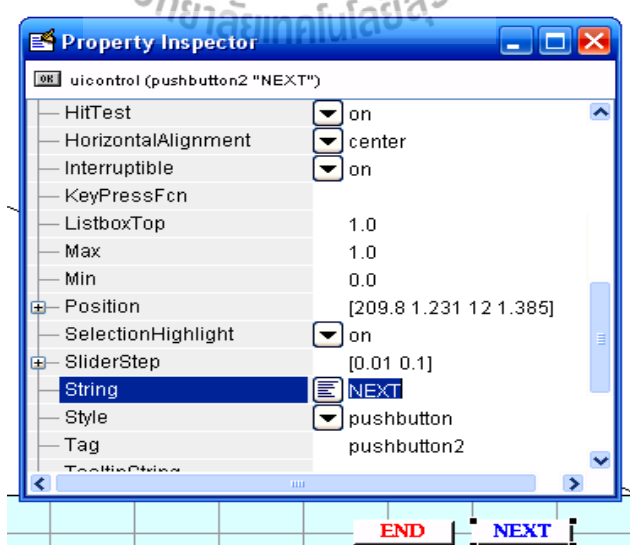
## 2. กำหนดรายละเอียดคุณสมบัติของวัตถุ

จากเครื่องมือในการตรวจเช็คและแก้ไขคุณสมบัติ (Property Inspector) ใช้เมาส์เลือก Push Button ปุ่มที่1 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) ของ Push Button ปุ่มที่1 เป็น END




รูปที่ 3.26 การใส่ข้อความลงใน Push Button ปุ่มที่1

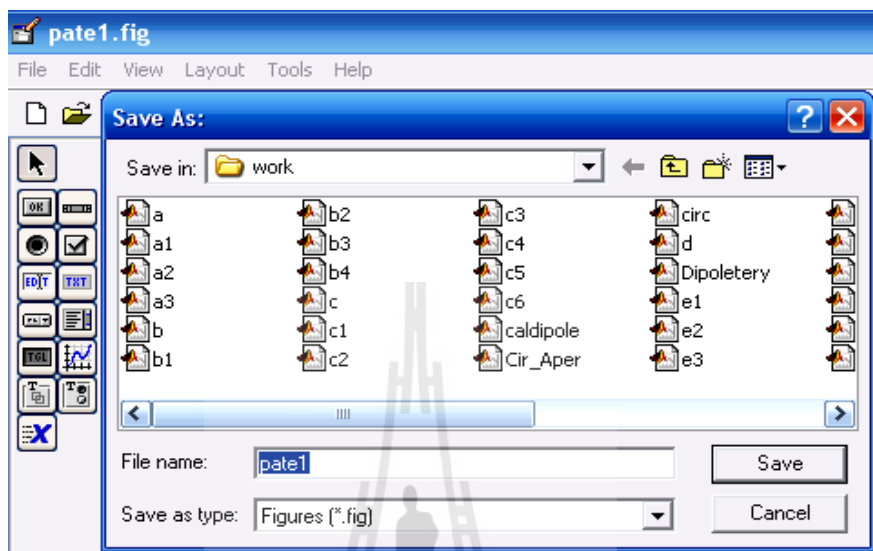
ใช้เมาส์เลือก Push Button ปุ่มที่2 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Push Button ปุ่มที่ 2 เป็น NEXT



รูปที่ 3.27 การใส่ข้อความลงใน Push Button ปุ่มที่ 2

### 3. บันทึกและ Run GUI ที่ได้กำหนดรายละเอียดต่าง ๆ แล้ว

ดำเนินการ Run GUI (ไอคอน ) ที่ออกแบบเสร็จแล้ว MATLAB จะให้ทำการบันทึก โดยเลือกบันทึกชื่อเป็น pate1.fig

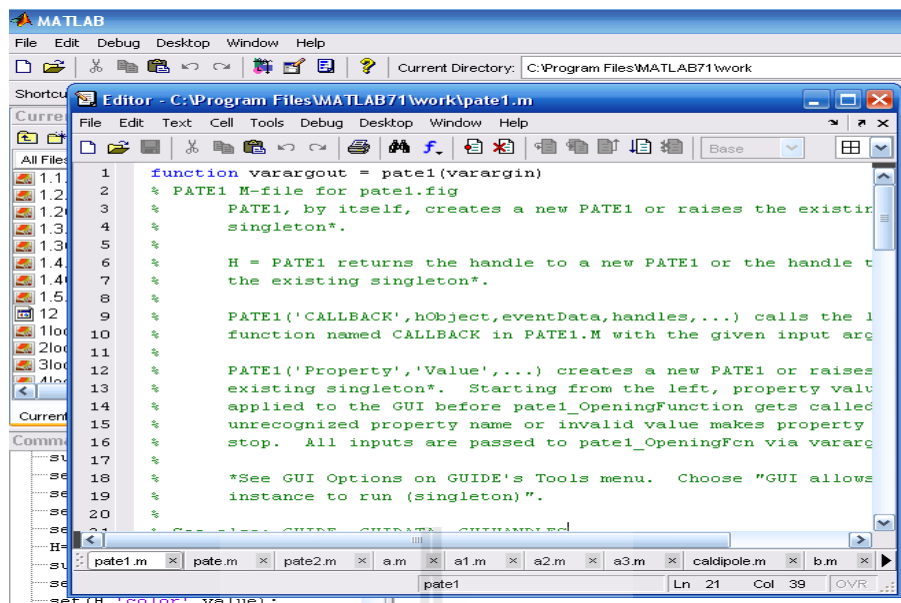


รูปที่ 3.28 การบันทึก GUI ที่ได้สร้างขึ้น โดยบันทึกในชื่อ pate1.fig

เมื่อสั่ง Run GUI จะปรากฏ pate1.fig ที่ได้ออกแบบขึ้น พร้อมทั้ง pate1.m ในรูปของ M-file function ให้โดยอัตโนมัติ




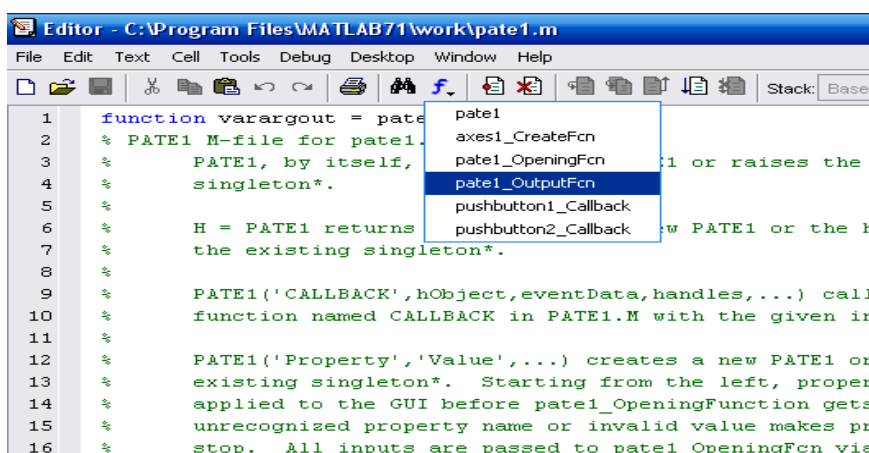
รูปที่ 3.29 ผลการสั่ง RUN GUI pate1.fig ที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 3.30 M-file function ของ GUI pate1

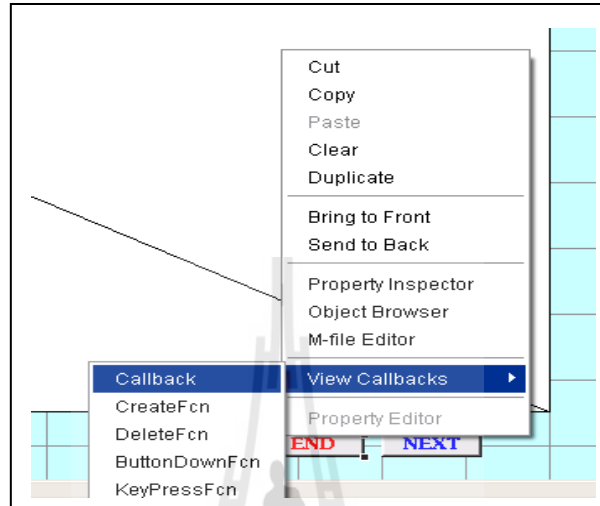
#### 4. เขียนชุดคำสั่งที่ต้องการให้แก่ GUI โดยผ่าน M-file function

ใช้เมาส์คลิกที่ไอคอน  ของหน้าต่าง M-file function ซึ่งเป็นทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อยในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง GUI ในครั้งนี้ แล้วดำเนินการเลือกฟังก์ชันย่อย pate1\_OpeningFcn เพื่อดำเนินการเขียนคำสั่งเกี่ยวกับการดึงหรือการสร้างข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ หรือการตั้งค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้แก่ GUI เช่นภาพตั้งต้นเมื่อยังไม่มีการควบคุมสั่งการจากผู้ใช้ เมื่อทำการคลิกเลือกฟังก์ชันย่อยใด MATLAB ก็จะกระโดดไปที่ฟังก์ชันย่อยนั้นทันที เพื่อรอผู้ออกแบบเขียนชุดคำสั่งที่ต้องการในฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 3.31 ทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อย pate1\_OpeningFcn

การเขียนชุดคำสั่งในฟังก์ชันย่อยต่างๆ อาจกระทำผ่านการคลิกเมาส์ขวามันวัตถุ นั้นๆ แล้วไปที่ View Callbacks → Callback แล้ว MATLAB จะกระโดดไปที่ฟังก์ชันย่อยของวัตถุ นั้นเพื่อรอผู้ออกแบบเขียนชุดคำสั่ง โดยถ้าเลือกวัตถุเป็นปุ่มกด END ดังแสดงด้วยรูป MATLAB ก็ จะกระโดดไปที่ฟังก์ชันย่อย pushbutton1\_Callback (ชื่อ Tag ของวัตถุนั้นตามด้วยคำว่า Callback)



รูปที่ 3.32 การเข้าสู่ฟังก์ชันย่อย pushbutton1\_Callback

เขียนคำสั่งที่ผู้ออกแบบต้องการภายในฟังก์ชันย่อย pushbutton1\_Callback ดังแสดงด้วยรูป

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close(pate1);

```

รูปที่ 3.33 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน pushbutton1\_Callback

กระทำการเช่นเดียวกับปุ่มกด END เมื่อพิจารณาปุ่มกด NEXT ดังแสดงด้วยรูป

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close(pate1);
pate

```

รูปที่ 3.34 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน pushbutton2\_Callback

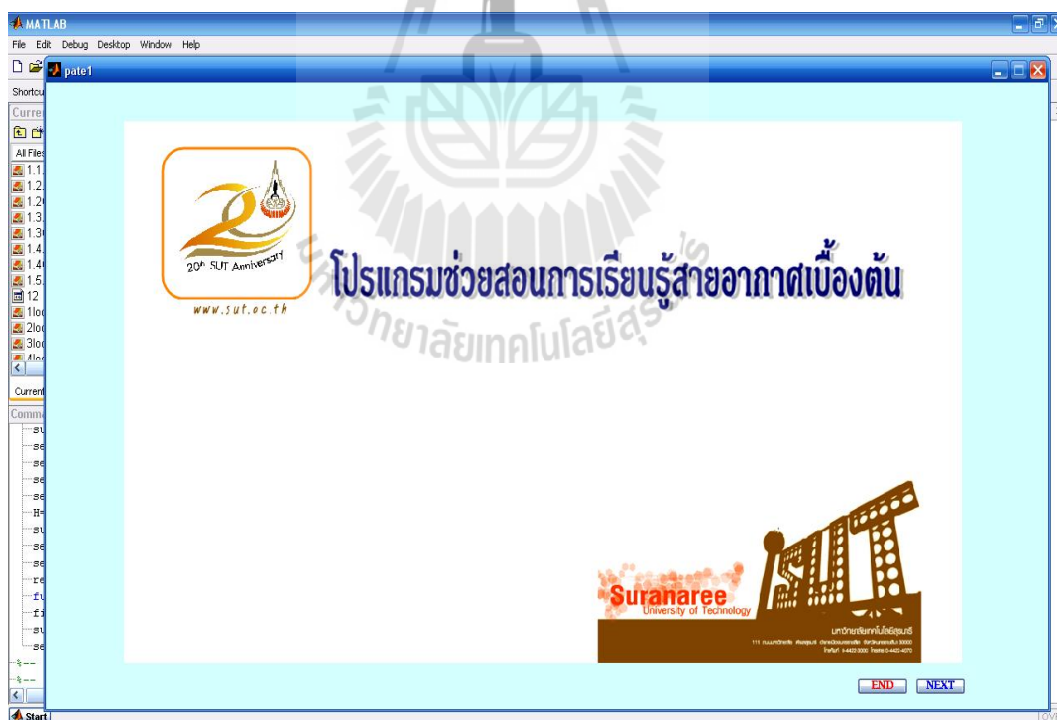
กระทำการเช่นเดียวกับ ปุ่มกด END เมื่อพิจารณาหน้าต่างของ axes1 ดังแสดงด้วยรูป

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
axes(hObject)
imshow('xa.bmp');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1
```

รูปที่ 3.35 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน axes1\_CreateFcn

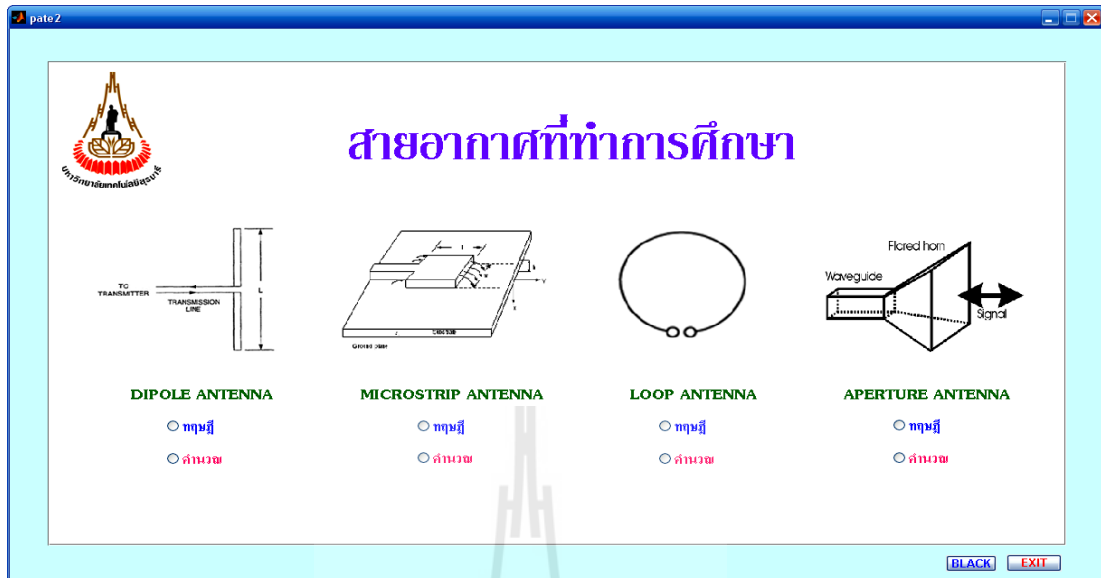
### 5. Run GUI เพื่อทดสอบความถูกต้องตามชุดคำสั่ง

Run GUI ที่ได้จากการออกแบบอีกครั้ง เพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดคำสั่ง พร้อมปรับปรุงข้อผิดพลาดและพัฒนารูปแบบของ GUI ให้มีความสวยงามและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยสามารถ Run ผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window) ได้ด้วยการพิมพ์ชื่อที่ใช้ในการบันทึก GUI



รูปที่ 3.36 ผลการ Run GUI ที่ได้จากการออกแบบผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window)

### 3.3.1.2 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate2.fig) ชนิดของสารอากาศที่ทำการศึกษา

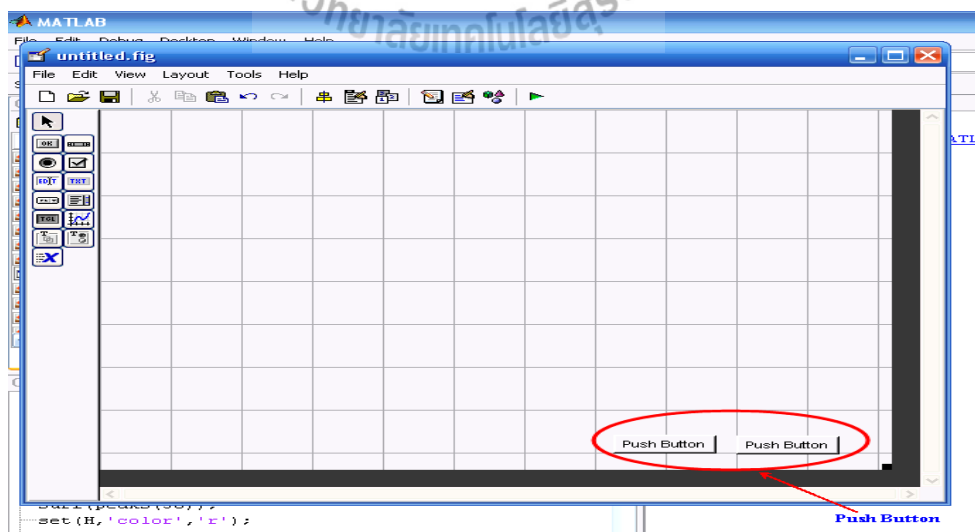


รูปที่ 3.37 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (Pate2)

**วิธีทำ** เริ่มต้นด้วยการเรียกใช้ GUIDE แล้วดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

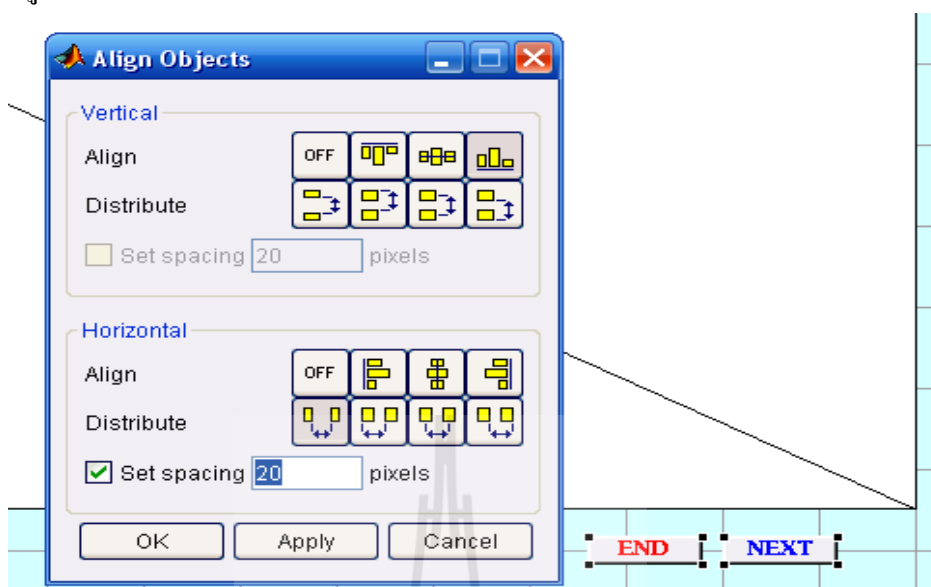
#### 1. วางรูปแบบของวัตถุที่ต้องการใน GUIDE Layout Editor

จากเครื่องมือในการสร้างรูปแบบวัตถุ (Uicontrol) ทำการเลือก Push Button มาวางลงใน GUIDE Layout Editor m ทั้ง 2 ปุ่ม



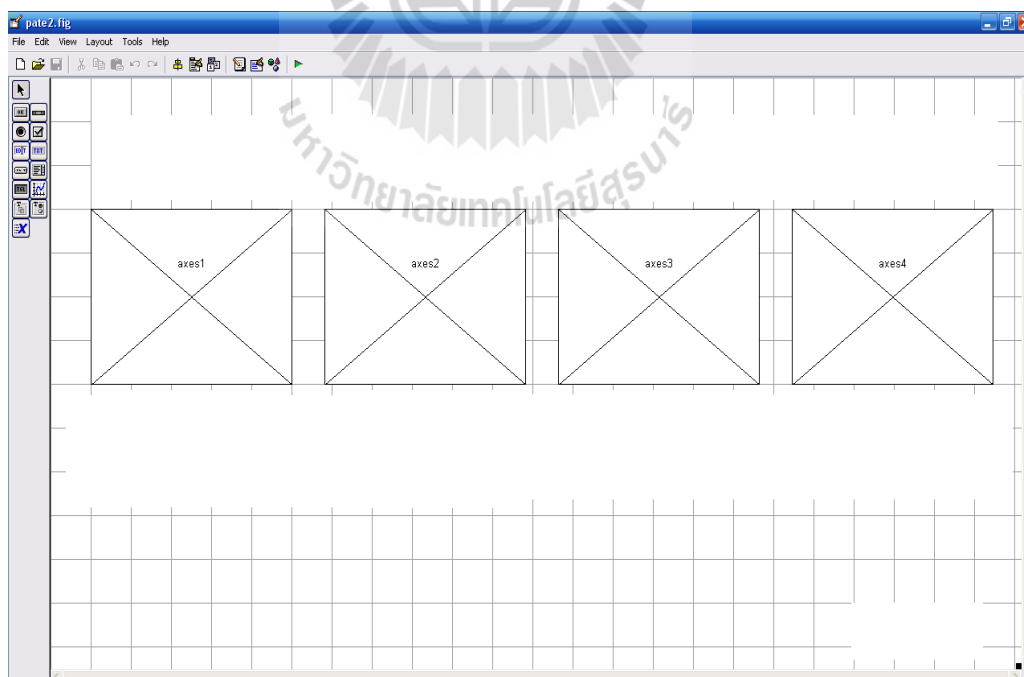
รูปที่ 3.38 การสร้างรูปแบบวัตถุ ของปุ่ม Push Button

จากเครื่องมือในการจัดแนววัตถุ (Align Objects) ทำการจัดแถวและหลักของ Push Button ทั้ง 2 ปุ่ม ให้อยู่ในแนวเดียวกัน



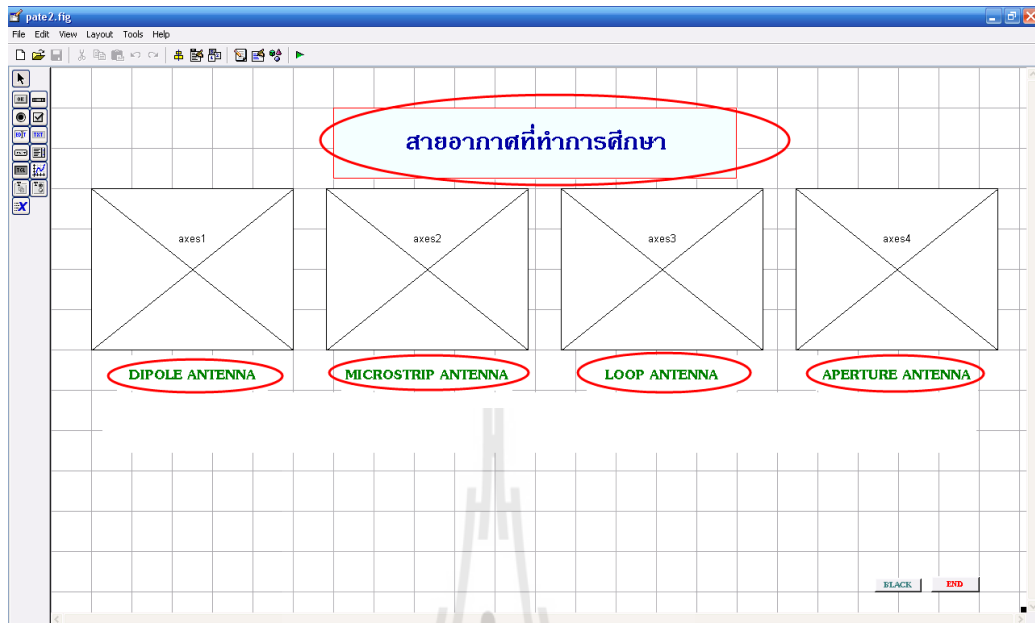
รูปที่ 3.39 การจัดแถวและหลักของ Push Button

สร้างหน้าต่าง Axes จำนวน 4 หน้าต่างเพื่อแสดงชนิดของสายอากาศ



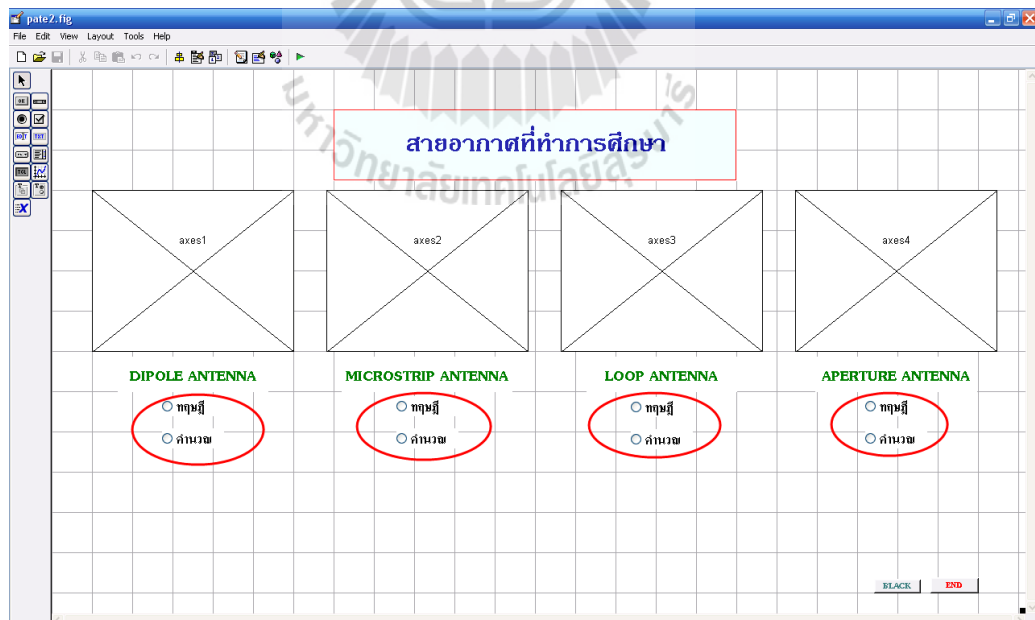
รูปที่ 3.40 การสร้างหน้าต่าง axes

## สร้าง Static Text



รูปที่ 3.41 การสร้างหน้าต่าง Static Text

## สร้าง Radio Button

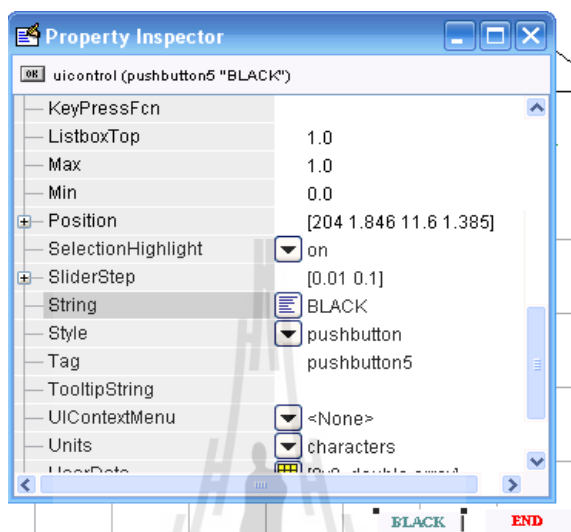


รูปที่ 3.42 การสร้างหน้าต่าง Radio Button



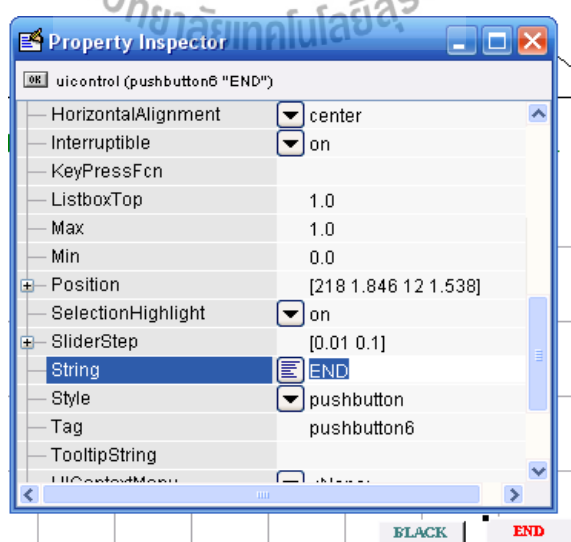
## 2. กำหนดรายละเอียดคุณสมบัติของวัตถุ

จากเครื่องมือในการตรวจเช็คและแก้ไขคุณสมบัติ (Property Inspector) ใช้เมาส์เลือก Push Button ปุ่มที่1 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) ของ Push Button ปุ่มที่1 เป็น BLACK



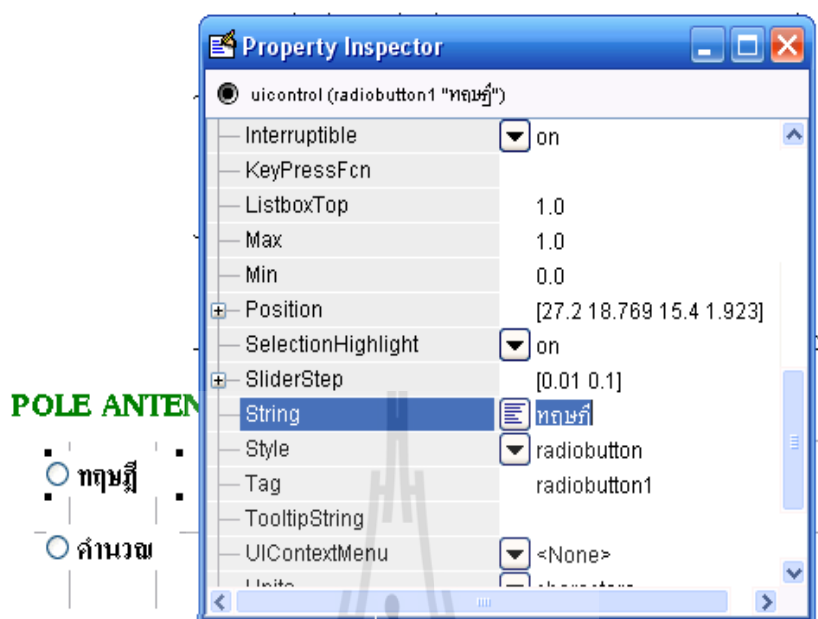
รูปที่ 3.43 การใส่ข้อความลงใน Push Button ปุ่มที่1

ใช้เมาส์เลือก Push Button ปุ่มที่2 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Push Button ปุ่มที่ 2 เป็น END



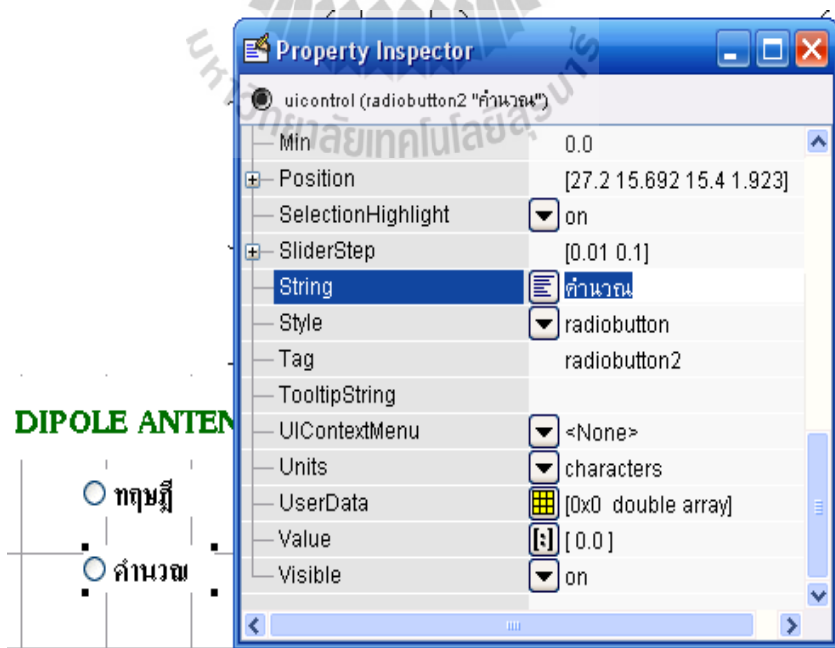
รูปที่ 3.44 การใส่ข้อความลงใน Push Button ปุ่มที่ 2

ใช้เมาส์เลือก Radio button ปุ่มที่ 1 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Radio button1 ปุ่มที่ 1 เป็น ทฤษฎี



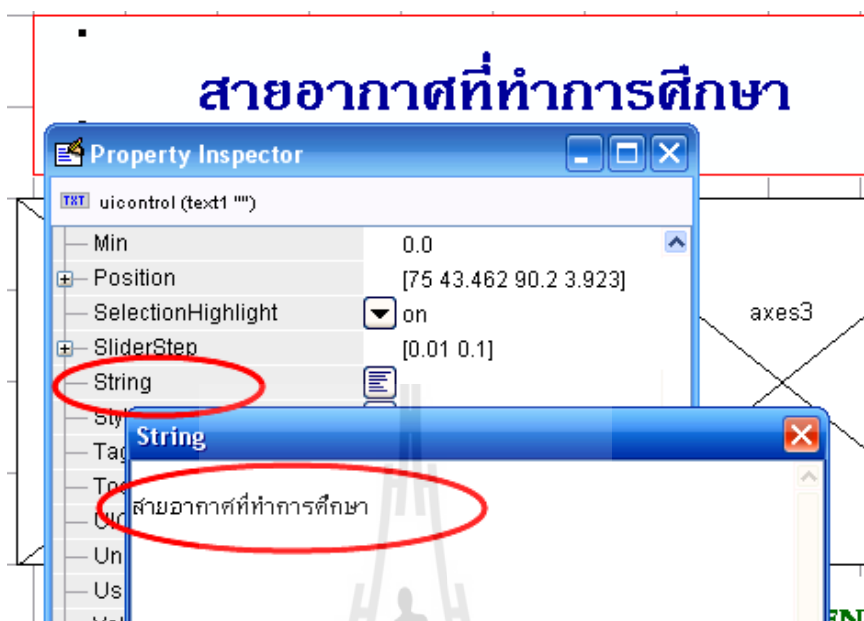
รูปที่ 3.45 การใส่ข้อความลงใน Radio button ปุ่มที่ 1

ใช้เมาส์เลือก Radio button ปุ่มที่ 2 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Radio button1 ปุ่มที่ 1 เป็น คำนวณ



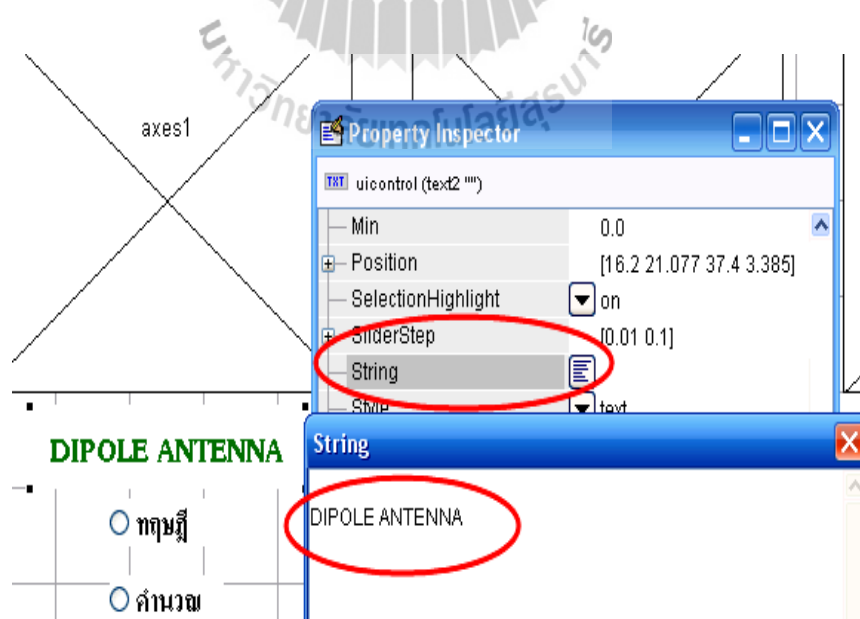
รูปที่ 3.46 การใส่ข้อความลงใน Radio button ปุ่มที่ 2

ใช้เมาส์เลือก Static Text ช่องที่ 1 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Static Text ช่องที่ 1 เป็น สายอากาศที่ทำการศึกษา



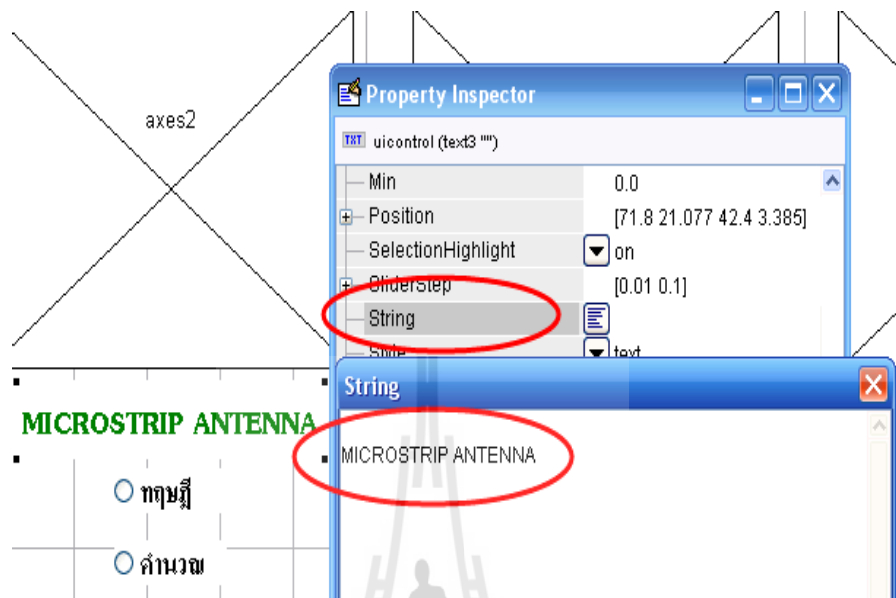
รูปที่ 3.47 การใส่ข้อความลงใน Static Text ช่องที่ 1

ใช้เมาส์เลือก Static Text ช่องที่ 2 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Static Text ช่องที่ 2 เป็น DIPOLE ANTENNA



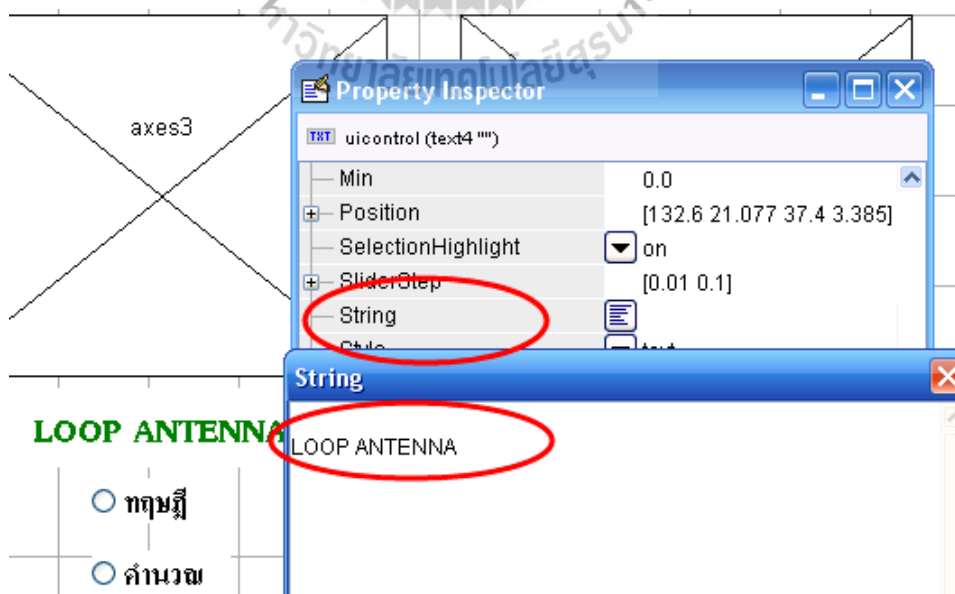
รูปที่ 3.48 การใส่ข้อความลงใน Static Text ช่องที่ 2

ใช้เมาส์เลือก Static Text ช่องที่ 3 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Static Text ช่องที่ 3 เป็น MICROSTRIP ANTENNA



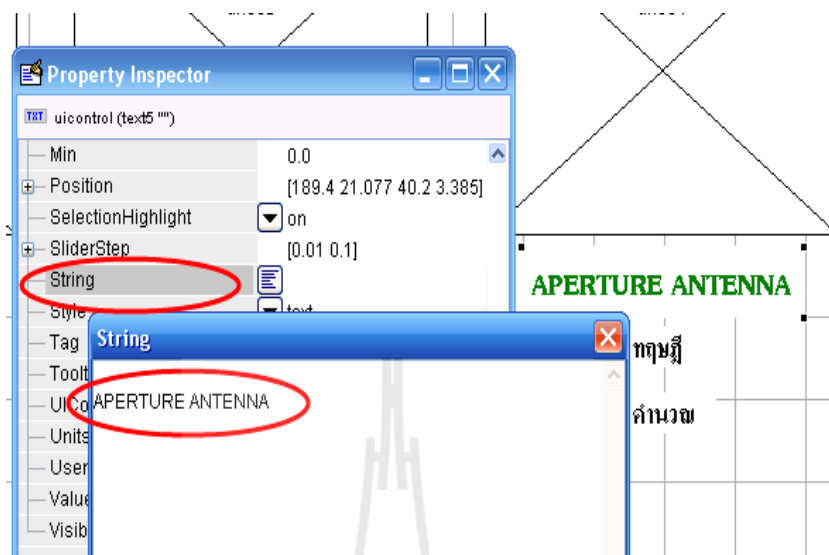
รูปที่ 3.49 การใส่ข้อความลงใน Static Text ช่องที่ 3

ใช้เมาส์เลือก Static Text ช่องที่ 4 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Static Text ช่องที่ 4 เป็น LOOP ANTENNA



รูปที่ 3.50 การใส่ข้อความลงใน Static Text ช่องที่ 4

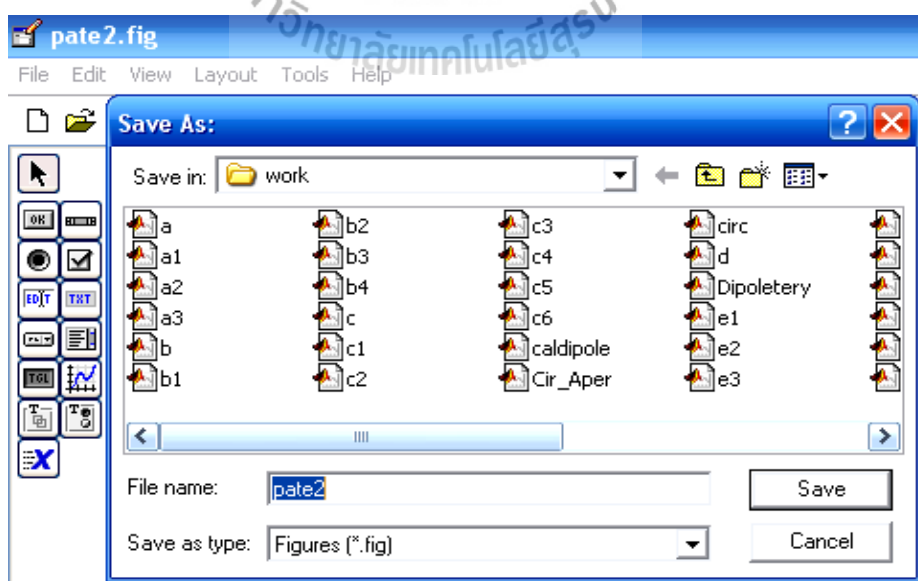
ใช้เมาส์เลือก Static Text ช่องที่ 5 แล้วใช้ Property Inspector เปลี่ยน String ของ Static Text ช่องที่ 5 เป็น LOOP ANTENNA



รูปที่ 3.51 การใส่ข้อความลงใน Static Text ช่องที่ 5

### 3. บันทึกและ Run GUI ที่ได้ออกแบบขึ้น

ดำเนินการ Run GUI (ไอคอน ) ที่ออกแบบเสร็จแล้ว MATLAB จะให้ทำการบันทึก โดยเลือกบันทึกชื่อเป็น pate2.fig

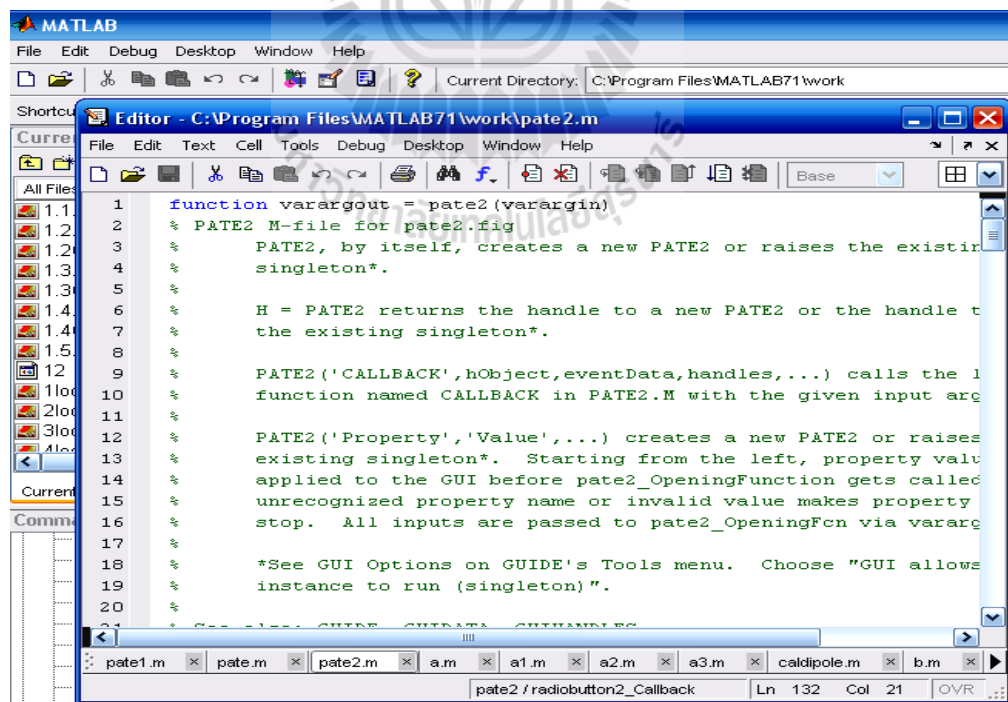


รูปที่ 3.52 การบันทึก GUI ที่ได้สร้างขึ้นโดยบันทึกในชื่อ pate2.fig

เมื่อสั่ง Run GUI จะปรากฏ pate2.fig ที่ได้ออกแบบขึ้น พร้อมทั้ง pate2.m ในรูปของ M-file function ให้โดยอัตโนมัติ




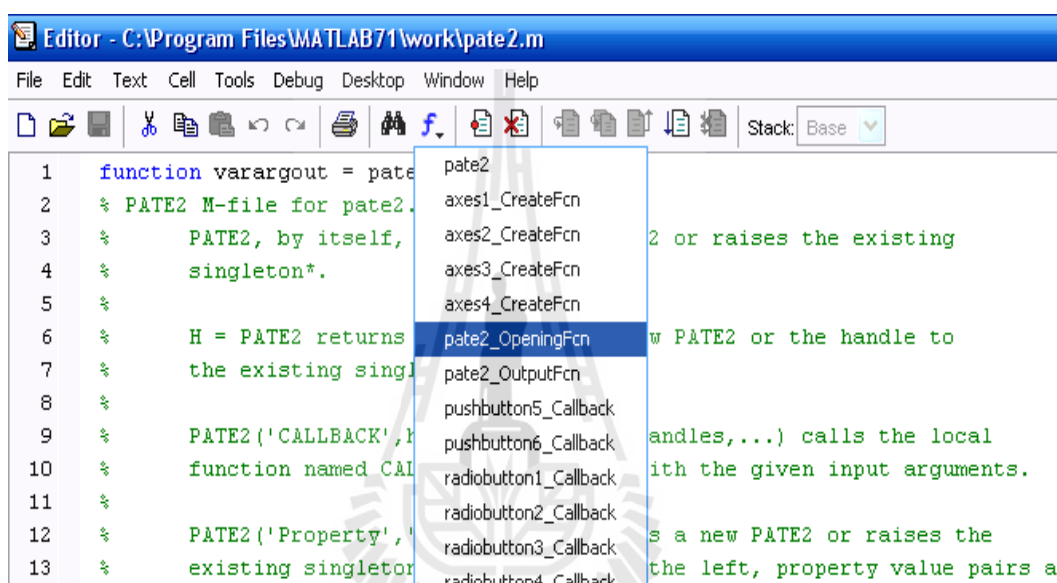
รูปที่ 3.53 ผลการสั่ง RUN GUI pate2.fig ที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 3.54 M-file function ของ GUI pate2

#### 4. เขียนชุดคำสั่งที่ต้องการให้แก่ GUI โดยผ่าน M-file function

ใช้เมาส์คลิกที่ไอคอน  ของหน้าต่าง M-file function ซึ่งเป็นทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อยในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง GUI ในครั้งนี้ แล้วดำเนินการเลือกฟังก์ชันย่อย pate2\_OpeningFcn เพื่อดำเนินการเขียนคำสั่งเกี่ยวกับการดึงหรือการสร้างข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ หรือการตั้งค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้แก่ GUI เช่นภาพตั้งต้นเมื่อยังไม่มีการควบคุมสั่งการจากผู้ใช้ เมื่อทำการคลิกเลือกฟังก์ชันย่อยใด MATLAB ก็จะกระโดดไปที่ฟังก์ชันย่อยนั้นทันที เพื่อรอผู้ออกแบบเขียนชุดคำสั่งที่ต้องการในฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 3.55 ทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อย pate1\_OpeningFcn

เขียนคำสั่งที่ผู้ออกแบบต้องการภายในฟังก์ชันย่อย pushbutton1\_Callback (ปุ่มBLACK) ดังแสดงด้วยรูป

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
close(pate2);
pate

```

รูปที่ 3.56 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน pushbutton1\_Callback

กระทำการเช่นเดียวกับปุ่มกด BLACK เมื่อพิจารณาปุ่มกด END ดังแสดงด้วยรูป

```

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

close(pate2);

```

รูปที่ 3.57 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน pushbutton2\_Callback

กระทำการเช่นเดียวกับปุ่มกด BLACK เมื่อพิจารณาปุ่มกด ทฤษฎี (Radio button) และปุ่มกด จำนวน (Radio button) ตามลำดับดังต่อไปนี้

```

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    a;
% --- Executes on button press in radiobutton2.
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton2, 'Value')==1
    close(pate2);    caldipole;
% --- Executes on button press in radiobutton3.
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    b;
% --- Executes on button press in radiobutton4.
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    micros1;
% --- Executes on button press in radiobutton5.
function radiobutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    c;
% --- Executes on button press in radiobutton6.
function radiobutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    Loop_antenna;
% --- Executes on button press in radiobutton7.
function radiobutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    d;
% --- Executes on button press in radiobutton8.
function radiobutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
get(handles.radiobutton1, 'Value')==1
    close(pate2);    Rec_Aper;

```

รูปที่ 3.58 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน Radio button



กระทำการเช่นเดียวกับ ปุ่มกด END เมื่อพิจารณาหน้าต่างของ axes ตามลำดับดังแสดงด้วยรูปต่อไปนี้

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
axes(hObject)
imshow('Dip.bmp');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
axes(hObject)
imshow('mic.bmp');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
axes(hObject)
imshow('loop1.bmp');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes3

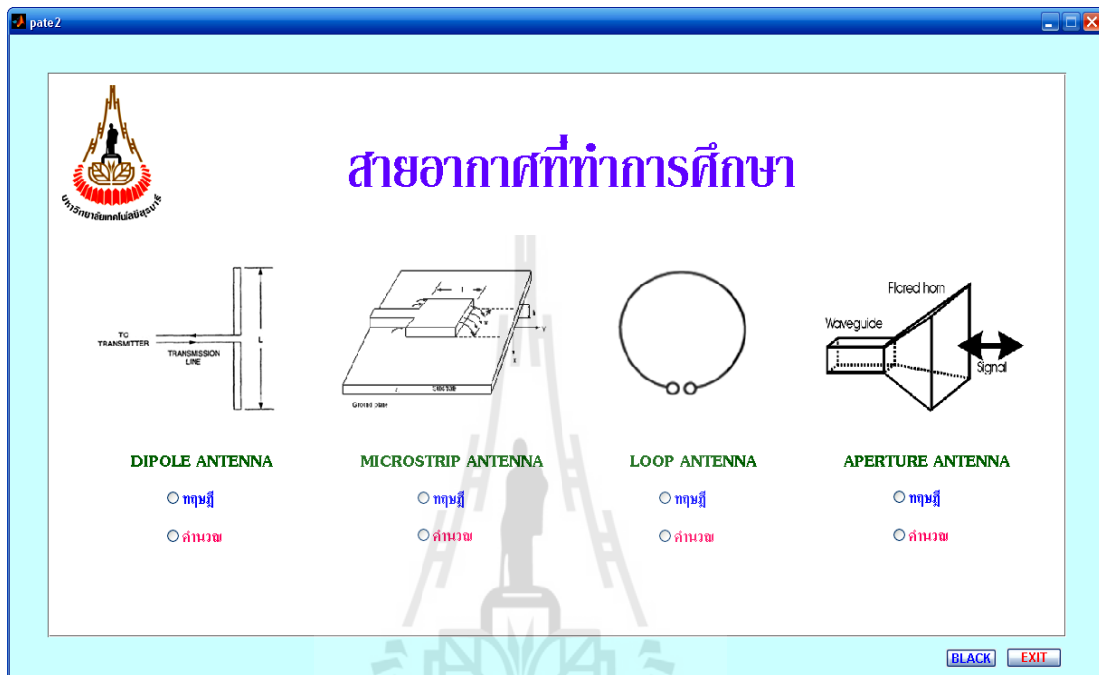
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
axes(hObject)
imshow('aper.bmp');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes4

```

รูปที่ 3.59 การเขียนฟังก์ชันย่อยภายใน axes\_CreateFcn

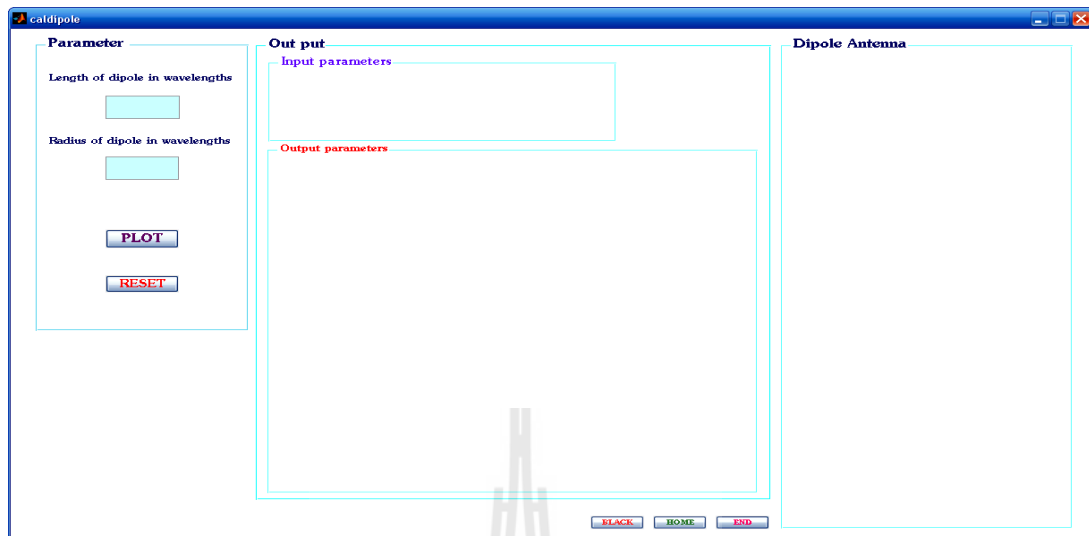
## 5. Run GUI เพื่อทดสอบความถูกต้องตามชุดคำสั่ง

Run GUI ที่ได้จากการออกแบบอีกครั้ง เพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดคำสั่ง พร้อมปรับปรุงข้อผิดพลาดและพัฒนารูปแบบของ GUI ให้มีความสวยงามและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยสามารถ Run ผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window) ได้ ด้วยการพิมพ์ชื่อที่ใช้ในการบันทึก GUI



รูปที่ 3.60 ผลการ Run GUI ที่ได้จากการออกแบบผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window)

### 3.3.1.3 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (caldipole.fig) การคำนวณค่าพารามิเตอร์สายอากาศไดโพล

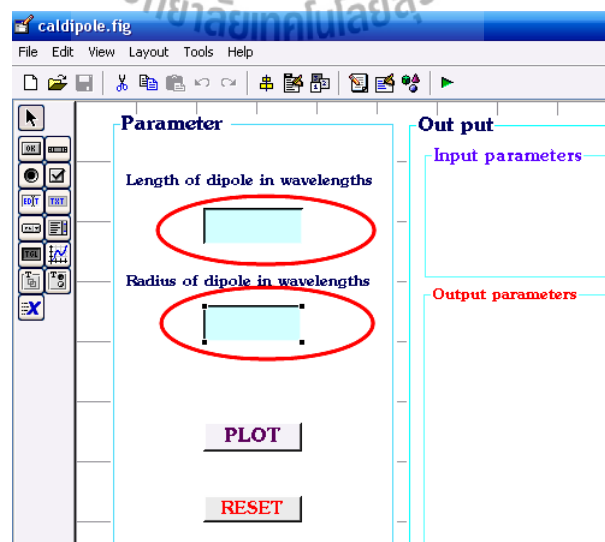


รูปที่ 3.61 การออกแบบหน้าต่าง GUIDE (caldipole.fig)

**วิธีทำ** การออกแบบในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัตถุที่ยังไม่เคยแสดงการออกแบบในส่วนที่ได้ ออกแบบก่อนหน้าแล้วเท่านั้น โดยเริ่มต้นด้วยการเรียกใช้ GUIDE แล้วดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

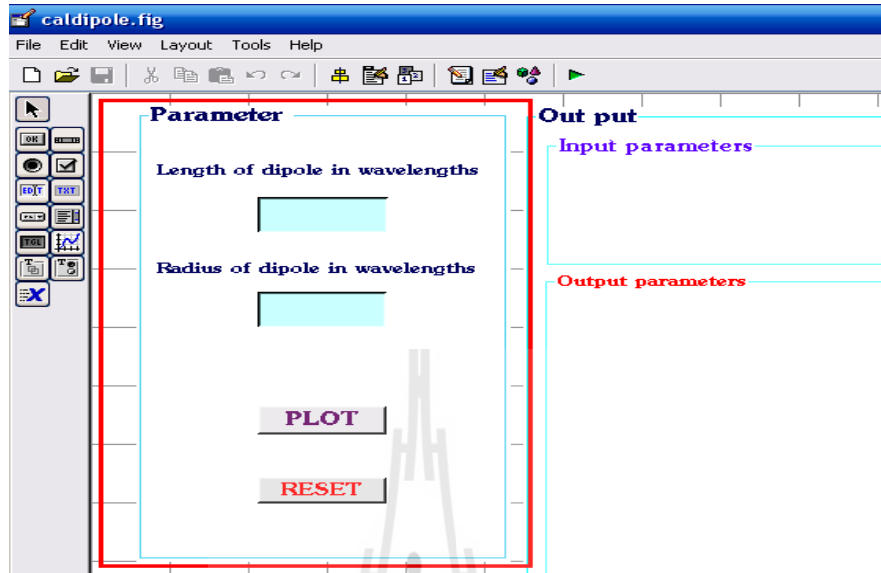
#### 1. วางรูปแบบของวัตถุที่ต้องการใน GUIDE Layout Editor

จากเครื่องมือในการสร้างรูปแบบวัตถุ (Uicontrol) ทำการเลือก Edit Text มาวางลงใน GUIDE Layout Editor ม ทั้ง 2 ปุ่มดังรูป



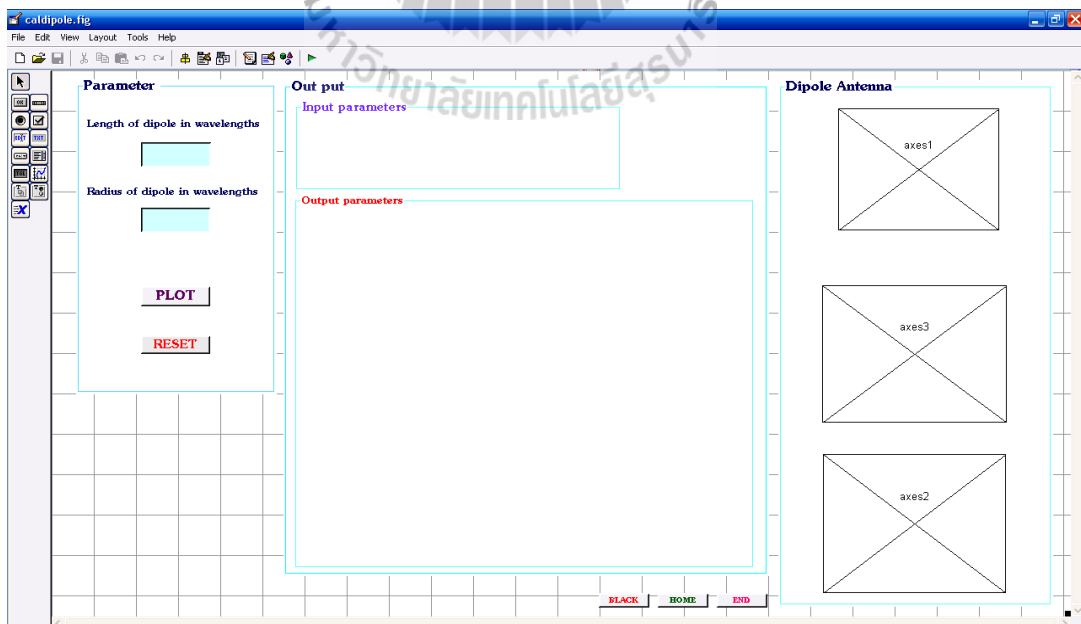
รูปที่ 3.62 การสร้างรูปแบบวัตถุ ของปุ่ม Edit Text

สร้าง Panel แล้วย้าย Push Button , Edit Text และ Static Text ไปบรรจุไว้ใน Panel เพื่อให้อยู่ในกรอบเดียวกันดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.63 การสร้างหน้าต่างการสร้าง Panel

ในส่วนแสดงผลของ Output Parameter และส่วนของกราฟนั้น ก็ทำการสร้างส่วนประกอบต่างๆในลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวมาซึ่งเมื่อสร้างเสร็จแล้วจะได้ดังแสดงในรูป



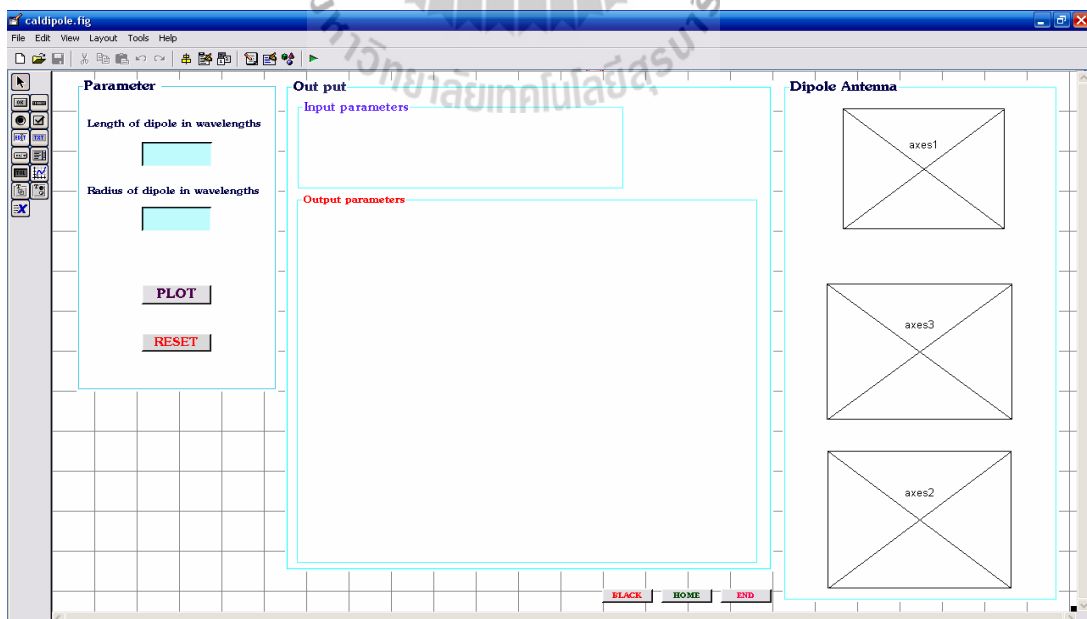
รูปที่ 3.64 การออกแบบหน้าต่างสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล

## 2. กำหนดรายละเอียดคุณสมบัติของวัตถุ

ในการกำหนดคุณสมบัติของวัตถุในหน้าต่างที่ได้ออกแบบนี้ ผู้ออกแบบจะกล่าวในภาพรวมโดยจะมีลักษณะคล้ายกับการกำหนดคุณสมบัติของวัตถุในหน้าต่างก่อนๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในการออกแบบหน้าต่าง pate1 และ pate2 ดังนี้

- Push Button ปุ่มที่ 1 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น PLOT
- Push Button ปุ่มที่ 2 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น BLACK
- Push Button ปุ่มที่ 3 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น HOME
- Push Button ปุ่มที่ 4 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น END
- Push Button ปุ่มที่ 5 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น RESET
- Static Text 1 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น Length of dipole in wavelengths
- Static Text 2 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น Radius of dipole in wavelengths
- Edit Text 1 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น (เว้นว่าง)
- Edit Text 2 เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น (เว้นว่าง)
- Panel เปลี่ยนชื่อสายอักขระที่จะแสดง (String) เป็น Parameter ,Out put และ Dipole antenna ตามลำดับ

เมื่อกำหนดทุกอย่างครบถ้วนแล้วจะได้หน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 3.65

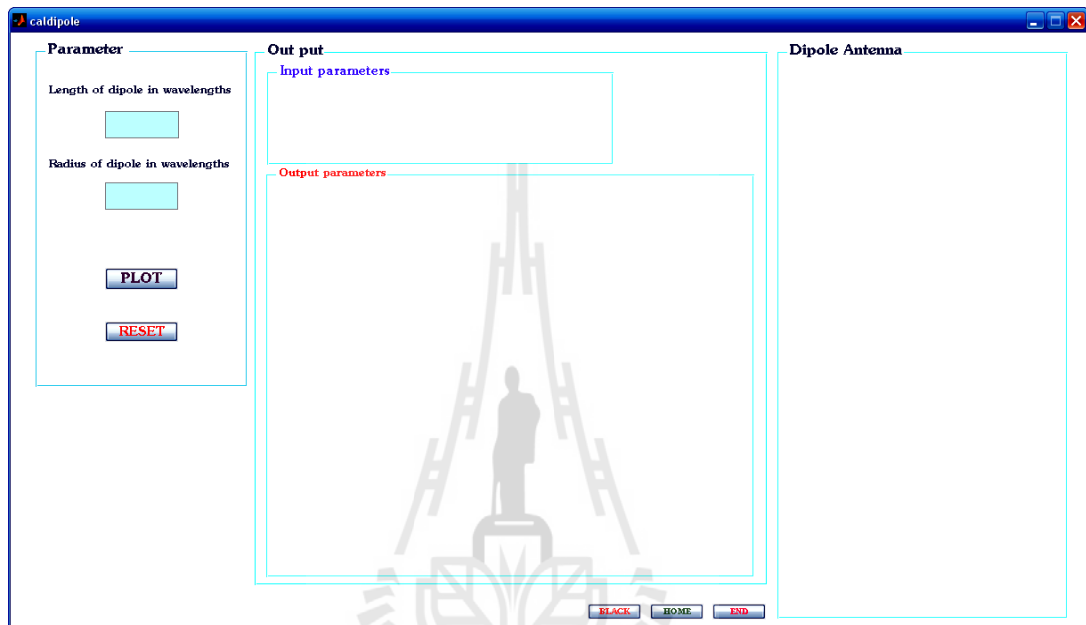


รูปที่ 3.65 การกำหนดคุณสมบัติสำหรับหน้าต่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์สายอากาศไดโพล

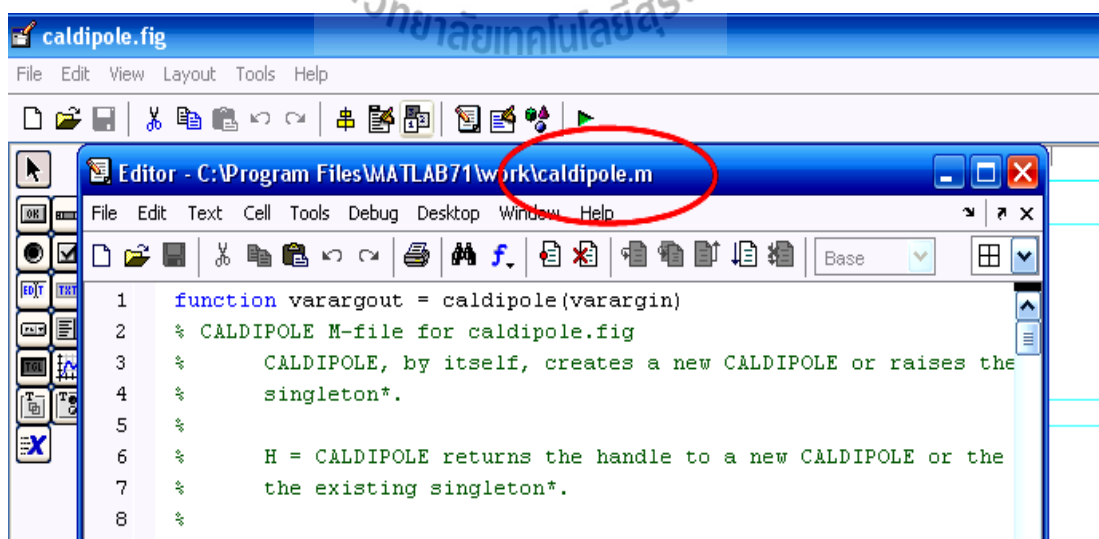
### 3. บันทึกและ Run GUI ที่ได้ออกแบบขึ้น

ดำเนินการ Run GUI (ไอคอน ) ที่ออกแบบเสร็จแล้ว MATLAB จะให้ทำการบันทึก โดยเลือกบันทึกชื่อเป็น caldipole.fig

เมื่อสั่ง Run GUI จะปรากฏ caldipole.fig ที่ได้ออกแบบขึ้น พร้อมทั้ง caldipole.m ในรูปของ M-file function ให้โดยอัตโนมัติ




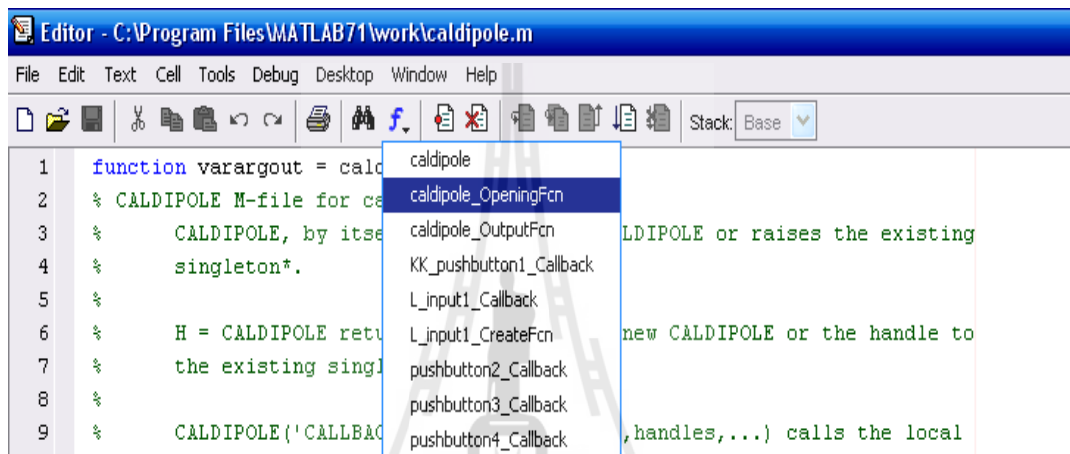
รูปที่ 3.66 ผลการตั้ง RUN GUI caldipole.fig ที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 3.67 M-file function ของ GUI caldipole.m

#### 4. เขียนชุดคำสั่งที่ต้องการให้แก่ GUI โดยผ่าน M-file function

ใช้เมาส์คลิกที่ไอคอน  ของหน้าต่าง M-file function ซึ่งเป็นทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อยในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง GUI ในครั้งนี้ แล้วดำเนินการเลือกฟังก์ชันย่อย `caldipole_OpeningFcn` เพื่อดำเนินการเขียนคำสั่งเกี่ยวกับ การดึงหรือการสร้างข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ หรือการตั้งค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้แก่ GUI เช่นภาพตั้งต้นเมื่อยังไม่มี การควบคุมสั่งการจากผู้ใช้ เมื่อทำการคลิกเลือกฟังก์ชันย่อยใด MATLAB ก็จะกระโดดไปที่ฟังก์ชันย่อยนั้นทันที เพื่อรอผู้ออกแบบเขียนชุดคำสั่งที่ต้องการในฟังก์ชันนั้น



รูปที่ 3.68 ทางลัดเข้าสู่ฟังก์ชันย่อย `caldipole_OpeningFcn`

สำหรับการเขียนคำสั่งในส่วนนี้ผู้ออกแบบจะกล่าวรวมเป็นชุดเดียวกันดังนี้

คำสั่งภายในฟังก์ชันย่อย `KK_pushbutton1_Callback` (ปุ่ม PLOT) จะมีคำสั่งดังนี้

```
function KK_pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to KK_pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
L=str2double(get(handles.L_input1,'String'));
r=str2double(get(handles.R_input2,'String'));
%***Insert input data error loop***
PI = 4.0*atan(1.0);
E = 120.0*PI;
THETA = PI/180.0;
```

```

    UMAX = 0.0;
    PRAD = 0.0;
    TOL = 1.0E-6;
    A = L*PI;
    I = 1;
while(I <= 180)
    XI = I*PI/180.0;
    if(XI ~= PI)
        U = ((cos(A*cos(XI))-cos(A))/sin(XI))^2*(E/(8.0*PI^2));
        if(U > UMAX)
            UMAX = U;
        end
    end
    UA = U*sin(XI)*THETA*2.0*PI;
    PRAD = PRAD+UA;
    I = I+1;
end

D = (4.0*PI*UMAX)/PRAD;
DDB = 10.0*log10(D);
RR = 2.0*PRAD;
    if(A ~= PI)
        RIN = RR/(sin(A))^2;
    end
    fid = fopen('ElevPat.dat','w');
    fprintf(fid,'\tDipole\n\n\tTheta\t\tE (dB)\n');
    fprintf(fid,'\t----\t\t-----');

T = zeros(180,1);
ET = zeros(180,1);
EdB = zeros(180,1);

```



```

x = 1;
while(x<=180)
    T(x) = x-0.99;
    ET(x) = (cos(PI*L*cos(T(x)*THETA))-cos(PI*L))/sin(T(x)*THETA);
    x = x+1;
end
ET = abs(ET);
ETmax = max(abs(ET));
EdB = 20*log10(abs(ET)/ETmax);

x = 1;
while(x<=180)
    fprintf(fid, '\n %5.4f %12.4f', T(x), EdB(x));
    x = x+1;
end
fclose(fid);

n=120*pi;
k=2*pi;
if exist('cosint')~=2,
    disp(' ');
    disp('Symbolic toolbox is not installed. Switching to numerical computation of
        sine and cosine integrals.');
```

$$X_m = 30 * (2 * \text{si}(k * L) + \cos(k * L) * (2 * \text{si}(k * L) - \text{si}(2 * k * L)) - \dots$$

$$\sin(k * L) * (2 * \text{ci}(k * L) - \text{ci}(2 * k * L) - \text{ci}(2 * k * r^2 / L)));$$

$$X_{in} = X_m / (\sin(k * L / 2))^2;$$

```

elseif exist('cosint')==2,
    X_m = 30 * (2 * \text{sinint}(k * L) + \cos(k * L) * (2 * \text{sinint}(k * L) - \text{sinint}(2 * k * L)) - \dots
        \sin(k * L) * (2 * \text{cosint}(k * L) - \text{cosint}(2 * k * L) - \text{cosint}(2 * k * r^2 / L)));
    X_{in} = X_m / (\sin(k * L / 2))^2;
end;
```

% Figure 1

```

z=linspace(-L/2,L/2,500);
k=2*pi;
I=sin(k*(L/2-abs(z)));
axes(handles.axes1)
plot(z,abs(I))
set(handles.axes1,'XMinorTick','on')
xlabel('z^{\prime}/\lambda','fontsize',10)
ylabel('Normalized current distribution','fontsize',10)

```

% Figure 2

```

T=T';
EdB=EdB';
EdB=[EdB flipr(EdB)];
T=[T T+180];
axes(handles.axes2)
polar_dB(T,EdB,-60,0,4)
set(handles.axes2,'XMinorTick','on')
title('Elevation plane normalized amplitude pattern (dB)','fontsize',10)

```

% Figure 3

```

theta=linspace(0,2*pi,300);
Eth=(cos(k*L/2*cos(theta))-cos(k*L/2))./sin(theta);
Dth=4*pi*120*pi/(8*pi^2)*Eth.^2/PRAD;
Dth_db=10*log10(Dth);
Dth_db(Dth_db<=-60)=-60;
axes(handles.axes3)
polar_dB(theta*180/pi,Dth_db,-60,max(Dth_db),4)
set(handles.axes3,'XMinorTick','on')
title('Elevation plane directivity pattern (dB)','fontsize',10)

```

```

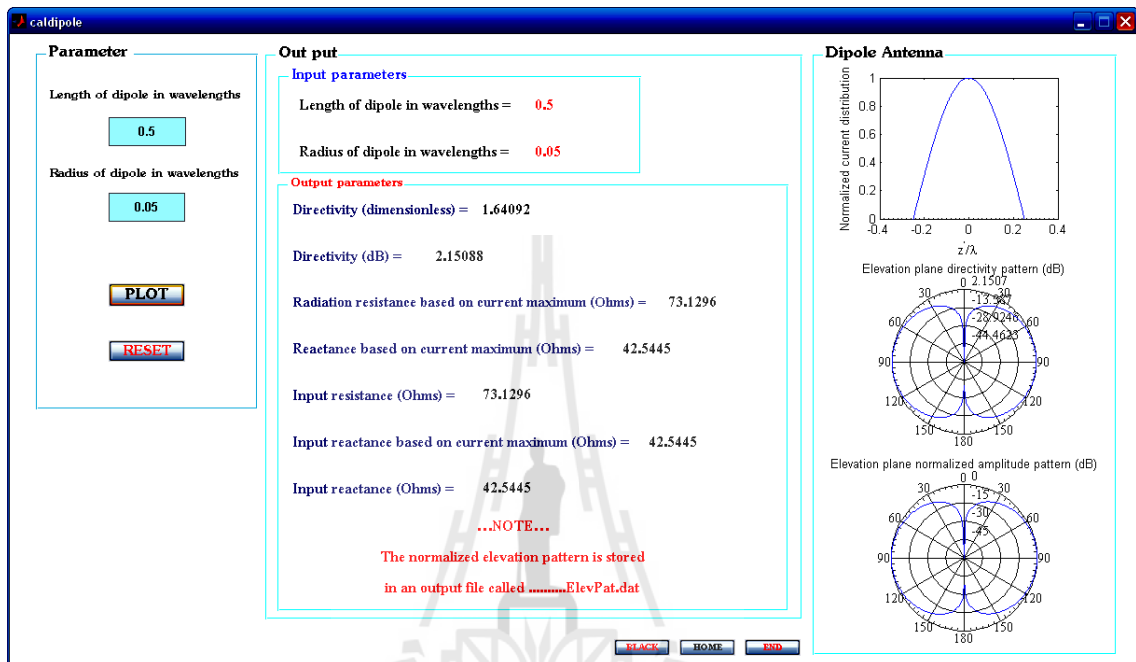
set(handles.text5,'String',L)
set(handles.text7,'String',r)
set(handles.text4,'String','Length of dipole in wavelengths =')
set(handles.text6,'String','Radius of dipole in wavelengths =')
set(handles.text9,'String',D)
set(handles.text11,'String',DDB)
set(handles.text8,'String','Directivity (dimensionless) =')
set(handles.text10,'String','Directivity (dB) =')
set(handles.text13,'String',RR)
set(handles.text15,'String',Xm)
set(handles.text12,'String','Radiation resistance based on current maximum
(Ohms) =')
set(handles.text14,'String','Reactance based on current maximum (Ohms) =')
set(handles.text16,'String','Input resistance (Ohms) =')
set(handles.text20,'String','Input reactance (Ohms) =')
set(handles.text22,'String','...NOTE...')
set(handles.text23,'String','The normalized elevation pattern is stored')
set(handles.text24,'String','in an output file called .....ElevPat.dat')

if(abs(sin(A)) < TOL)
    set(handles.text17,'String','INFINITY')
    set(handles.text21,'String','INFINITY')
else
    set(handles.text17,'String',RIN)
    set(handles.text21,'String',Xin)
    set(handles.text18,'String','Input reactance based on current maximum (Ohms) =')
    set(handles.text19,'String',Xm)
end

```

## 5. Run GUI เพื่อทดสอบความถูกต้องตามชุดคำสั่ง

Run GUI ที่ได้จากการออกแบบอีกครั้ง เพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดคำสั่ง พร้อมปรับปรุงข้อผิดพลาดและพัฒนารูปแบบของ GUI ให้มีความสวยงามและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยสามารถ Run ผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window) ได้ ด้วยการพิมพ์ชื่อที่ใช้ในการบันทึก GUI



รูปที่ 3.69 ผลการ Run GUI ที่ได้จากการออกแบบผ่านหน้าต่างคำสั่ง (command window)

### 3.4 การทำงานของโปรแกรม

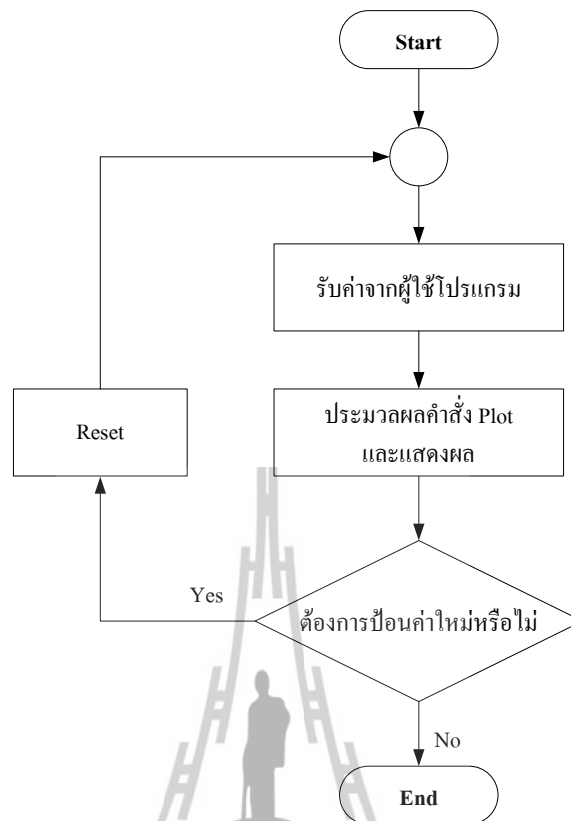
การออกแบบของโครงการจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนของการ รับค่าเข้ามา โดยโปรแกรมส่วนนี้ จะทำหน้าที่ในการรับค่า พิกัด จากผู้ทำการศึกษาว่าต้องการออกแบบสายอากาศในย่านใดโดยจะทำการป้อนค่าเข้าสู่โปรแกรมในช่องที่กำหนดเพื่อนำไปสู่การประมวลผล

2. ส่วนของการ ตรวจสอบข้อมูล คือผู้ทำการศึกษายะทำการป้อนค่าที่ต้องการจะออกแบบสายอากาศให้กับโปรแกรมและโปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงที่สามารถประมวลผลได้หรือไม่พร้อมทั้งบันทึกค่าที่จะออกแบบสายอากาศนั้นไว้

3. ส่วนของการประมวลผล จะเป็นส่วนของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศตามที่ผู้ใช้ได้ทำการป้อนค่าให้กับโปรแกรม

โดยจะมีแผนผังการทำงานของส่วนต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.70 แผนภาพ Block Diagram แสดง ภาพรวมการทำงานของ โปรแกรมประมวลผล

### 3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การเรียนรู้เกี่ยวกับ โปรแกรม MATLAB (GUI) วิธีการใช้งานทั่วไป และวิธีการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB (GUI) ในการออกแบบ และการทำงานของโปรแกรมที่ได้ออกแบบ

(หมายเหตุ : สำหรับรายละเอียดของการออกแบบและคำสั่งที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นของสายอากาศชนิดอื่น ๆ นั้น สามารถดูได้ในภาคผนวก)

## บทที่ 4

### การทดสอบการใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่เราทำการทดสอบ โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละชนิดผ่านทางโปรแกรมประมวลผลที่ได้สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB (GUI) เพื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งผลการทดสอบนี้จะได้ออกมาเป็นค่าพารามิเตอร์และแบบรูปของการแผ่กระจายกำลังงาน ของสายอากาศที่ได้ศึกษา ซึ่งผู้ศึกษาสามารถที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยโปรแกรมไปทำการเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ได้จากการศึกษาตามทฤษฎีเพื่อได้เข้าใจในเนื้อหาการเรียนรู้มากขึ้น

#### 4.2 วิธีการใช้งานโปรแกรม

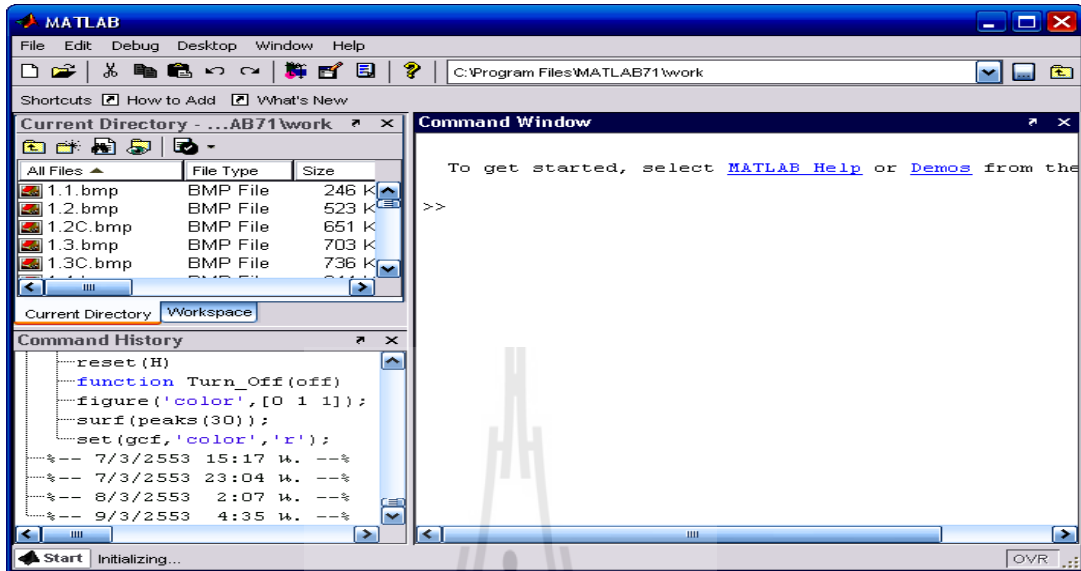
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการเข้าใช้งาน โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น โดยผู้ที่ทำการศึกษา โปรแกรมช่วยสอนนี้สามารถที่จะศึกษาเรียนรู้การใช้งาน โปรแกรมเบื้องต้นได้จากตัวอย่างดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 ตัวอย่างวิธีการเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

ในการเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรมการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนั้นผู้ทำการศึกษา จำเป็นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องสายอากาศที่จะทำการศึกษามาบ้างแล้ว เมื่อเข้ามาใช้งานในโปรแกรมช่วยสอนนี้แล้วจะทำให้ผู้ศึกษาได้เข้าใจในเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของสายอากาศชนิดนั้น ๆ มากขึ้น

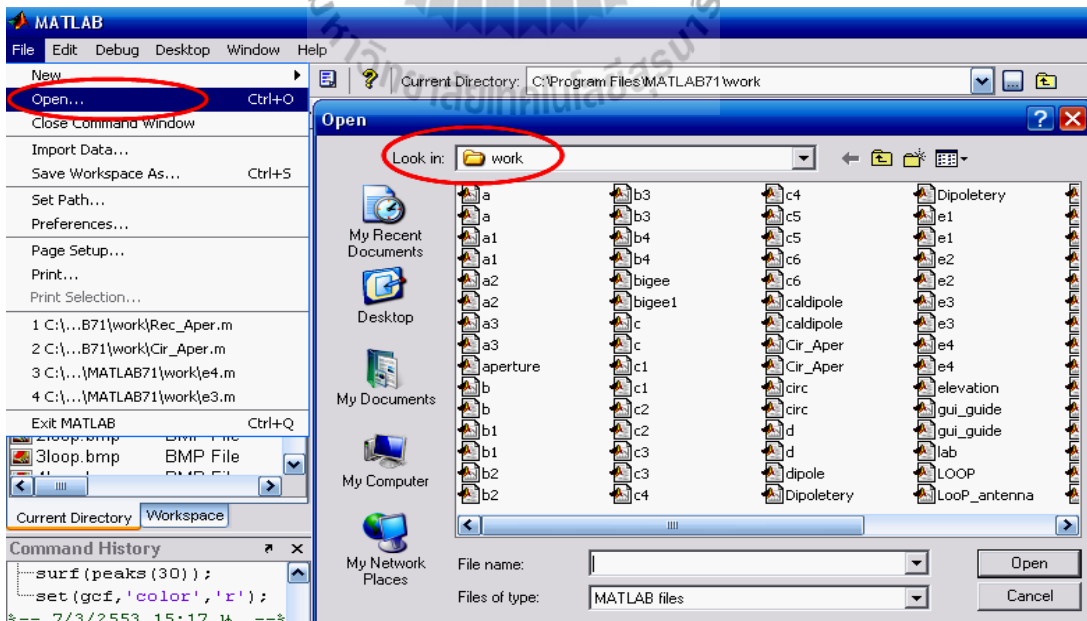
ตัวอย่างวิธีการการเข้าสู่โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

ขั้นที่ 1 ให้ผู้ศึกษาทำการเปิดโปรแกรม MATLAB ที่ได้ลงไว้ในเครื่องของนักศึกษาขึ้นมา จะปรากฏหน้าต่างดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB

ขั้นที่ 2 จากโปรแกรม MATLAB เมื่อทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมาแล้วให้ไปที่เมนู File → Open จะปรากฏหน้าต่างของ File Work ขึ้นมาดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.2 หน้าต่าง MATLAB File Work

ขั้นที่ 3 เลือก M-File ที่ชื่อว่า Patel.m จากนั้นสั่ง Open จะปรากฏ m-file function ของโปรแกรมขึ้นมาดังแสดงในรูป

```

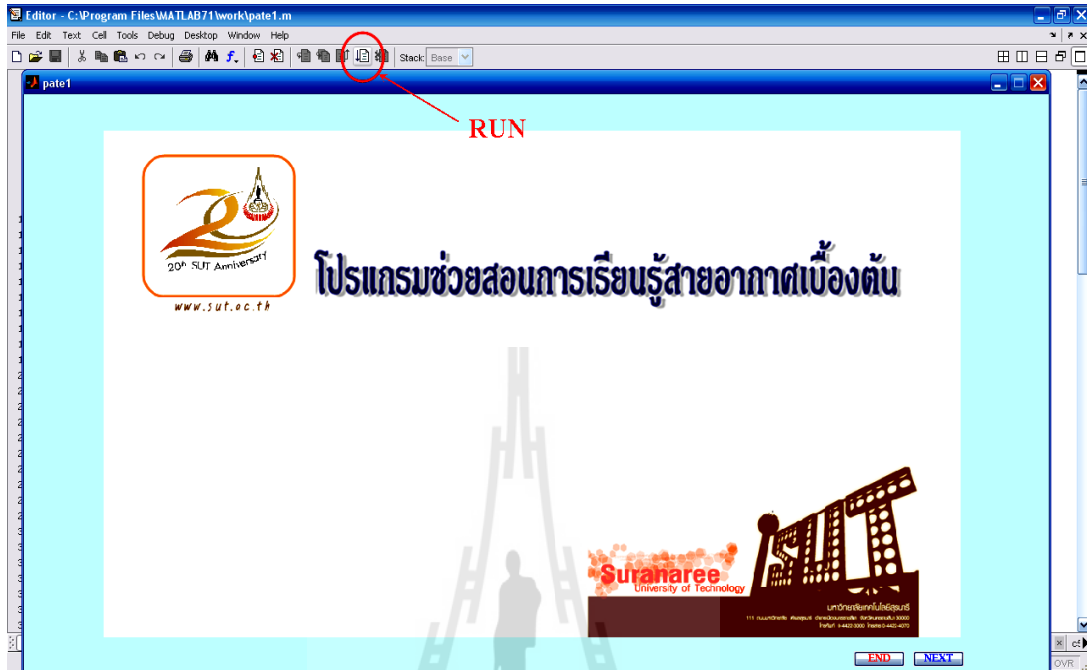
1 function varargout = patel(varargin)
2 % PATE1 M-file for patel1.fig
3 %   PATE1, by itself, creates a new PATE1 or raises the existing
4 %   singleton*.
5 %
6 %   H = PATE1 returns the handle to a new PATE1 or the handle to
7 %   the existing singleton*.
8 %
9 %   PATE1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
10 %   function named CALLBACK in PATE1.M with the given input arguments.
11 %
12 %   PATE1('Property','Value',...) creates a new PATE1 or raises the
13 %   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
14 %   applied to the GUI before patel_OpeningFunction gets called. An
15 %   unrecognized property name or invalid value makes property application
16 %   stop. All inputs are passed to patel_OpeningFcn via varargin.
17 %
18 %   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
19 %   instance to run (singleton)".
20 %
21 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
22
23 % Edit the above text to modify the response to help patel
24
25 % Last Modified by GUIDE v2.5 04-Mar-2010 05:17:21
26
27 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
28 - gui_Singleton = 1;
29 - gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
30                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
31                   'gui_OpeningFcn', @patel_OpeningFcn, ...
32                   'gui_OutputFcn',  @patel_OutputFcn, ...
33                   'gui_LayoutFcn',  [] , ...
34                   'gui_Callback',    []);
35 - if nargin && ischar(varargin{1})
36     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});

```

รูปที่ 4.3 หน้าต่าง MATLAB m-file function



ขั้นที่ 4 กด RUN จากหน้าต่าง MATLAB m-file function ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ก็จะเป็นการเข้าสู่โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.4 หน้าต่างการสั่ง RUN โปรแกรมช่วยสอน GUIDE pate1 ที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.5 หน้าต่างของโปรแกรมช่วยสอน ที่ได้ออกแบบไว้

จากขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วเมื่อผู้ศึกษาเข้ามาสู่หน้าต่างของโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แล้วนั้นต่อไปผู้ศึกษาก็จะได้ทำการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนนี้ตามการเรียนรู้ตามชนิดของสายอากาศที่ผู้ศึกษาต้องการศึกษาต่อไป

### 4.3 การทดสอบการใช้งานโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

การทดสอบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ ผู้ศึกษาจะได้เรียนรู้ทั้งในเรื่องของทฤษฎีของสายอากาศแต่ละชนิดอย่างคร่าว ๆ และยังได้ทำการออกแบบสายอากาศตามแต่ละชนิด โดยการกรอกค่า ความกว้าง ความยาว หรือค่ารัศมีของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบสายอากาศแต่ละชนิดนั้น การกรอกค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณก็จะแตกต่างกันออกไป

#### 4.3.1 ตัวอย่างการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นของสายอากาศ

ไดโพล (ที่ความยาวครึ่งคลื่น  $(L = \frac{\lambda}{2})$ ) เปรียบเทียบกับการศึกษาตามทฤษฎี

##### 1. การคำนวณตามทฤษฎีของสายอากาศไดโพลที่ความยาวครึ่งคลื่น $(L = \frac{\lambda}{2})$

จงหาค่า สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity,  $D_0$ ), พื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Effective Area,  $A_{em}$ ) และความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance,  $R_r$ )

วิธีทำ โดยกำหนดให้

$U$  แทน ความเข้มการแผ่พลังงาน

$P_{rad}$  แทน กำลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกจากสายอากาศ

$C_{in}(2\pi) = 2.435$  แทน ค่าคงที่ของออยเลอร์

$I_0$  แทน กระแสสูงสุดของสายอากาศ

เราสามารถหาสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity,  $D_0$ ) ได้จากสมการ

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{U|_{\theta=\frac{\pi}{2}}}{P_{rad}} = \frac{4}{C_{in}(2\pi)} = \frac{4}{2.435} = 1.643 \quad \#$$

เราสามารถหาพื้นที่ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Effective Area,  $A_{em}$ ) ได้จากสมการ

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi} (1.643) = 0.13\lambda^2 \quad \#$$

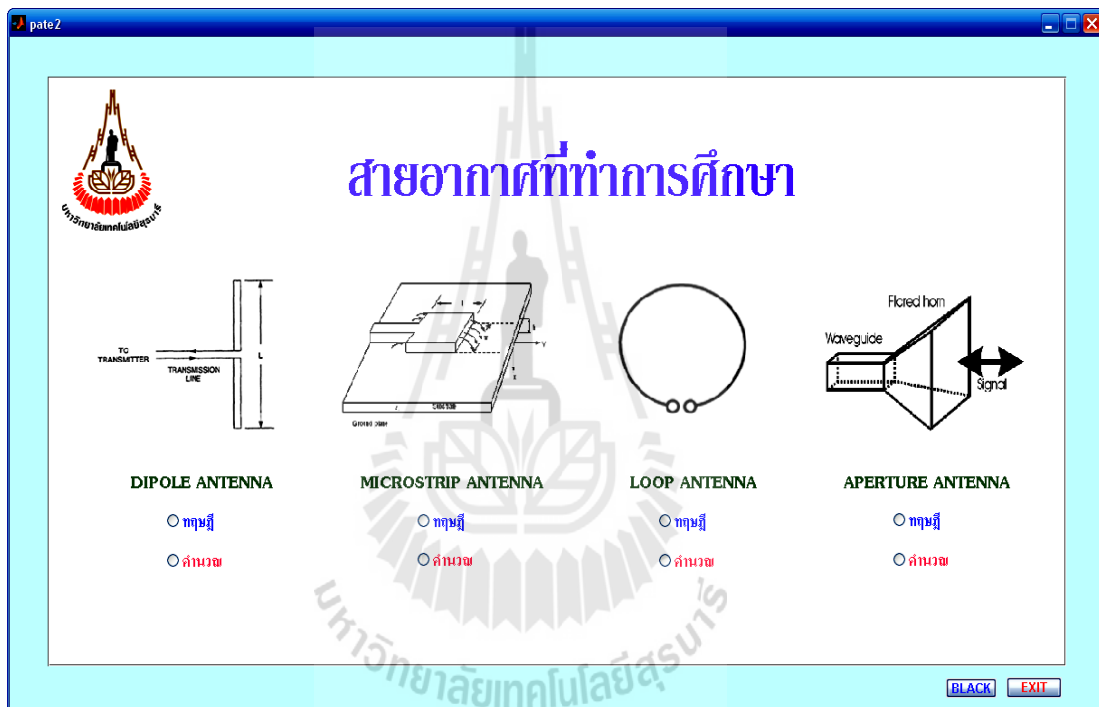
เราสามารถหาความต้านทานการแผ่พลังงาน (Radiation Resistance,  $R_r$ ) ได้จากสมการ

$$R_r = \frac{2P_{rad}}{|I_0|^2} = \frac{\eta}{4\pi} C_{in}(2\pi) = 30(2.4335) \approx 73\Omega \quad \#$$

## 2. การศึกษาเนื้อหาและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลโดยใช้โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นในการคำนวณ

จากการที่ผู้ศึกษาได้เข้าสู่หน้าต่างของโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นแล้วต่อไป จะเป็นการทดสอบโปรแกรมในส่วนของการศึกษาเนื้อหาและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลที่ความยาวครึ่งคลื่น  $(L = \frac{\lambda}{2})$  โดยมีขั้นตอนดังนี้

**ขั้นที่ 1** เมื่อนักศึกษาเข้าสู่หน้าต่างหลักของโปรแกรมแล้ว จะปรากฏหน้าต่างดังแสดง



รูปที่ 4.6 หน้าต่างสำหรับเลือกชนิดของสายอากาศที่จะศึกษา

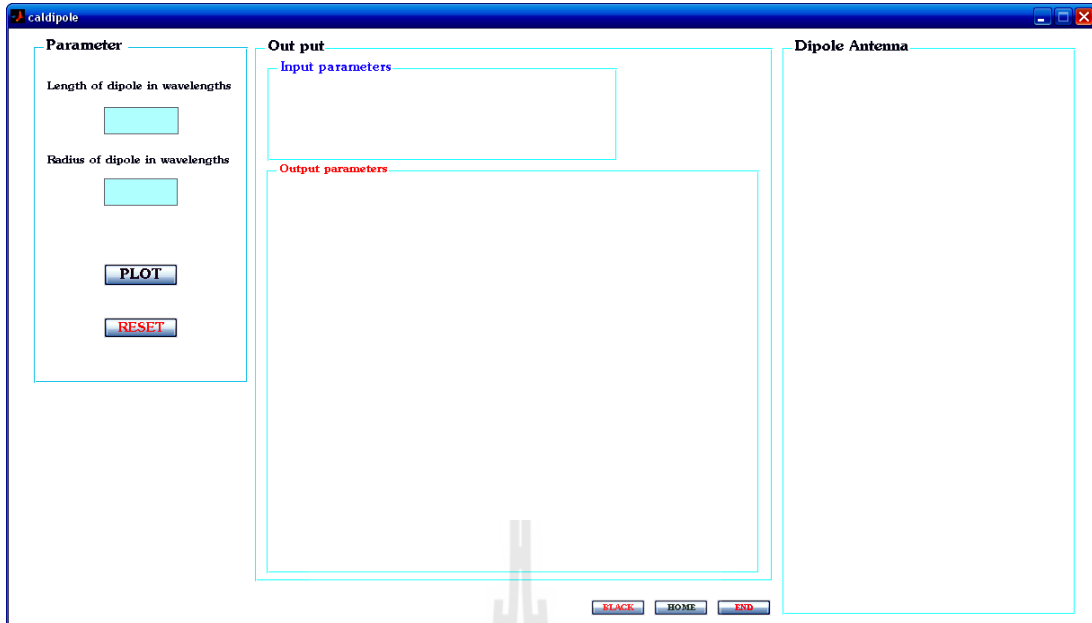
**ขั้นที่ 2** ให้นักศึกษาเลือกว่าต้องการศึกษาสายอากาศชนิดใด โดยเลือกว่าจะศึกษาในส่วนของเนื้อหาทฤษฎี หรือจะศึกษาเฉพาะการคำนวณค่าพารามิเตอร์ก็ได้ ซึ่งสามารถเลือกได้จากการกดที่ปุ่ม “ทฤษฎี” หรือปุ่ม “คำนวณ” ภายใต้อาณาเขตชนิดนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งในที่นี้จะทำ การศึกษาทฤษฎี ของสายอากาศไดโพล เพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่อไปดังนี้

- เลือกปุ่มกด “ทฤษฎี” จะปรากฏหน้าต่างในส่วนของเนื้อหาสายอากาศไดโพล ออกมาดังรูป

รูปที่ 4.7 หน้าต่างในส่วนของทฤษฎีของสายอากาศไดโพล

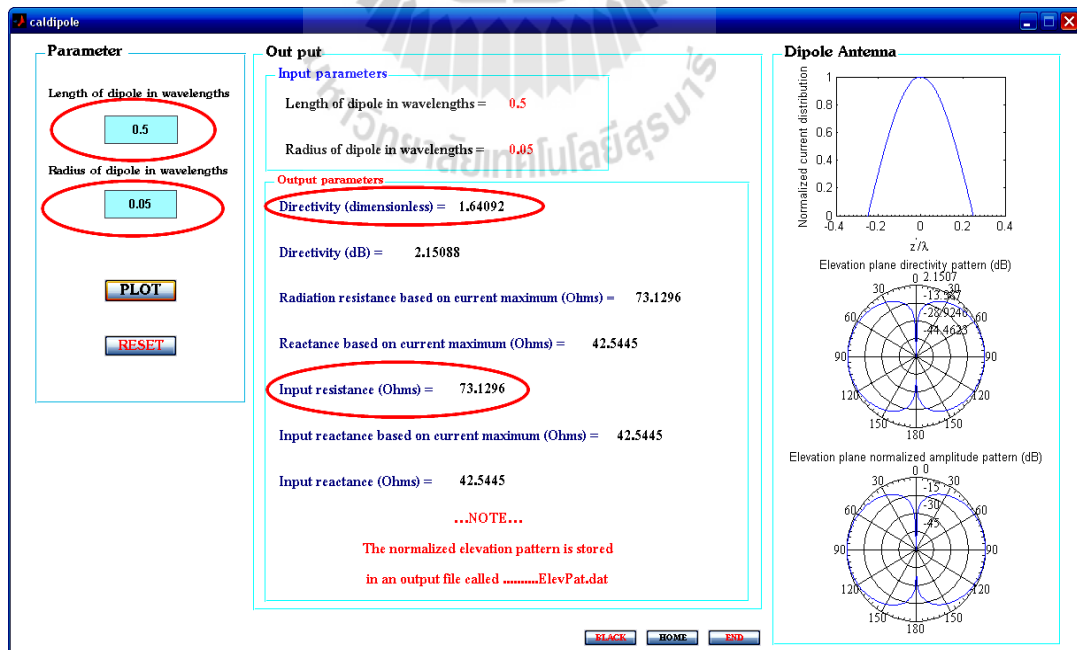
- จากนั้นทำการกดปุ่ม “NEXT” จะเป็นการเลื่อนหน้าต่างในส่วนของเนื้อหาไปเรื่อยๆ แต่ถ้าหากผู้ศึกษาต้องการย้อนกลับไปยังหน้าเริ่มต้นใหม่ก็สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม “HOME” หรือถ้าหากต้องการย้อนกลับไปหน้าก่อนหน้าก็กดปุ่ม “BACK” ได้

**ขั้นที่ 3** เมื่อนักศึกษาได้ศึกษาเนื้อหาแล้วหากต้องการศึกษาการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศก็สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม “คำนวณ” ภายใต้สายอากาศที่จะคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งในที่นี้จะเป็นการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล ดังนั้นจึงเลือกการคำนวณของสายอากาศไดโพลซึ่งจะปรากฏหน้าต่างของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ออกมาดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.8 หน้าต่างสำหรับคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพล

ขั้นที่ 4 ทำการกรอกค่าความยาว และ ค่าของรัศมีของสายอากาศที่ต้องการศึกษา ลงใน ช่องว่างที่กำหนดให้ จากนั้นสั่ง PLOT โปรแกรมจะทำการ PLOT กราฟ รูป pattern ของสายอากาศ พร้อมทั้งคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญออกมาให้ดังแสดงในรูป (สายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น)



รูปที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล

จากการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกมาจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรมช่วยสอนนั้นมีค่าพารามิเตอร์ดังปรากฏในรูป ซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จริงจากทฤษฎีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4. 3.2 ตัวอย่างการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นของสายอากาศไมโครสตริปแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม เปรียบเทียบกับการศึกษาตามทฤษฎี

1. การคำนวณตามทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริป

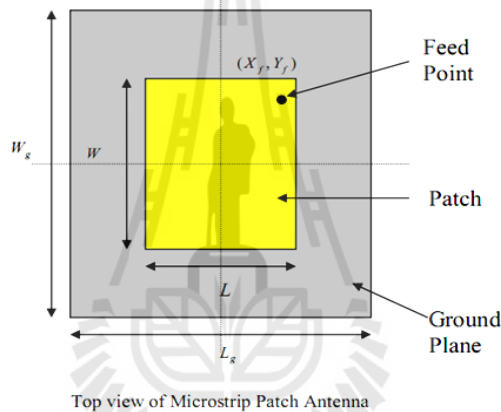
\*\*\*สายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม

โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการจะออกแบบคือ

$(f_0) = 1.9 \text{ GHz}$

$(\epsilon_r) = 11.9$

และ  $(h) = 1.5 \text{ mm}$



ขั้นที่ 1: การคำนวณความกว้าง (W) ความกว้างของแผ่นตัวของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

เมื่อกำหนดให้

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$\epsilon_r = 11.9$

$f_0 = 1.9 \text{ GHz}$

$W = 0.0311 \text{ m}$

$= 31.1 \text{ mm} \quad \#$

ขั้นที่ 2 : คำนวณ Effective dielectric constant ( $e_{\text{reff}}$ ) : ตามสมการ

$$e_{\text{reff}} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} \frac{1 + \frac{12h}{W}}{1 + \frac{12h}{W} \sqrt{e_r}}$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$W = 31.1\text{mm}$$

$$e_r = 11.9$$

$$h = 1.5\text{mm}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871 \quad \#$$

ขั้นที่ 3 : คำนวณ Effective length ( $L_{\text{eff}}$ ) : ตามสมการ

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{e_{\text{reff}}}}$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871$$

$$f_0 = 1.9\text{GHz}$$

$$L_{\text{eff}} = 0.024\text{m} = 24\text{mm} \quad \#$$

ขั้นที่ 4 :

ขั้นที่ 4 : คำนวณ length extension ( $D L$ ) : ตามสมการ

$$D L = 0.412h \frac{(e_{\text{reff}} + 0.3) \frac{W}{h} + 0.264}{(e_{\text{reff}} - 0.258) \frac{W}{h} + 0.8}$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$W = 31.1\text{mm}$$

$$e_{\text{reff}} = 10.7871$$

$$h = 1.5\text{mm}$$

$$D L = 6.3455 \times 10^{-4} \text{mm} \quad \#$$

ขั้นที่ 5 : คำนวณ actual length of patch ( $L$ ) : ตามสมการ

$$L = L_{\text{eff}} - 2D L$$

เมื่อกำหนดค่าให้

$$L_{\text{eff}} = 24\text{mm}$$

$$D L = 6.3455 \times 10^{-4} \text{mm}$$

$$L = 0.0228\text{m} = 22.8\text{mm} \quad \#$$

\*\*\*สายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม

จงทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลมโดยใช้ Substrate (RT/duroid 5880) ซึ่งมีค่า dielectric constant = 2.2 และหนา 0.1588 cm (0.0625 in.) ให้ทำงานที่ความถี่เรโซแนนท์เท่ากับ = 10 GHz

วิธีทำ

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}}$$

จากสมการหารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม ได้คิดค่าตัวแปร  $F$  ซึ่งเราสามารถหาตัวแปร  $F$  ได้จากสมการ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{8.791 \times 10^9}{10 \times 10^9 \sqrt{2.2}} = 0.593$$

นำค่าที่ได้จากการหาค่า

$F$  แทนในสมการหารัศมีของสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} = 0.525 \text{ cm} (0.207 \text{ in})$$

กำหนดให้  $a$  เป็นรัศมีของสายอากาศ จะได้ว่า

สายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลมที่มีรัศมี 0.525 cm ที่ทำงานที่ความถี่ 10 GHz #



2. การศึกษาเนื้อหาและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นในการคำนวณ

จากการศึกษาสำหรับในส่วนของเนื้อหานั้น ผู้ศึกษาสามารถศึกษาได้โดยใช้วิธีการเดียวกับการศึกษาในสายอากาศไดโพลที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะในส่วนของ การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปทั้งสองชนิดเท่านั้น ดังแสดงได้ดังนี้

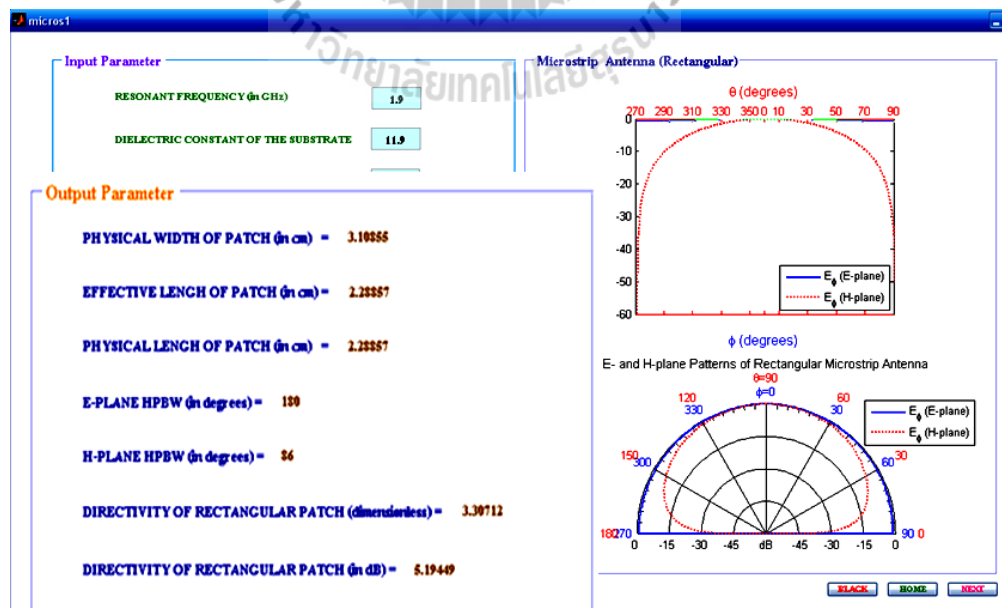
สำหรับสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม ให้กรอกค่าลงในช่องว่างดังแสดงในรูป

**Input Parameter**

RESONANT FREQUENCY (in GHz)	1.9	
DIELECTRIC CONSTANT OF THE SUBSTRATE	11.9	
HEIGHT OF THE SUBSTRATE (in cm)	10000015	
RESONANT INPUT RESISTANCE (in ohms)	50	

รูปที่ 4.10 การกรอกค่าพิกัดที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม

สิ่ง PLOT จะได้ดังแสดงในรูป



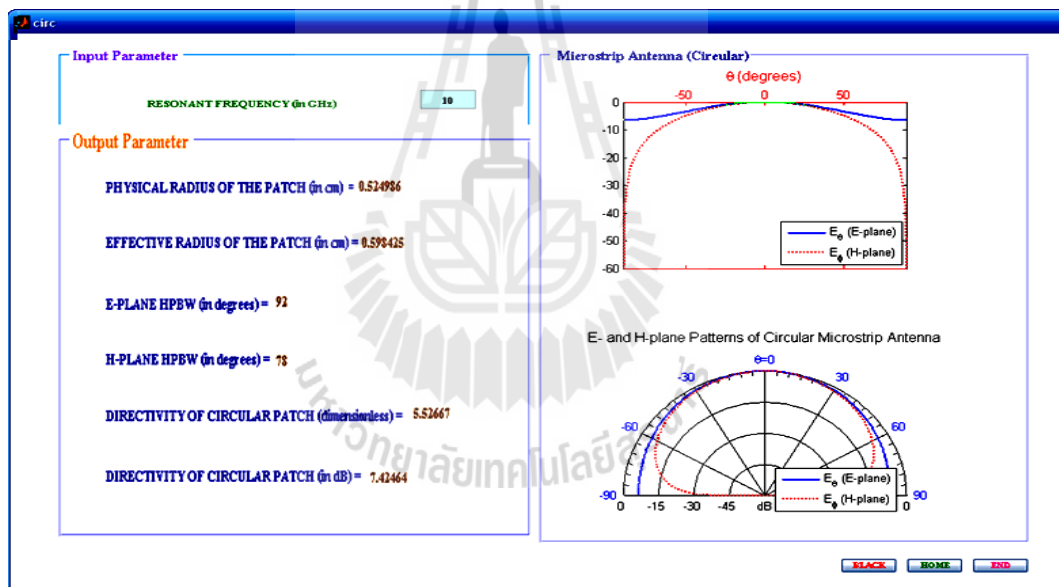
รูปที่ 4.11 ผลการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ (สายอากาศไมโครสตริปชนิดสี่เหลี่ยม)

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม ให้กรอกค่าลงในช่องว่างดังแสดงในรูป

Input Parameter	
RESONANT FREQUENCY (in GHz)	10
DIELECTRIC CONSTANT OF THE SUBSTRATE	2.2
HEIGHT OF THE SUBSTRATE (in cm)	0.1588
RESONANT INPUT RESISTANCE (in ohms)	50
<input type="button" value="RESET"/> <input type="button" value="PLOT"/>	

รูปที่ 4.12 การกรอกค่าพิกัดที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม

สั่ง PLOT จะได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.13 ผลการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ (สายอากาศไมโครสตริปชนิดวงกลม)

จากการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกมาจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณ ได้จากการใช้ โปรแกรมช่วยสอนนั้นมีค่า พารามิเตอร์ดังปรากฏในรูป ซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณ ได้จริงตามทฤษฎีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

(หมายเหตุ: การกรอกค่าพิกัดของสายอากาศที่แสดงให้เห็นเป็นการกรอกเพื่อแสดง ให้ผู้ศึกษาได้เห็น ว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมานั้นมีความถูกต้องตรงกับการคำนวณตามทฤษฎีจริง ซึ่งผู้ศึกษาสามารถที่จะกรอกค่าพิกัดอื่นๆ ได้ตามต้องการ)

4. 3.3 ตัวอย่างการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นของสายอากาศแบบบ่วง ( Loop Antenna) เปรียบเทียบกับการศึกษาตามทฤษฎี

1. การคำนวณตามทฤษฎีของสายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna)

จงหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Radiation efficiency) ของสายอากาศแบบบ่วง จำนวน 1 รอบ ที่ความถี่  $(f) = 100\text{MHz}$  โดยรัศมีของบ่วงมีขนาด  $\frac{\lambda}{25}$  รัศมีขนาดของเส้นลวดเท่ากับ  $10^{-4}\lambda$  ระยะห่างระหว่างแต่ละบ่วงเท่ากับ  $4 \times 10^{-4}\lambda$  สมมติว่าสายอากาศดังกล่าวทำมาจากทองแดงโดยมีค่า  $\text{Conductivity} = 5.7 \times 10^7 \text{ s/m}$

วิธีทำ ทำการหาค่าพื้นที่ของวงกลมของสายอากาศ

$$S = \pi a^2 = \pi \left( \frac{\lambda}{25} \right)^2 = \frac{\pi \lambda^2}{625}$$

ทำการหาค่า Radiation resistant ของสายอากาศ

$$R_r (\text{single turn}) = \eta \left( \frac{2\pi}{3} \right) \left( \frac{kS}{\lambda} \right)^2 = 120\pi \left( \frac{2\pi}{3} \right) \left( \frac{kS}{\lambda} \right)^2 = 0.788 \text{ohms}$$

ทำการหาค่า Loss resistant ของสายอากาศจำนวน 1 รอบ

$$R_L = R_{lf} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} = \frac{1}{(25 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{\pi (10^8) (4\pi \times 10^{-7})}{5.7 \times 10^7}} = 1.053 \text{ohms}$$

ทำการหา Radiation efficiency ตามสมการ

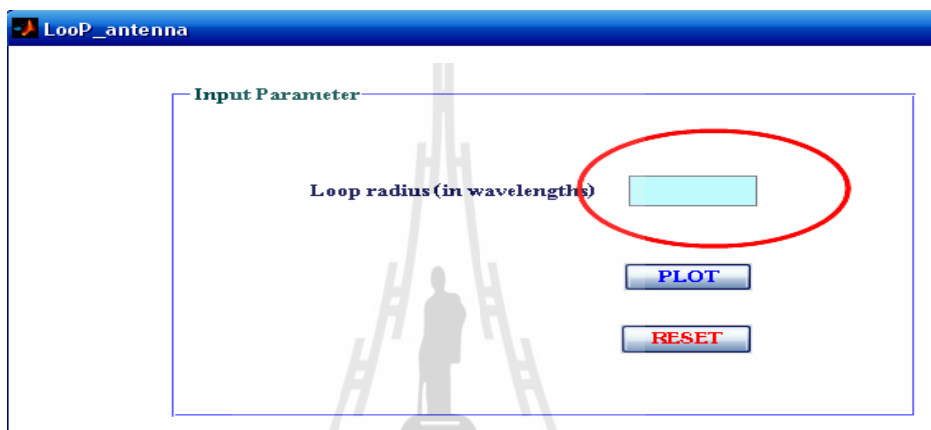
$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_r + R_L} = \frac{0.788}{0.788 + 1.053} = 0.428 = 42.8\%$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแบบบ่วง จำนวน 1 รอบ มีค่าเท่ากับ 42.8% #

## 2. การศึกษาเนื้อหาและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงโดยใช้โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นในการคำนวณ

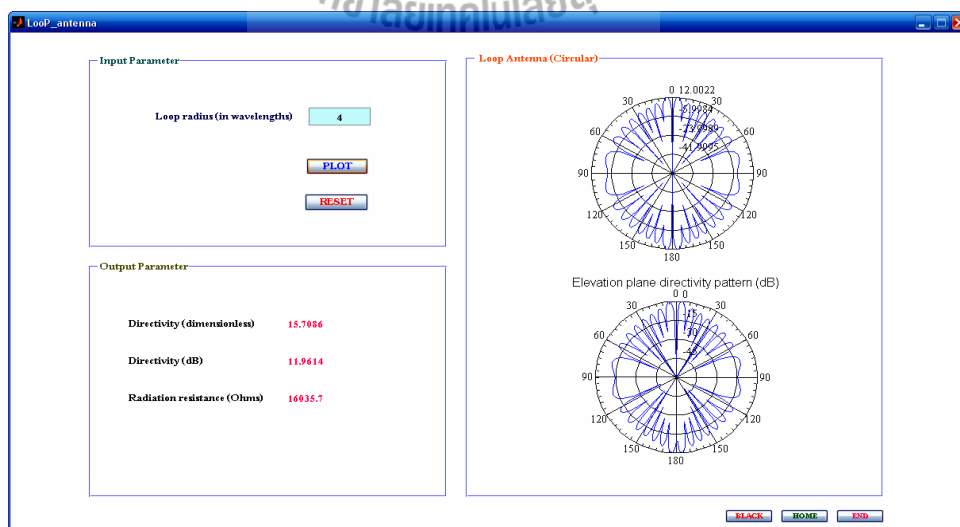
จากการศึกษาสำหรับในส่วนของเนื้อหา นั้น ผู้ศึกษาสามารถศึกษาได้โดยใช้วิธีการเดียวกับการศึกษาสายอากาศไดโพลคั้งที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะในส่วนของ การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบบ่วงเท่านั้น ดังแสดงได้ดังนี้

สายอากาศแบบบ่วง ให้กรอกค่าลงในช่องว่างดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.14 การกรอกค่าพิกัดที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบบ่วง

ตั้ง PLOT จะได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.15 ผลการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ของสายอากาศแบบบ่วง

จากการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกมาจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรมช่วยสอนนั้นมีค่า พารามิเตอร์ดังปรากฏในรูป ซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จริงตามทฤษฎีตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว

(หมายเหตุ: การกรอกค่าพิกัดของสายอากาศที่แสดงให้เห็นเป็นการกรอกเพื่อแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมานั้นมีความถูกต้องตรงกับการคำนวณตามทฤษฎีจริง ซึ่งผู้ศึกษาสามารถที่จะกรอกค่าพิกัดอื่นๆ ได้ตามต้องการ)

#### 4. 3.4 ตัวอย่างการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นของสายอากาศช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม เปรียบเทียบกับการศึกษาตามทฤษฎี

##### 1. การคำนวณตามทฤษฎีของสายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna)

ถ้าต้องการออกแบบสายอากาศแบบ ช่องเปิด โดยให้มีค่า สภาวะเจาะจงทิศทาง สูงสุดที่ทำมุม  $30^\circ$  จากตำแหน่งเดิม จงหาขนาดที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศตัวนี้ทำงานได้ตามต้องการ โดย

1. สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม (Square aperture)
2. สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบวงกลม (circular aperture)

**วิธีทำ** \*\*\* สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม

เนื่องจากทุกด้านของสายอากาศ สายอากาศช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยม มีขนาดเท่ากันดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้สมการได้ 2 สมการ คือ

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ch}} \quad \text{และ} \quad b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ce}}$$

$$a = b = \frac{\lambda}{2 \sin 30} = \lambda$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถหาค่าสภาวะเจาะจงทิศทางได้จากสมการ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{em} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left( \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ce}} \right) \left( \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{ch}} \right)$$

$$D_0 = \frac{\pi}{\sin^2(30^\circ)} = 12.5664 = 10.992 \text{ dB} \quad \#$$

### \*\*\*สายอากาศตัวนี้เป็นสายอากาศช่องเปิดแบบวงกลม

เนื่องจากสายอากาศ      สายอากาศช่องเปิดแบบวงกลม เราต้องหารัศมีของสายอากาศ จากสมการ

$$a = \frac{1.841\lambda}{2\pi \sin \theta_c} = \frac{\lambda}{3.413 \sin \theta_c} = \frac{\lambda}{3.413 \sin 30^\circ} = 0.586\lambda$$

เราสามารถหาค่า      Directivity ได้จากสมการ

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi \left( \frac{1.841}{2\pi \sin \theta_c} \right)^2 = \frac{3.4129}{\sin^2 \theta_c} = \frac{1.068\pi}{\sin^2 \theta_c}$$

$$D_0 = \frac{1.068\pi}{\sin^2 \theta_c} = \frac{1.068\pi}{\sin^2 30^\circ} = 13.647 = 11.35dB \quad \#$$

2. การศึกษาเนื้อหาและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิด โดยใช้โปรแกรม  
ช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นในการคำนวณ

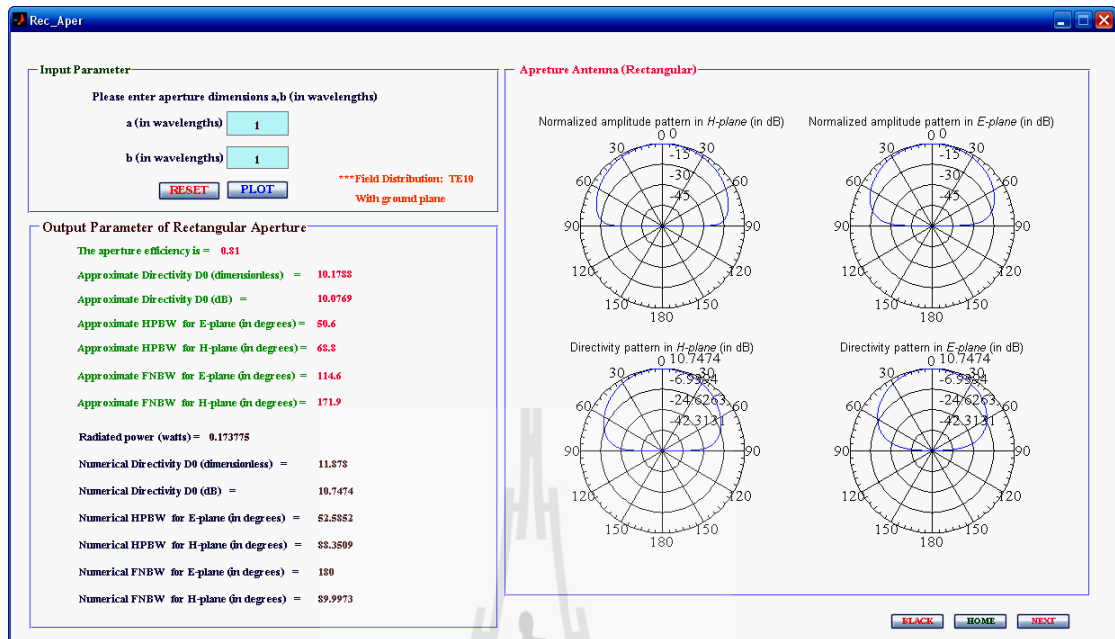
จากการศึกษาสำหรับในส่วนของเนื้อหานี้ ผู้ศึกษาสามารถศึกษาได้โดยใช้วิธีการเดียวกับการศึกษาในสายอากาศไดโพลดิ่งที่ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นเฉพาะในส่วนของ  
การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศช่องเปิดทั้งสองชนิดเท่านั้น ดังแสดงได้ดังนี้

สำหรับสายอากาศช่องเปิดชนิดสี่เหลี่ยม ให้กรอกค่าลงในช่องว่างดังแสดงในรูป

The screenshot shows a software window titled "Rec\_Aper". Inside, there is a section labeled "Input Parameter" with the instruction "Please enter aperture dimensions a,b (in wavelengths)". Below this, there are two input fields: "a (in wavelengths)" and "b (in wavelengths)", both containing the value "1". A red circle highlights these two input fields. At the bottom of the input area, there are two buttons: "RESET" and "PLOT". To the right of the buttons, there is a note: "\*\*\*Field Distribution: TE10 With ground plane".

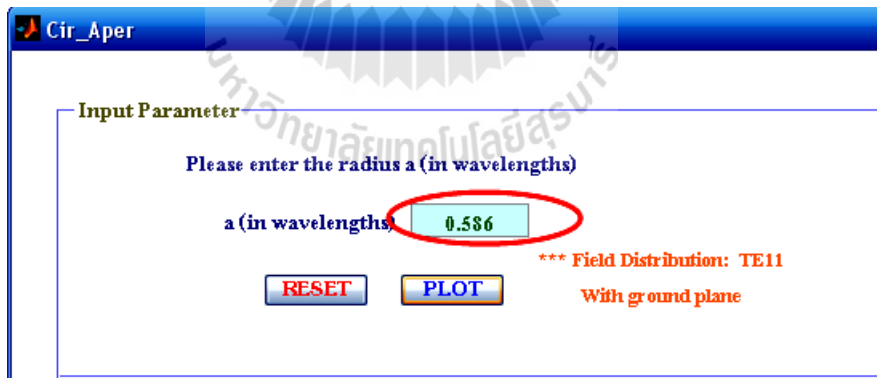
รูปที่ 4.16 การกรอกค่าพิกัดที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดชนิดสี่เหลี่ยม

สั่ง PLOT จะได้ดังแสดงในรูป



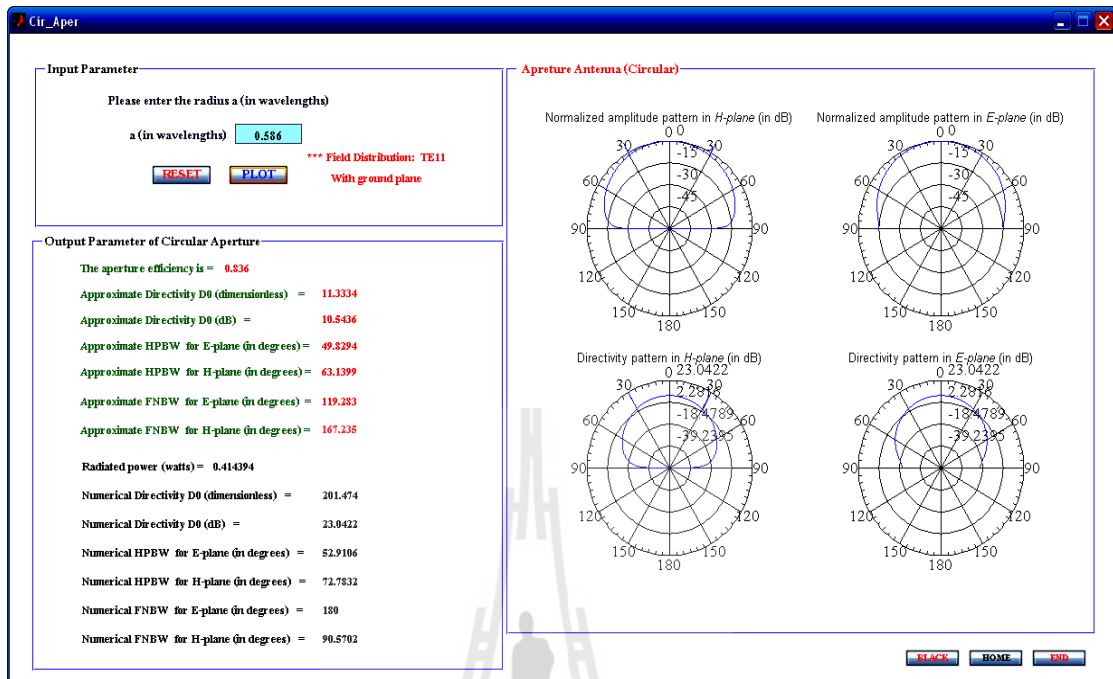
รูปที่ 4.17 ผลการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ (สายอากาศช่องเปิดชนิดสี่เหลี่ยม)

สำหรับสายอากาศช่องเปิดชนิดวงกลม ให้กรอกค่าลงในช่องว่างดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.18 การกรอกค่าพิกัดที่จะใช้ในการออกแบบสายอากาศช่องเปิดชนิดวงกลม

ตั้ง PLOT จะได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.19 ผลการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ (สายอากาศช่องเปิดชนิดวงกลม)

จากการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกมาจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรมช่วยสอนนั้นมีค่า พารามิเตอร์ดังปรากฏในรูป ซึ่งจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จริงจากทฤษฎีตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว

(หมายเหตุ: การกรอกค่าพิกัดของสายอากาศที่แสดงให้เห็นเป็นการกรอกเพื่อแสดงให้ผู้ศึกษาได้เห็น ว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมานั้นมีความถูกต้องตรงกับการคำนวณตามทฤษฎีจริง ซึ่งผู้ศึกษาสามารถที่จะกรอกค่าพิกัดอื่นๆได้ตามต้องการ)



#### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การทดสอบการใช้โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น ตัวอย่างการกรอกค่าพิกัด เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศชนิดนั้น ๆ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของสายอากาศแต่ละชนิด ซึ่งจะเป็นการพิสูจน์ว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมานั้นมีความถูกต้องและแม่นยำในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศชนิดนั้น ๆ ได้อย่างถูกต้องตรงตามทฤษฎีที่ได้เรียนรู้มาจากรายวิชาที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจากการทดสอบโดยการ RUN โปรแกรมที่ได้ออกแบบมานั้น สรุปได้ว่า โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ต้องการศึกษาได้อย่างง่ายดายและมีความถูกต้อง และจากโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศนี้จะทำให้ผู้ศึกษามีความเข้าใจในเนื้อหาที่ได้เรียนรู้มามากขึ้น ที่สำคัญสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ ไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเรียนรู้ต่อไปได้จริง



## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

โครงการการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น ที่ได้ออกแบบมานั้น มีส่วนประกอบสำคัญทั้งหมด 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผล (MATLAB(GUI)
2. โปรแกรมสำหรับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้
3. เนื้อหาของสายอากาศที่ได้ทำการศึกษาเพื่อนำมาออกแบบ โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น

โดยส่วนประกอบทั้งสามส่วนนี้ จะทำงานร่วมกันทั้งหมด ยกเว้นส่วนของเนื้อหา โดยจะให้ผู้ศึกษาได้เรียนรู้อย่างคร่าวๆเท่านั้นซึ่งรายละเอียดนั้นสามารถศึกษาได้จากในส่วนของรูปเล่มโครงการ เมื่อทำการทดสอบโปรแกรมแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการใช้โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น จะช่วยให้ผู้ศึกษาได้เข้าใจในเนื้อหาบทเรียนเรื่อง สายอากาศ และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละชนิดมากยิ่งขึ้นจากการใช้โปรแกรมคำนวณ อีกทั้งยังได้เห็น แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีความถูกต้องแม่นยำ ทำให้มีความสะดวกเร็วในการออกแบบสายอากาศ และลดความผิดพลาดในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ด้วยมือ และที่สำคัญสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้งานได้จริงอีกด้วย

#### 5.2 ปัญหาที่พบระหว่างทำการทดสอบ

ในการทำโครงการการออกแบบโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ได้พบปัญหาในระหว่างการทดสอบโปรแกรม ซึ่งปัญหาที่พบบ่อยๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 นี้ ในตารางจะประกอบไปด้วยปัญหาที่พบ สาเหตุของการเกิดปัญหา และแนวทางการแก้ไขปัญหาดังนี้

ตารางที่ 5.1 ปัญหา สาเหตุและแนวทางการแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่พบ	สาเหตุของปัญหา	แนวทางการแก้ไขปัญหา
1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรมมีความล่าช้ามาก	เนื่องจากเครื่องคอมพิวเตอร์มีคุณภาพค่อนข้างต่ำ และโปรแกรมที่ใช้ออกแบบมีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์	ควรใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยความระมัดระวัง และควรลบไฟล์ข้อมูลที่ไม่จำเป็นออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อลดการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ในส่วนที่ไม่จำเป็น
2. เกิดข้อผิดพลาดของโปรแกรมที่ออกแบบขึ้น	เนื่องจากการในการออกแบบโปรแกรมนั้น ผู้ออกแบบต้องประยุกต์สมการเพื่อนำมาเขียนฟังก์ชันในการคำนวณค่าต่าง ๆ ทำให้เกิดการ ข้อผิดพลาด ขึ้นได้	ผู้ออกแบบควรใช้ตัวแปรที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และควรเป็นตัวแปรที่เข้าใจง่ายสอดคล้องกับค่าที่จะนำมาใช้เพื่อให้โปรแกรมไม่ซับซ้อนและไม่เกิดข้อบกพร่องของตัวโปรแกรม ขึ้น

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ผู้ศึกษาควรศึกษาคู่มือในการใช้งานโปรแกรม ช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น เพื่อเข้าใจในหลักการทำงานของโปรแกรมอย่างคร่าว ๆ ก่อนทำการศึกษารายละเอียดในส่วนของเนื้อหาภายในโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ เพื่อจะได้ไม่เกิดความผิดพลาดในการใช้งานโปรแกรม
2. ผู้ศึกษาควรใช้งานโปรแกรมตามขั้นตอนที่ผู้จัดทำได้แสดงไว้ให้ดู เพื่อจะได้ไม่เกิดความเสียหายแก่ตัวโปรแกรม หรือเกิดข้อผิดพลาดโดยมีสาเหตุจากข้อจำกัดขึ้นในตัวโปรแกรมนั้น
3. ในการใช้งาน โปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้นนี้ ผู้ศึกษาควรทำการศึกษาในส่วนของตัวโปรแกรมไปพร้อม ๆ กับการศึกษาเนื้อหาตามทฤษฎีที่ได้เรียนรู้มาจากรายวิชาที่เกี่ยวข้อง เพื่อจะได้เข้าใจในบทบาทเรียนมากยิ่งขึ้น

4. ขณะที่ผู้ศึกษาใช้งาน โปรแกรมไม่ควรเปิดโปรแกรมอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องขึ้นมาเพราะจะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เกิดความล่าช้าในการประมวลผล และโปรแกรมอาจเกิดข้อผิดพลาดซึ่งจะมีโอกาสทำให้ตัว โปรแกรมปิดตัวโปรแกรมเองหรือใช้งาน โปรแกรมไม่ได้ ขึ้นได้
5. หลังจากการศึกษาโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น เสร็จสิ้นทุกครั้งควรตรวจสอบให้แน่ใจว่า ได้ทำการปิดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว เพื่อลดการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่ให้เกิดความร้อนมากไป

#### 5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงการโปรแกรมช่วยสอนการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น ยังมีส่วนที่สามารถพัฒนาต่อไปให้ดียิ่งขึ้นได้อีก เช่น พัฒนาให้โปรแกรมสามารถพล็อตกราฟในลักษณะสามมิติ มีการบอกค่าพารามิเตอร์ที่ละเอียดมากขึ้น และมีคุณภาพดีขึ้น พัฒนาโปรแกรมในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศให้หลากหลายขึ้น เป็นต้น



## บรรณานุกรม

- [1] C. A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design. Singapore : John Wiley & Son, 1997.
- [2] รังสรรค์ วงศ์สรรค์ . “วิศวกรรมสายอากาศ ” เอกสารประกอบคำสอน สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 2550
- [3] R. N. Simons. Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems. New York : John Wiley & Son, 2001
- [4] Benson, F. A. and T. M. Benson, Fields Waves and Transmission Lines, Chaman & Hall, 1991
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole\\_antenna#Dipole\\_characteristics](http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna#Dipole_characteristics)
- [6] <http://www.radio-electronics.com/info/antennas/dipole/dipole.php>
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Loop\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Loop_antenna)
- [8] <http://books.google.co.th>



## ภาคผนวก

## โค้ดโปรแกรม MATLAB (GUI)

### 1. โค้ดโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรมการเรียนรู้สายอากาศเบื้องต้น (เริ่มต้นการใช้งาน)

```
function varargout = code(varargin)
% CALDIPOLE M-file for caldipole.fig
% CALDIPOLE, by itself, creates a new CALDIPOLE or raises the existing
% singleton*.
% H = CALDIPOLE returns the handle to a new CALDIPOLE or the handle to
% the existing singleton*.
% CALDIPOLE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in CALDIPOLE.M with the given input arguments.
% CALDIPOLE('Property','Value',...) creates a new CALDIPOLE or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before caldipole_OpeningFunction gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to caldipole_OpeningFcn via varargin.
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help caldipole
% Last Modified by GUIDE v2.5 08-Feb-2010 04:06:17
% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
```

```

    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @caldipole_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @caldipole_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before caldipole is made visible.
function caldipole_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
    handles.output = hObject;
% Update handles structure
    guidata(hObject, handles);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = caldipole_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
    varargout{1} = handles.output;
function L_input1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function L_input1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

```

```

function R_input2_Callback(hObject, eventdata, handles)
function R_input2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end
end

```

% --- Executes on button press in KK\_pushbutton1.

```

function KK_pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    L=str2double(get(handles.L_input1,'String'));
    r=str2double(get(handles.R_input2,'String'));

%***Insert input data error loop***
    PI = 4.0*atan(1.0);
    E = 120.0*PI;
    THETA = PI/180.0;
    UMAX = 0.0;
    PRAD = 0.0;
    TOL = 1.0E-6;
    A = L*PI;
    I = 1;

    while(I <= 180)
        XI = I*PI/180.0;
        if(XI ~= PI)
            U = ((cos(A*cos(XI))-cos(A))/sin(XI))^2*(E/(8.0*PI^2));
            if(U > UMAX)
                UMAX = U;
            end
        end
    end
    UA = U*sin(XI)*THETA*2.0*PI;

```



```

        PRAD = PRAD+UA;
        I = I+1;
    end

D = (4.0*PI*UMAX)/PRAD;
DDB = 10.0*log10(D);
RR = 2.0*PRAD;
    if(A ~= PI)
        RIN = RR/(sin(A))^2;
    end

fid = fopen('ElevPat.dat','w');
fprintf(fid,'\tDipole\n\n\tTheta\t\tE (dB)\n');
fprintf(fid,'\t----\t\t-----');
T = zeros(180,1);
ET = zeros(180,1);
EdB = zeros(180,1);
x = 1;
    while(x<=180)
        T(x) = x-0.99;
        ET(x) = (cos(PI*L*cos(T(x)*THETA))-cos(PI*L))/sin(T(x)*THETA);
        x = x+1;
    end

ET = abs(ET);
ETmax = max(abs(ET));
EdB = 20*log10(abs(ET)/ETmax);
x = 1;
    while(x<=180)
        fprintf(fid,'\n %5.4f %12.4f',T(x),EdB(x));
        x = x+1;
    end
end

```

```

fclose(fid);

n=120*pi;
k=2*pi;

if exist('cosint')~=2,
    disp(' ');
    disp('Symbolic toolbox is not installed. Switching to numerical computation of
        sine and cosine integrals.');
```

$$X_m = 30 * (2 * \text{si}(k * L) + \cos(k * L) * (2 * \text{si}(k * L) - \text{si}(2 * k * L)) - \dots$$

$$\sin(k * L) * (2 * \text{ci}(k * L) - \text{ci}(2 * k * L) - \text{ci}(2 * k * r^2 / L)));$$

$$X_{in} = X_m / (\sin(k * L / 2))^2;$$

```

elseif exist('cosint')==2,
    X_m = 30 * (2 * \text{sinint}(k * L) + \cos(k * L) * (2 * \text{sinint}(k * L) - \text{sinint}(2 * k * L)) - \dots
        \sin(k * L) * (2 * \text{cosint}(k * L) - \text{cosint}(2 * k * L) - \text{cosint}(2 * k * r^2 / L)));
    X_{in} = X_m / (\sin(k * L / 2))^2;
end;
```

% Figure 1

```

z=linspace(-L/2,L/2,500);
k=2*pi;
I=sin(k*(L/2-abs(z)));
axes(handles.axes1)
plot(z,abs(I))
set(handles.axes1,'XMinorTick','on')
xlabel('z^{\prime}/\lambda','fontsize',10)
ylabel('Normalized current distribution','fontsize',10)
```

% Figure 2

```

T=T';
EdB=EdB';
EdB=[EdB fliplr(EdB)];
T=[T T+180];
```

```

axes(handles.axes2)
polar_dB(T,EdB,-60,0,4)
set(handles.axes2,'XMinorTick','on')
title('Elevation plane normalized amplitude pattern (dB)','fontsize',10)

```

% Figure 3

```

theta=linspace(0,2*pi,300);
Eth=(cos(k*L/2*cos(theta))-cos(k*L/2))./sin(theta);
Dth=4*pi*120*pi/(8*pi^2)*Eth.^2/PRAD;
Dth_db=10*log10(Dth);
Dth_db(Dth_db<=-60)=-60;
axes(handles.axes3)
polar_dB(theta*180/pi,Dth_db,-60,max(Dth_db),4)
set(handles.axes3,'XMinorTick','on')
title('Elevation plane directivity pattern (dB)','fontsize',10)

```

% set text

```

set(handles.text5,'String',L)
set(handles.text7,'String',r)
set(handles.text4,'String','Length of dipole in wavelengths =')
set(handles.text6,'String','Radius of dipole in wavelengths =')
set(handles.text9,'String',D)
set(handles.text11,'String',DDB)
set(handles.text8,'String','Directivity (dimensionless) =')
set(handles.text10,'String','Directivity (dB) =')
set(handles.text13,'String',RR)
set(handles.text15,'String',Xm)
set(handles.text12,'String','Radiation resistance based on current maximum
(Ohms) =')
set(handles.text14,'String','Reactance based on current maximum (Ohms) =')
set(handles.text16,'String','Input resistance (Ohms) =')

```

```

set(handles.text20,'String','Input reactance (Ohms) =')
set(handles.text22,'String','...NOTE...')
set(handles.text23,'String','The normalized elevation pattern is stored')
set(handles.text24,'String','in an output file called .....ElevPat.dat')

if(abs(sin(A)) < TOL)
    set(handles.text17,'String','INFINITY')
    set(handles.text21,'String','INFINITY')
else
    set(handles.text17,'String',RIN)
    set(handles.text21,'String',Xin)
    set(handles.text18,'String','Input reactance based on current maximum (Ohms) =')
    set(handles.text19,'String',Xm)
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(caldipole);
    a3

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(caldipole);
    pate2

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(caldipole);
    caldipole

```

```
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(caldipole)
```

## 2. โค้ดโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

```
function varargout = micros1(varargin)

% MICROS1 M-file for micros1.fig
%   MICROS1, by itself, creates a new MICROS1 or raises the existing
%   H = MICROS1 returns the handle to a new MICROS1 or the handle to
%   the existing singleton*.
%   MICROS1('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in MICROS1.M with the given input arguments.
%   MICROS1('Property','Value',...) creates a new MICROS1 or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before micros1_OpeningFunction gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to micros1_OpeningFcn via varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help micros1
% Last Modified by GUIDE v2.5 08-Feb-2010 04:02:42
% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @micros1_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @micros1_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
```

```

        'gui_Callback', []);
    if nargin && ischar(varargin{1})
        gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
    end
    if nargin
        [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    else
        gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    end

% --- Executes just before micros1 is made visible.
    function micros1_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
        handles.output = hObject;

% Update handles structure
        guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.

    function varargout = micros1_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
        varargout{1} = handles.output;

    function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

    function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    freq=str2double(get(handles.edit1,'string'));
    er=str2double(get(handles.edit2,'string'));
    h=str2double(get(handles.edit3,'string'));
    Zin=str2double(get(handles.edit4,'string'));

```

```
% Compute W, ereff, Leff, L (in cm)
```

```
W=30.0/(2.0*freq)*sqrt(2.0/(er+1.0));
ereff=(er+1.0)/2.0+(er-1)/(2.0*sqrt(1.0+12.0*h/W));
dl=0.412*h*((ereff+0.3)*(W/h+0.264))/((ereff-0.258)*(W/h+0.8));

lambda_o=30.0/freq;
lambda=30.0/(freq*sqrt(ereff));
Leff=30.0/(2.0*freq*sqrt(ereff));
L=Leff-2.0*dl;

ko=2.0*pi/lambda_o;
Emax=sinc(h*ko/2.0/pi);
phi=0:360; phir=phi.*pi./180; [Ethval,Eth]=E_th(phir,h,ko,Leff,Emax);
th=0:180; thr=th.*pi./180.0; [Ephval,Eph1]=E_ph(thr,h,ko,W,Emax);
Eph(1:91)=Eph1(91:181); Eph(91:270)=Eph1(181); Eph(271:361)=Eph1(1:91);
```

```
% Output files
```

```
fid_e=fopen('Epl-Micr_m.dat','wt');
fid_h=fopen('Hpl-Micr_m.dat','wt');
fprintf(fid_e,'# E-PLANE RADIATION PATTERN\n');
fprintf(fid_e,'# -----\n#\n');
fprintf(fid_h,'# H-PLANE RADIATION PATTERN\n');
fprintf(fid_h,'# NOTE: THIS PATTERN IS ROTATED CCW BY 90 DEGREES\n');
fprintf(fid_h,'# -----\n#\n');
Epl=[phi;Eth];
fprintf(fid_e,' %7.4f\t%7.4f\n',Epl);
fclose(fid_e);
Hpl=[[0:90 270:360];[Eph(1:91) Eph(271:361)]];
fprintf(fid_h,' %7.4f\t%7.4f\n',Hpl);
fclose(fid_h);
```



% Figure 1

```

Etheta=[Eth(271:361),Eth(2:91)];
xs=[0 20 40 60 80 90 100 120 140 160 180];
xsl=[270 290 310 330 350 0 10 30 50 70 90];
hli1=plot(Etheta,'b-');
    set(gca,'Xtick',xs);
    set(gca,'Xticklabel',xsl);
    set(gca,'position',[145.6 26.76923076923077 60.2 17.461538461538463]);
h1=gca;
h2=copyobj(h1,gcf);
xlim([0 180]);ylim([-60 0]);
    set(h1,'xcolor',[0 0 1]);
    set(hli1,'erasemode','xor');
hx=xlabel('\phi (degrees)','fontsize',12);
    axes(h2);
    hold on;
hli2=plot(Eph1,'r-');
axis([0 180 -60 0]);
    set(h2,'axislocation','top','xcolor',[1 0 0]);
legend([hli1 hli2],{'E_{\phi} (E-plane)','E_{\phi} (H-plane)'},4);
xlabel('\theta (degrees)','fontsize',12);
    set([hli1 hli2],'linewidth',2);
    set(hx,'erasemode','xor');
    axes(handles.axes1)
ylabel('Radiation patterns (in dB)','fontsize',4);
    set(handles.axes1,'XMinorTick','on')

```

% Figure 2

```
set(gca,'position',[146.0 4.6923076923076925 60.2 16.461538461538463]);
hp1=semipolar_micror(phir,Eth,-60,0,4,'-', 'b'); hold on;
hp2=semipolar_micror(phi*pi/180,Eph,-60,0,4,'-', 'r');
hle=legend([hp1 hp2],{'E_{\phi} (E-plane)', 'E_{\phi} (H-plane)'};0);
title('E- and H-plane Patterns of Rectangular Microstrip Antenna','fontsize',[11]);
```

```
set(handles.axes2,'XMinorTick','on')
```

```
an=phi(Eth>-3);
```

```
an(an>90)=[];
```

```
EHPBW=2*abs(max(an));
```

```
HHPBW=2*abs(90-min(th(Eph1>-3)));
```

% Directivity

```
[D,DdB]=dir_rect(W,h,Leff,L,ko);
```

% Input Impedance at Y=0 and Y=Yo

```
[G1,G12]=sintegr(W,L,ko);
```

```
Rin0P=(2.*(G1+G12))^-1;
```

```
Rin0M=(2.*(G1-G12))^-1;
```

```
YP=acos(sqrt(Zin/Rin0P))*L/pi;
```

```
YM=acos(sqrt(Zin/Rin0M))*L/pi;
```

```
set(handles.text12,'string',W);
```

```
set(handles.text14,'string',Leff);
```

```
set(handles.text16,'string',L);
```

```
set(handles.text18,'string',EHPBW);
```

```
set(handles.text20,'string',HHPBW);
```

```
set(handles.text22,'string',D);
```

```
set(handles.text24,'string',DdB);
```

## % Subfunctions

```

function [Ethval,Eth]=E_th(phir,h,ko,Leff,Emax)
    ARG=cos(phir).*h.*ko./2;
    Ethval=(sinc(ARG./pi).*cos(sin(phir).*ko*Leff./2))./Emax;
    Eth=20*log10(abs(Ethval));
    Eth(phir>pi/2&phir<3*pi/2)=-60;
    Eth(Eth<=-60)=-60;

function [Ephval,Eph1]=E_ph(thr,h,ko,W,Emax)
    ARG1=sin(thr).*h.*ko./2;
    ARG2=cos(thr).*W.*ko./2;
    Ephval=sin(thr).*sinc(ARG1./pi).*sinc(ARG2./pi)./Emax;
    Eph1=20.0*log10(abs(Ephval));
    Eph1(Eph1<=-60)=-60;

function [D,DdB]=dir_rect(W,h,Leff,L,ko)
    th=0:180; phi=[0:90 270:360];
    [t,p]=meshgrid(th.*pi/180,phi.*pi/180);
    X=ko*h/2*sin(t).*cos(p);
    Z=ko*W/2*cos(t);
    Et=sin(t).*sinc(X/pi).*sinc(Z/pi).*cos(ko*Leff/2*sin(t).*sin(p));
    U=Et.^2;
    dt=(th(2)-th(1))*pi/180;
    dp=(phi(2)-phi(1))*pi/180;
    Prad=sum(sum(U.*sin(t)))*dt*dp;
    D=4.*pi.*max(max(U))./Prad;
    DdB=10.*log10(D);

```

```

function [G1,G12]=sintegr(W,L,ko)
    th=0:1:180; t=th.*pi/180;
    ARG=cos(t).*(ko*W/2);
    res1=sum(sinc(ARG./pi).^2.*sin(t).^2.*sin(t).*((pi/180)*(ko*W/2)^2));
    res12=sum(sinc(ARG./pi).^2.*sin(t).^2.*besselj(0,sin(t).*(ko*L)).*sin(t).*((pi/180)*(ko*
        W/2)^2));
    G1=res1./(120*pi^2); G12=res12./(120*pi^2);

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.

```

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(micros1);
    b4

```

% --- Executes on button press in pushbutton4.

```

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(micros1);
    pate2

```

% --- Executes on button press in pushbutton7.

```

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(micros1);
    micros1

```

% --- Executes on button press in pushbutton8.

```

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
    close(micros1)
    circ

```

```

function varargout = LooP_antenna(varargin)

```

```

    gui_Singleton = 1;

```

```

    gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...

```

```

        'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
        'gui_OpeningFcn', @Loop_antenna_OpeningFcn, ...
        'gui_OutputFcn', @Loop_antenna_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
    if nargin && ischar(varargin{1})
        gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
    end

    if nargin
        [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    else
        gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    end

% End initialization code - DO NOT EDIT
    function Loop_antenna_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% Choose default command line output for Loop_antenna
        handles.output = hObject;

% Update handles structure
        guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
    function varargout = Loop_antenna_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% Get default command line output from handles structure
        varargout{1} = handles.output;

```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% See ISPC and COMPUTER.
    if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
        get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject,'BackgroundColor','white');
    end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    A=str2double(get(handles.edit1,'string'));
    if A==0
        fdiag('The input is wrong!!!');
        return;
    end

    PI = 4.0*atan(1.0);
    E = 120.0*PI;
    THETA = PI/180.0;
    UMAX = 0.0;
    PRAD = 0.0;
    TOL = 1.0E-5;

    I = 1;
    while(I <= 180)
        XI = I*PI/180.0;
        X = 2.0*PI*A*sin(XI);
        if(abs(X) < TOL)
            F = 0.0;
        else

```

```

    F = besselj(1,X);
end
U = A^2*(2.0*PI)^2/8.0*E*F^2;
if(U > UMAX)
    UMAX = U;
end
UA = U*sin(XI)*THETA*2*PI;
PRAD = PRAD+UA;
I = I+1;
end
D = (4.0*PI*UMAX)/PRAD;
DDB = 10.0*log10(D);
RR = 2.0*PRAD;

fid = fopen('ElevPat.dat','w');
fprintf(fid,'\tLoop\n\tTheta\t\tH (dB)\n');
fprintf(fid,'\t-----\t\t-----\n');
T = zeros(180,1);
HT = zeros(180,1);
HdB = zeros(180,1);

x = 1;
while(x<=180)
    T(x) = x-0.99;
    Y = 2*PI*A*sin(T(x)*THETA);
    HT(x) = besselj(1,Y);
    x = x+1;
end

```

```

HT = abs(HT);
HTmax = max(HT);
HdB = 20*log10(abs(HT)/HTmax);

x = 1;
while(x<=180)
    fprintf(fid,'\n %5.0f %12.4f',T(x),HdB(x));
    x = x+1;
end

fclose(fid);

x=linspace(0,4*pi*A,500);
dx=x(2)-x(1);
den=sum(besselj(2,x)*dx);
theta=linspace(0,pi,300);

Dth=4*pi*A/den*(besselj(1,2*pi*A*sin(theta))).^2;
Dth(1)=0;
Dth_db=10*log10(Dth);

T=T'; HdB=HdB';

T=[T T+180];
Hdb=[HdB fliplr(HdB)];

% Figure 1
% *****

polar_db(T,-abs(Hdb),-60,max(Hdb),4);
axes(handles.axes1)
title('Elevation plane normalized amplitude pattern (dB)','fontsize',12);

```



```
set(handles.axes1,'XMinorTick','on')
```

% Figure 2

```
polar_dB([theta theta+pi]*180/pi,[Dth_db flipplr(Dth_db)],-60,max(Dth_db),4);
axes(handles.axes2)
title('Elevation plane directivity pattern (dB)','fontsize',12);
set(handles.axes2,'XMinorTick','on')
set(handles.text5,'String',D);
set(handles.text6,'String',DDB)
set(handles.text7,'String',RR)
```

% --- Executes on button press in pushbutton2.

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```
close(Loop_antenna);
```

```
c6
```

% --- Executes on button press in pushbutton3.

```
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```
close(Loop_antenna);
```

```
pate2
```

% --- Executes on button press in pushbutton5.

```
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```
close(Loop_antenna);
```

```
Loop_antenna
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton6.  
  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)  
  
close(Loop_antenna)
```



## ประวัติผู้เขียน



นางสาวยุวดี กริชาธร เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 28 มีนาคม 2530  
ภูมิลำเนาที่ 187 หมู่ 13 ตำบลท่าไม้รวก อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี  
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหนองชุมแสงวิทยา  
จังหวัดเพชรบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา  
วิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
สุรนารี



นายเจษฎา มณฑาสวรรณ เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 28 ธันวาคม พ.ศ.  
2530 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 135/1 หมู่ 9 ตำบลชุมพวง อำเภอชุมพวง จังหวัด  
นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียน ชุมพวงศึกษา  
จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ .ศ. 2549 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี



นายเทพประทาน มุ่งนคร เกิดเมื่อวันที่ 5 มิถุนายน 2528  
ภูมิลำเนาอยู่ที่ 406 หมู่ 25 ตำบลหนองแสง อำเภอวาปีปทุม จังหวัด  
มหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนวาปีปทุม  
อำเภอวาปีปทุม จังหวัดมหาสารคาม เมื่อปี พ.ศ. 2547 ปัจจุบันเป็น  
นักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี