

สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะ
ทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ

TRAPEZOIDAL DUAL LOOP ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY
IDENTIFICATION (RFID) SYSTEM AT LOW FREQUENCY

ชวาลธวัช มั่นทรัพย์
CHAWANTHAWAT MANSAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-8308-24-3

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะ
ทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ

TRAPEZOIDAL DUAL LOOP ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY
IDENTIFICATION (RFID) SYSTEM AT LOW FREQUENCY



ชวาลธวัช หมั่นทรัพย์

CHAWANTHAWAT MANSAP

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 69056
วัน,เดือน,ปี - 7 ก.พ. 2550

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-8308-24-3

**TRAPEZOIDAL DUAL LOOP ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY
IDENTIFICATION (RFID) SYSTEM AT LOW FREQUENCY**

CHAWANTHAWAT MANSAP

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-8308-24-3

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศปวงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ
ย่านความถี่ต่ำ
Trapezoidal Dual Loop Antenna for Radio Frequency Identification (RFID)
System at Low Frequency

นักศึกษา นายชวาลธวัช หมั่นทรัพย์

รหัสประจำตัว 47061037

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.คณัย ต.รุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	
รศ.ดร.จเร	สุรวัดณ์ปัญญา	
ผศ.ดร.พิเชฐ	ม่วงนวล	
ผศ.ดร.คณัย	ต.รุ่งเรือง	
ผศ.ดร.ชวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 9 ตุลาคม 2549 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่...../.....เดือน.....พ.ศ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ
นักศึกษา	นายชวาลธวัช หมั่นทรัพย์
รหัสนักศึกษา	47061037
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ. ดร. คณิศ ต.รุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอสายอากาศบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ย่านความถี่ต่ำ (125 kHz และ 134.2 kHz) ซึ่งสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่นี้โดยทั่วไปจะเป็นสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Loop) โดยที่สายอากาศแบบนี้จะไม่สามารถสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายได้ทุกทิศทางและมีระยะการติดต่อไม่ไกล ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาโครงสร้างของสายอากาศขึ้นใหม่เป็นบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือสามารถติดต่อกับลูกข่ายได้ทุกลักษณะการจัดวาง โดยที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก ซึ่งในการวิเคราะห์ที่ใช้กฎของบีโ-ซาวาท (Biot-Savart Law) และหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC) เพื่อให้ได้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่เหมาะสม จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการออกแบบและประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ

Thesis Title	Trapezoidal Dual Loop Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System at Low Frequency
Student	Mr. Chawanthawat Mansap
Student ID.	47061037
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich
Thesis Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Danai Torrungrueng

ABSTRACT

This thesis proposes the trapezoidal dual loop antenna for radio frequency identification (RFID) system at low frequency band (125 kHz and 134.2 kHz). Typically, the conventional antenna for this system is the rectangular loop. The antenna structure is simple at the expense of limited-direction and shorter-distance communications. The advantage of the proposed antenna is that it can be used for arbitrary orientation. It also possesses the simple structure and low cost. The analysis of the antenna used Biot-Savart Law and the simulation is carried out by using the Numerical Electromagnetic Code (NEC) to determine the suitable parameters. The antenna prototype is fabricated and measured to validate the antenna design and performance in RFID system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ผศ.ดร. คณัย ต.รุ่งเรือง เป็นผู้ให้โอกาสทั้งในด้านการศึกษา เกี่ยวเนื่องอบรมสั่งสอน ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ วุ่นซุม ผู้ซึ่งให้แนวคิดในการวิจัย คำแนะนำในการวิเคราะห์และทดสอบ ขอขอบคุณคุณวีระศักดิ์ คนอยู่ คุณเจียรนัย กลิ่นเลขา ผู้ซึ่งช่วยค้นคว้าข้อมูลการวิจัย การสร้างและทดสอบสายอากาศ ขอขอบคุณบริษัท ไออีเทคโนโลยี สำหรับความช่วยเหลือทั้งอุปกรณ์ในการทดลองรวมทั้งคำปรึกษาและคำแนะนำ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ภายใต้สัญญาเลขที่ 02/2549 ที่สนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่าน และ ขอขอบคุณ คุณนภาพร วิสิษฐพงศ์พันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องเกี่ยวกับบทความ

ขอขอบคุณ คุณมัทธีรา ขำประถม ผู้ซึ่งเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในทุกสิ่ง คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแก่ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้า

ชวาลชวิช หมั่นทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ.....	5
2.1.1 เครื่องลูกข่าย.....	6
2.1.1.1 Passive RFID Tags.....	6
2.1.1.2 Active RFID Tags.....	6
2.1.2 ประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID.....	7
2.1.2.1 เครื่องลูกข่ายแบบจานและเหรียญ (Disk and coin)	7
2.1.2.2 เครื่องลูกข่ายแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)	7
2.1.2.3 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก (Plastic housing)	8
2.1.2.4 เครื่องลูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	8
2.1.2.5 เครื่องลูกข่ายแบบพวงกุญแจ (Key and Key fob)	8
2.1.2.6 เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกา.....	9
2.1.2.7 เครื่องลูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส.....	9
2.1.2.8 เครื่องลูกข่ายแบบ Smart label.....	10
2.1.2.9 เครื่องลูกข่ายแบบขดลวดบนชิป (Coin-on-chip).....	10
2.2.3 เครื่องอ่าน (Reader)	10
2.2 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบุระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ.....	11

สารบัญ(ต่อ)

2.2.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type).....	11
2.2.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX).....	11
2.2.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half duplex (HDX).....	12
2.2.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity).....	12
2.2.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)	13
2.2.4 แหล่งพลังงาน (Power supply)	13
2.2.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency range)	13
2.3 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID.....	14
2.3.1 ความถี่ใช้งาน.....	14
2.3.2 ระยะทำการ.....	15
2.3.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย.....	15
2.3.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล.....	15
2.3.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์.....	15
2.3.4 ขนาดของหน่วยความจำ.....	15
2.4 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive Coupling.....	16
2.4.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย.....	16
2.4.2 การส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมายังเครื่องอ่าน.....	17
2.4.2.1 เทคโนโลยี Load Modulation.....	18
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน.....	18
2.5.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศขดลวด.....	21
2.5.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด.....	25
2.5.2.1 ขนาดและค่าความต้านทานทางต้านไฟกระแสดตรง.....	25
2.5.2.2 ค่าความต้านทานทางต้านไฟกระแสดลับของลวด.....	26
2.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด.....	27
2.5.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด.....	28
2.5.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 1 ชั้น.....	28
2.5.3.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบลูปวงกลมหลายชั้น.....	29
2.5.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดลูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	30
2.6 รูปแบบของสายอากาศขดลวด.....	31

สารบัญ(ต่อ)

2.6.1	สายอากาศขดลวดของเครื่องดูข่าย.....	31
2.6.2	สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน.....	31
2.7	วงจรรีโซแนนซ์ ค่าประสิทธิภาพ Q และแบนด์วิดท์.....	32
2.7.1	วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน.....	33
2.7.2	วงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	35
2.7.3	ค่าประสิทธิภาพ (Q) และแบนด์วิดท์.....	36
2.7.3.1	ข้อจำกัดของค่าประสิทธิภาพ.....	38
2.7.3.2	วิธีการจูน.....	38
2.8	ระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ.....	40
2.9	ทิศทางการแผ่แม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวดต่อเป็น 2 เกตประตู่.....	41
2.9.1	สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตู่ต่อแบบ In phase.....	42
2.9.2	สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตู่ต่อแบบ Out of phase.....	42
2.10	กฎของ Biot-Savart.....	43
2.11	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	44
2.12	บทสรุป.....	50
บทที่ 3	การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์.....	51
3.1	โครงสร้างของสายอากาศ.....	51
3.2	การวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู.....	52
3.2.1	การวิเคราะห์กรณีที่มีมุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	52
3.2.2	การวิเคราะห์กรณีที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	62
3.3	บทสรุป.....	70
บทที่ 4	การจำลองผลสายอากาศ.....	72
4.1	การจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสม.....	72
4.2	บทสรุป.....	81
บทที่ 5	การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ.....	82
5.1	การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก.....	82

สารบัญ(ต่อ)

5.1.1 การทดสอบสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	83
5.1.2 การทดสอบสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา.....	84
5.1.3 การทดสอบสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา.....	86
5.2 การทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวและเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร.....	88
5.3 การทดสอบการใช้งานจริงของสายอากาศ.....	94
5.4 บทสรุป.....	96
บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม.....	97
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	98
เอกสารอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	126

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวด.....	26
5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศแต่ละแบบ.....	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Passive RFID Tags.....	6
2.2 Active RFID Tags.....	7
2.3 เครื่องลูกข่ายแบบจานและเหรียญ.....	7
2.4 เครื่องลูกข่ายแบบกระดาษแก้ว.....	7
2.5 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก.....	8
2.6 เครื่องลูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	8
2.7 เครื่องลูกข่ายแบบพวงกุญแจ.....	9
2.8 เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกา.....	9
2.9 เครื่องลูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส.....	10
2.10 เครื่องลูกข่ายแบบ Smart label.....	10
2.11 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน.....	11
2.12 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex.....	12
2.13 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย เป็นการรับพลังงาน ไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน.....	16
2.14 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) ที่ลวดตัวนำ.....	20
2.15 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) เข้าลูป.....	20
2.16 การลดลงของค่าสนามแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r	21
2.17 พื้นฐาน โครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านและสายอากาศเครื่องลูกข่ายใน ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ.....	22
2.18 การปรับทิศทางของสายอากาศของเครื่องลูกข่ายให้เหมาะสม.....	23
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน.....	24
2.20 รูปของขดลวด 1 ชั้น.....	29
2.21 สายอากาศขดลวดลูปวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใดๆ.....	30
2.22 สายอากาศขดลวดแบบลูปสี่เหลี่ยมจตุรัสหลายชั้น.....	30
2.23 หลากหลายรูปแบบของสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย.....	31
2.24 สายอากาศลูปทรานฟอร์มเมอร์ของเครื่องอ่าน.....	32
2.25 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	33
2.26 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม.....	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 ค่าประสิทธิภาพกับรูปแบบการมอดูเลต.....	37
2.28 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์.....	39
2.29 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์.....	39
2.30 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้.....	41
2.31 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล.....	41
2.32 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูบซดลวด 2 เกตประตูดอแบบ In phase.....	42
2.33 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูบซดลวด 2 เกตต่อแบบ Out of phase.....	42
2.34 การคำนวณกฎของ Biot-Savart.....	43
2.35 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	44
2.36 การคำนวณกรณีที่ 1.....	44
2.37 การคำนวณกรณีที่ 2.....	47
2.38 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart.....	50
2.39 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC.....	50
3.1 โครงสร้างสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู.....	51
3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	52
3.3 ความสัมพันธ์ของระยะ δ ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	53
3.4 การคำนวณกรณีที่ 1 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	53
3.5 การคำนวณกรณีที่ 2 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	54
3.6 การคำนวณกรณีที่ 3 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	55
3.7 การคำนวณกรณีที่ 4 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง.....	56
3.8 แกนหมุน y	57
3.9 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m	59
3.10 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	59
3.11 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m	59
3.12 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	60
3.14 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	60
3.15 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	61
3.16 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	61
3.17 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	62
3.18 ความสัมพันธ์ของระยะ δ ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	62
3.19 การคำนวณในกรณีที่ 1 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	63
3.20 การคำนวณในกรณีที่ 2 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	64
3.21 การคำนวณในกรณีที่ 3 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	65
3.22 การคำนวณในกรณีที่ 4 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง.....	66
3.23 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	68
3.24 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	68
3.25 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	68
3.26 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	69
3.27 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	69
3.28 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m.....	69
3.29 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	70
4.1 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดวางแบบประตูดินผ่าน.....	72
4.2 การจัดวางแบบประตูดินผ่าน โดยมองจากด้านข้าง.....	73
4.3 การแบ่งระยะตามแนว x และ z ออกเป็นส่วนย่อย.....	73
4.4 การพิจารณาเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร.....	74
4.5 การหาค่าลู่เข้าในการแบ่งส่วนย่อยตามแกน x	75
4.6 การหาค่าลู่เข้าในการแบ่งจำนวนเส้นตามแกน z	76
4.7 การหาค่าลู่เข้าในการแบ่งจำนวนพื้นผิวทั้งหมดตามแกน y	76
4.8 เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร กรณีกระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกัน.....	77
4.9 เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร กรณีกระแสสายอากาศทั้งสองต่างเฟสกัน 180 องศา.....	78
4.10 ความเข้มของสนามแม่เหล็กรวมระหว่างช่องทางเดิน.....	79
4.11 การพิจารณามุมยกและมุมกวาดเพื่อหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร.....	80
4.12 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร รอบๆตัวสายอากาศ.....	81
5.1 ขดลวดวงกลมที่ใช้ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก.....	82
5.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	83
5.3 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	84
5.4 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศ บ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้โปรแกรม NEC.....	84
5.5 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา.....	85
5.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก ของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	85
5.7 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก ของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	85
5.8 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	86
5.9 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศ ของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา.....	87
5.11 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศ บ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	87
5.12 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรง สี่เหลี่ยมคางหมูโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m.....	87
5.13 สายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จัดเฟสกระแสดสายอากาศตรงกัน.....	88
5.14 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองขุดมีเฟสตรงกัน.....	89
5.15 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองขุดมีเฟสตรงกัน.....	89
5.16 สายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จัดเฟสกระแสดต่างกัน 180 องศา.....	89
5.17 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองขุดต่างเฟสกัน 180 องศา.....	90
5.18 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองขุดต่างเฟสกัน 180 องศา.....	90
5.19 สายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดเฟสกระแสดตรงกัน.....	90
5.20 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองขุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm.....	91
5.21 การทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองขุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm.....	91
5.22 สายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดเฟสต่างกัน 180 องศา.....	91
5.23 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กรณี สายอากาศทั้งสองขุดต่างเฟสกัน 180 องศา มีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา r เท่ากับ 18 cm.....	92
5.24 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศประจุดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองขุดต่างเฟสกัน 180 องศา มีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา r เท่ากับ 18 cm.....	92
5.25 เครื่องอ่านและลูกข่ายที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ.....	95
5.26 สายอากาศต้นแบบ.....	95
5.27 ระยะห่างไกลสุดที่ลูกข่ายใช้งานได้ทุกแนวแกนหลักและทุกลักษณะการจัดวางได้ดี.....	96
5.28 ระยะห่างไกลสุดที่ลูกข่ายวางตัวอย่างเหมาะสม.....	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีแสดงตัวตนแบบอัตโนมัติหรือที่เรียกเป็นศัพท์ทางวิชาการว่า Automatic Identification หรือ Auto-ID เป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานาน รวมทั้งยังมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นในแวดวงอุตสาหกรรม ระบบคลังสินค้า ร้านค้าปลีก โรงงาน หรือแม้กระทั่งในสายการผลิตของอุตสาหกรรมทั่วไป วัตถุประสงค์หลักของเทคโนโลยี Auto-ID มีขึ้นเพื่อใช้แสดงตัวตนของมนุษย์ สัตว์ สินค้า หรือแม้กระทั่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ตัวอย่างระบบ Auto-ID เช่น ระบบบาร์โค้ด (Barcode) ซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มแถบรหัสขนาดต่างๆ กันติดอยู่ตามสินค้าต่างๆ โดยเฉพาะในกรณีของการซื้อสินค้าตามห้างสรรพสินค้า ที่พนักงานขายจะใช้เครื่องอ่านบาร์โค้ดฉายอ่านรหัสของสินค้าแต่ละชิ้นที่ซื้อ เพื่อรวมราคาสุทธิ และยังส่งข้อมูลไปยังระบบฐานข้อมูลสินค้าคงคลังเพื่อตัดยอดสินค้าออกตามจำนวนที่มีการซื้อออกไป บรรดามาตรฐาน Auto-ID ต่างๆ ที่มีการคิดค้นขึ้นมาล้วนมีความสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการทำธุรกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบันทึกระบบฐานข้อมูลอย่างรวดเร็ว แทนที่จะต้องใช้การนับหรือจดบันทึกโดยมนุษย์ อันอาจมีโอกาที่จะเกิดความผิดพลาดได้อยู่เสมอ เทคโนโลยี Auto-ID อีกประเภทหนึ่งซึ่งเป็นที่คุ้นเคยในการใช้งานประจำวัน ก็คือเทคโนโลยีสมาร์ทการ์ด (Smartcard) ซึ่งอยู่ในรูปของบัตรพลาสติก ภายในบันทึกข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับบริการใช้งานของผู้ถือการ์ดตัวอย่างเช่น แผ่น SIM (Subscriber Identity Module) ที่ใช้บันทึกข้อมูลเกี่ยวกับเลขหมาย และรหัสลับต่างๆ สำหรับใช้ติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นการใช้งานมาตรฐาน Auto-ID ที่ได้รับความแพร่หลายมากที่สุด

มาตรฐานเทคโนโลยี Auto-ID มีอยู่หลายประเภท บางประเภทต้องมีการสัมผัสกับเครื่องอ่าน (Contact Auto-ID) ในขณะที่อีกหลายๆ ประเภทเป็นแบบไม่ต้องมีการสัมผัสกับเครื่องอ่าน (Contactless Auto-ID) ในปัจจุบัน ได้เกิดมาตรฐาน Auto-ID ใหม่ที่ได้รับความนิยมใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ อันเป็นผลมาจากความสะดวกในการใช้งาน รวมถึงศักยภาพในการรองรับข้อมูลและความต้องการใช้งานได้ทุกรูปแบบอีกทั้งยังมีมูลค่าต้นทุนที่ไม่สูงมาก โดยเป็นมาตรฐานสื่อสารแบบไม่สัมผัส ซึ่งช่วยลดปัญหาความไม่เที่ยงตรง และคลาดเคลื่อนในการอ่าน-เขียนข้อมูล เมื่อเทียบกับการใช้งานแบบสัมผัสที่อาจมีการสึกหรอของหน้าสัมผัส มาตรฐานดังกล่าวมีชื่อเรียกว่าระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification : RFID)

เทคโนโลยีระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) มีรูปแบบการทำงานที่คล้ายคลึงกับเทคโนโลยีสมาร์ทการ์ด อยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมภายใน ที่มีการจัดเก็บ

และบันทึกข้อมูลลงบนหน่วยความจำบนแผ่นพลาสติก ซึ่งในกรณีของ RFID แผ่นบันทึกข้อมูลอาจมีรูปแบบแตกต่างกันไป ไม่จำเป็นต้องเป็นแบบบัตรเครดิตเสมอไปและเพื่อความสะดวกในการเรียกขาน จึงขอเรียกแผ่นบันทึกข้อมูลในกรณีของ RFID ว่า “เครื่องลูกข่าย” หรือภาษาอังกฤษว่า Transponder เนื่องจากปรัชญาในการออกแบบมาตรฐาน RFID ที่ต้องการให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน (ซึ่งยังคงหมายถึงเครื่องอ่านและเขียนข้อมูล) เป็นแบบไม่สัมผัสกัน (Contactless) ทำให้ต้องมีการหาทางส่งพลังงานไฟฟ้าไปป้อนให้กับเครื่องลูกข่ายในรูปแบบอื่น จึงเกิดแนวคิดในการกำหนดมาตรฐานทางเทคนิคเพื่อส่งทั้งข้อมูลสัญญาณฐานเวลา และพลังงานไฟฟ้าที่จะไปปรากฏเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรรภายในเครื่องลูกข่าย ไปในรูปของคลื่นวิทยุผ่านตัวนำที่เป็นอากาศ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification : RFID) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการระบุลักษณะของคนหรือวัตถุโดยอัตโนมัติ เป็นวิธีการจำแนกได้ครั้งละจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่โดยทั่วไปเป็นการจัดเก็บตามหมายเลขประจำตัวของวัสดุ บุคคล หรือวัตถุ และในบางครั้งหมายรวมถึงสารสนเทศอื่นๆ ลงไมโครชิปที่ประกอบด้วยสายอากาศ (Antenna หรือสายสัญญาณสำหรับรับส่งคลื่นจากระยะไกล โดยที่ชิปและสายอากาศ รวมเข้าด้วยกันเรียกว่า RFID Transponder หรือ RFID Tag) สายอากาศทำให้ชิปสามารถส่งข้อมูลเฉพาะไปยังเครื่องอ่านได้ เครื่องอ่านจะแปลงคลื่นความถี่วิทยุจากเครื่องลูกข่าย กลายเป็นข้อมูลดิจิทัลผ่านเข้าไปทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ได้ ข้อมูลทางเทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะประกอบด้วย เครื่องลูกข่ายที่เป็นไมโครชิป (Microchip Tag) ซึ่งมีสายอากาศ และเครื่องอ่านที่มีสายอากาศเช่นกัน เครื่องอ่านจะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาและสายอากาศของเครื่องลูกข่ายจะรับและแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นพลังงาน ส่งผ่านไปที่ระบบของเครื่องลูกข่ายเพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับแผงวงจรมิโครชิป จากนั้นเครื่องลูกข่ายจะส่งคลื่นความถี่วิทยุกลับไปยังเครื่องอ่าน และเครื่องอ่านจะแปลงคลื่นที่ได้ใหม่ให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล

ปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะยังไม่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายแต่มีแนวโน้มที่จะขยายมากขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคต เพราะสามารถบรรจุสารสนเทศต่างๆ ลงในระบบของเครื่องลูกข่ายได้ตามที่เราต้องการ เนื่องจากระบบของเครื่องลูกข่าย คือ ไมโครชิปที่มีหน่วยความจำ เช่นเดียวกับหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำการประมวลผลการทำงานได้ตามโปรแกรมคำสั่งที่ผู้ใช้ต้องการได้ การทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นคือ ระบบของเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่านต้องมีการปรับคลื่นความถี่ให้เหมือนกันเพื่อการสื่อสาร เช่นเดียวกับการฟังวิทยุ นั้นจำเป็นจะต้องปรับจูนคลื่นความถี่ให้ตรงกับสถานีที่ต้องการฟัง ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุใช้ได้หลายย่านความถี่ ซึ่งในแต่ละย่านความถี่นั้นก็มีความแตกต่างในเรื่องของความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานแต่ละประเภท [1]-[2]

สายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำ (125 kHz และ 134.2 kHz) โดยทั่วไปมีรูปร่างเป็นบ่วงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular loop) หรือบ่วงวงกลม (Circular loop) [1]-[2] ซึ่งบ่วงลักษณะนี้ใช้งานกับลูกข่ายได้ในบางลักษณะการจัดวาง ซึ่งถ้าลูกข่ายไม่ได้วางตัวในแนวขนานกับระนาบสายอากาศของตัวอ่านข้อมูลจะใช้งานได้ไม่ดีหรือใช้งานไม่ได้เลย [3]-[5] ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับตัวอ่านข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้เครื่องอ่านและลูกข่ายติดต่อกันได้ทุกลักษณะการจัดวางซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในงานทางด้านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนี้สิ่งหนึ่งที่จำเป็นต่อระบบก็คือสายอากาศ รูปแบบของสายอากาศก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมกับการใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งสายอากาศแบบที่เป็นที่นิยมใช้ทั่วไปคือสายอากาศแบบประตูเดินผ่าน (Walk-through) และสายอากาศที่ติดตั้งกับเครื่องอ่านแบบมือถือหรือแบบพกพา สายอากาศแบบประตูเดินออกที่ใช้กันส่วนใหญ่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยบ่วงสองบ่วงและช่องทางเดินผ่านจะอยู่ระหว่างกลางบ่วงทั้งสอง เพราะสายอากาศลักษณะนี้ติดต่อกับลูกข่ายได้ในบางลักษณะการจัดวางเท่านั้น นั่นคือเครื่องลูกข่ายต้องวางตัวอยู่ในแนวขนานกับระนาบของสายอากาศ ถ้าลูกข่ายวางตัวอยู่ในแนวระนาบอื่นจะไม่สามารถใช้งานได้และนี่จึงเป็นปัญหาสำคัญในระบบสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ซึ่งสายอากาศที่ได้นำเสนอมีลักษณะของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อนำบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูจัดวางในลักษณะประตูผ่านเข้าออก ก็จะสามารถใช้งานกับลูกข่ายได้ทุกลักษณะ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำ โดยใช้กฎของ Biot-Savart [6]-[8] วิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กและใช้โปรแกรม NEC (Numerical Electromagnetic Code) [9] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า หาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบต่อไป

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหาและวัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ

บทที่ 2 ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำไม่ว่าจะเป็นลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศตลอดที่นิยมใช้กันทั่วไป และ การ

นำกฎของ Biot-Savart มาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ จากนั้นได้แสดงการวิเคราะห์สายอากาศ บ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุด ต่างๆ โดยการคำนวณกับผลการจำลอง โดยใช้โปรแกรม NEC

บทที่ 3 ในบทนี้ได้อธิบายถึงรูปแบบโครงสร้างสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ สายอากาศและการวิเคราะห์สายอากาศโดยใช้กฎของ Biot-Savart ในการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูนั้น ได้แบ่งการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูออกเป็น 2 แบบ ซึ่งในแต่ละ แบบจะมีการแบ่งการคำนวณย่อยๆไปอีกแบบละ 4 กรณีด้วยกันเพื่อเป็นการง่ายต่อการคำนวณ และ ในขั้นตอนสุดท้ายของแต่ละแบบ ได้นำเอาผลการคำนวณแต่ละกรณีมารวมกันเป็นผลลัพธ์สุดท้าย โดยแสดงในรูปของแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กในและองค์ประกอบทิศทางพร้อมด้วย ความเข้มของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบผลการจำลองจากโปรแกรม NEC

บทที่ 4 ในบทนี้ได้อธิบายถึงการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งหาได้จาก เปรอร์เซ็นต์เชิงเส้น เปรอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวและเปรอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร ผลของเปรอร์เซ็นต์ เชิงปริมาตรมี 2 กรณีคือ กรณีที่สายอากาศทั้งสองซุดมีเฟสตรงกัน และกรณีที่สายอากาศทั้งสองซุด มีเฟสต่างกัน 180 องศา ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนี้สามารถนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อ ทดสอบต่อไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วง แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายอากาศต้นแบบและการประเมินผลการใช้งานเปรียบเทียบกับสายอากาศ บ่วงสี่เหลี่ยมแบบดั้งเดิม

บทที่ 6 สรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางใน การพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่อ่านความถี่ต่ำ [1]-[2] การออกแบบสายอากาศแบบขดลวดที่ใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3]-[5] และการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้กฎของ Biot-Savart [6]-[8] ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้แสดงเปรียบเทียบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC [9]

2.1 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุ ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เพื่อวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็อยู่ตรงการ อ่านข้อมูลจากเครื่องลูกข่าย (Tag) ได้หลายๆ เครื่องลูกข่ายแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในเครื่องลูกข่าย

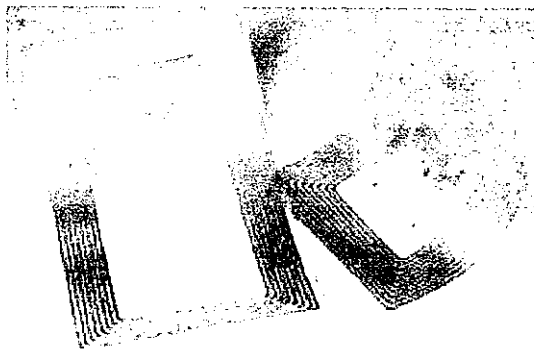
ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือเครื่องลูกข่าย ที่ใช้ติดกับวัตถุต่างๆ ที่เราต้องการ โดยเครื่องลูกข่ายที่ว่าจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือเครื่องสำหรับอ่านหรือเขียน (Reader) ข้อมูลภายในเครื่องลูกข่าย ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน เครื่องลูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็คือเครื่องอ่านบาร์โค้ด (Scanner) โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบรหัสแท่งจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้แสงในการอ่านรหัสแท่งซึ่งจะต้องอ่านรหัสแท่งที่ไม่มีอะไรปกปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ทีละชิ้น ในระยะใกล้ๆ แต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านเครื่องลูกข่ายได้โดยไม่ต้องเห็นเครื่องลูกข่ายหรือเครื่องลูกข่ายนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่น เพียง อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านเครื่องลูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุยังสามารถอ่านได้หลายๆ เครื่องลูกข่ายในเวลาเดียวกัน

2.1.1 เครื่องลูกข่าย

โครงสร้างภายในของเครื่องลูกข่ายจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ(Antenna)สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิพ (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้า โดยทั่วไปตัวเครื่องลูกข่ายอาจอยู่ในชนิดทั้งเป็น กระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคลปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งเครื่องลูกข่าย ที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน ซึ่งจะขอกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

2.1.1.1 Passive RFID Tags

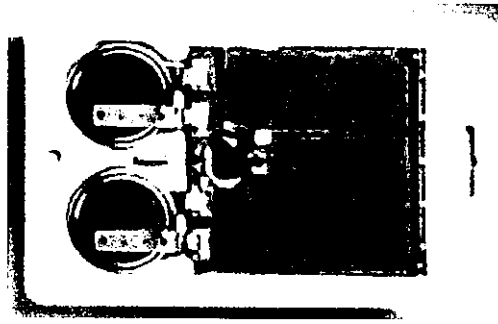
เครื่องลูกข่ายชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ แสดงตามรูปที่ 2.1 เพราะภายในเครื่องลูกข่ายจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่ สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 Passive RFID Tags

2.1.1.2 Active RFID Tags

เครื่องลูกข่ายชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในเครื่องลูกข่ายซึ่งเครื่องลูกข่ายชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกล มีอายุการใช้งานสั้นและมีราคาแพง มักนิยมใช้กับเครื่องอ่านย่านความถี่ UHF หรือ ไมโครเวฟ



รูปที่ 2.2 Active RFID Tags

2.1.2 ประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID

อุปกรณ์เครื่องลูกข่าย RFID ประเภทต่างๆ ที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่างๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของ โครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่าง ประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

2.1.2.1 เครื่องลูกข่ายแบบจานและเหรียญ (Disk and coin)

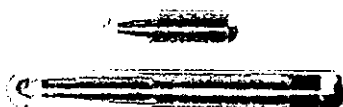
เครื่องลูกข่ายจะถูกบรรจุอยู่ใน โครงสร้างทรงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบ ป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องลูกข่ายชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตร ไปจนถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.3 เครื่องลูกข่ายแบบจานและเหรียญ

2.1.2.2 เครื่องลูกข่ายแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)

เป็นเครื่องลูกข่ายที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.4 เครื่องลูกข่ายแบบกระเปาะแก้ว

2.1.2.3 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก (Plastic housing)

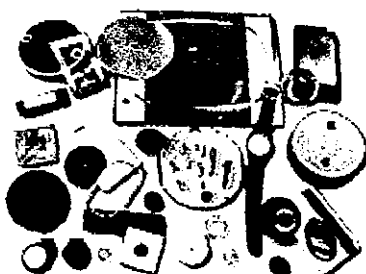
นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic Package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ เครื่องลูกข่ายแบบนี้มีขนาดบาง และสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภท



รูปที่ 2.5 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก

2.1.2.4 เครื่องลูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ

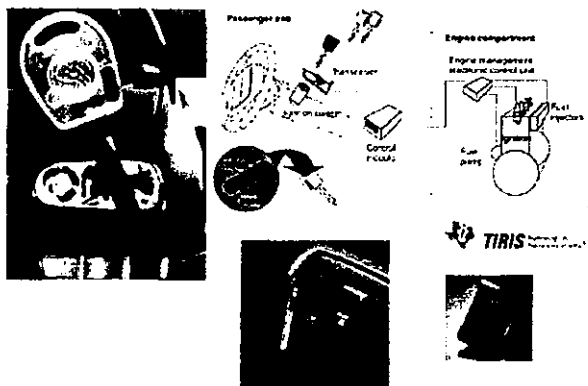
เป็นเครื่องลูกข่าย RFID อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุเครื่องลูกข่ายลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็น โลหะ



รูปที่ 2.6 เครื่องลูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ

2.1.2.5 เครื่องลูกข่ายแบบพวงกุญแจ (Key and Key fob)

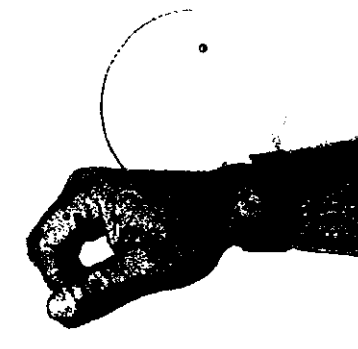
เครื่องลูกข่าย RFID สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล



รูปที่ 2.7 เครื่องลูกข่ายแบบพวงกุญแจ

2.1.2.6 เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกา

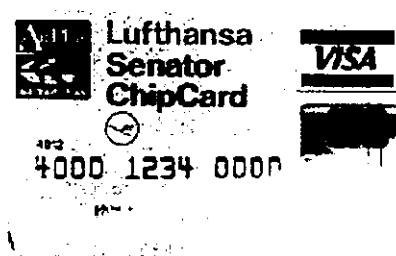
เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2535 โดยบริษัท สัญชาติออสเตรเลียที่มีชื่อว่า Sky-Data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ตู้เล่นสกีสำหรับนักสกีทั้งหลาย



รูปที่ 2.8 เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกา

2.1.2.7 เครื่องลูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส

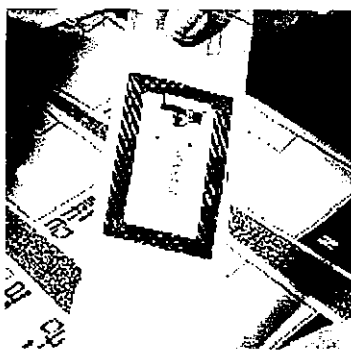
เครื่องลูกข่ายแบบ ID-1 มีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตร โทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณ 85.72 คูณ 54.03 มิลลิเมตร ความหนา 0.76 มิลลิเมตร เป็นเครื่องลูกข่ายที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าเครื่องลูกข่ายแบบอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก



รูปที่ 2.9 เครื่องลูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส

2.1.2.8 เครื่องลูกข่ายแบบ Smart label

เป็นเครื่องลูกข่าย RFID บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบางๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบพอลิพลาสติกความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โคนทั่วไปแถบพอลิเหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึคเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด



รูปที่ 2.10 เครื่องลูกข่ายแบบ Smart label

2.1.2.9 เครื่องลูกข่ายแบบขดลวดบนชิป (Coin-on-chip)

เครื่องลูกข่าย RFID ชนิดนี้มีความแตกต่างจากเครื่องลูกข่ายแบบอื่นๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างเครื่องลูกข่ายกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับเครื่องลูกข่ายแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

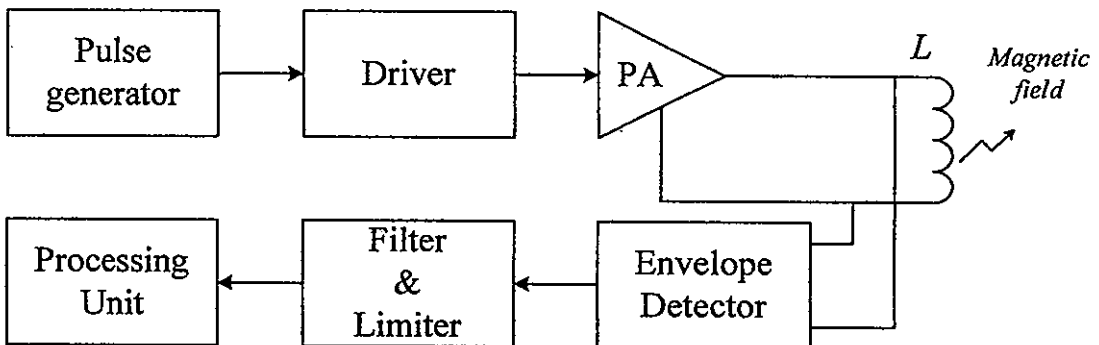
2.2.3 เครื่องอ่าน (Reader)

โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านก็คือ การเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในเครื่องลูกข่ายด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ภายในเครื่องอ่านแสดงดังรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วย เสาอากาศที่ทำจากขด

ลวดทองแดงเพื่อใช้รับส่งสัญญาณ ภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่องอ่านจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ
- ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ
- วงจรจูนสัญญาณ
- หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านมักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือคิดค้นง จนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน

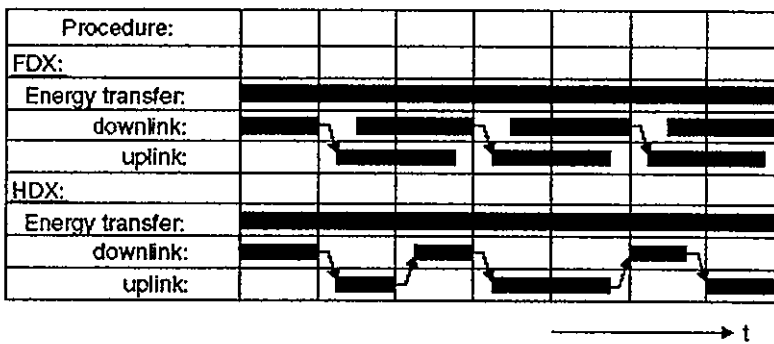
2.2 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.2.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type)

อุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ทั้งเครื่องลูกข่าย (Transponder) หรือเครื่องอ่าน (Reader) จะมีรูปแบบการทำงานอย่างไรอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) / Half Duplex (HDX)

2.2.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX)

เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่เครื่องลูกข่ายส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่าน ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตนเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่าคั้งนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่อง ให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้มอดูเลตสัญญาณแบบ Load Modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องลูกข่าย ได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่าน ไปยังเครื่องลูกข่าย (Downlink) และการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายกับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex [1]

2.2.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับเครื่องลูกข่ายตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่าน ไปยังเครื่องลูกข่าย (Downlink) และการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายกับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย ดังรูปที่ 2.12

2.2.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์เครื่องลูกข่าย RFID จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data capacity) ไล่ขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลายๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างเครื่องลูกข่าย RFID อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit

2.2.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID ตามขีดความสามารถในการ โปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นเครื่องลูกข่ายที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใดๆ ตามที่ได้รับคำสั่งข้างทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นเครื่องลูกข่าย RFID ที่สามารถทำการ โปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของเครื่องลูกข่ายที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

2.2.4 แหล่งพลังงาน (Power supply)

เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้เครื่องลูกข่าย RFID ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของเครื่องลูกข่ายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟ (Passive transponder) ซึ่งเป็นเครื่องลูกข่ายที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอคทีฟ (Active transponder) ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในเครื่องลูกข่ายเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

2.2.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐาน RFID นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่าเครื่องลูกข่ายจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีเครื่องลูกข่ายอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากเครื่องลูกข่ายจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งาน สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบ่งออกได้เป็น 4 ย่าน หลักได้แก่

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency : LF) ต่ำกว่า 150 kHz
- ย่านความถี่สูง (High Frequency : HF) 13.56 MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) 433/868/915 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8 GHz

ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสมสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (LF ระยะอ่านประมาณ 1 เซนติเมตร จนถึง 1 เมตร และ HF ระยะอ่านประมาณ 1 เมตร) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่าน UHF จะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล(UHF ระยะอ่านประมาณ 1-10 เมตร) เช่น ระบบเก็บค่าบริการทางด่วน และในปัจจุบันระบบ RFID กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 เมตร เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด และมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

2.3 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID

2.3.1 ความถี่ใช้งาน

อุปกรณ์ RFID ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz จะใช้รูปแบบส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่อุปกรณ์ RFID ที่มีการสื่อสารโดยใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.45-5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz ถึง 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ RFID ที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่ายและเครื่องอ่านซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ RFID ทำงานที่ความถี่ในย่าน HF น่าจะให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางกว้าง

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายที่ทำงานในย่านไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายๆประการ สิ่งที่ต้องพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ RFID ในย่านความถี่ต่ำก็คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทน ในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.3.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย RFID สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการคือ ตำแหน่งของเครื่องลูกข่ายหรือระยะห่างขั้นต่ำระหว่างเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องกับเครื่องอ่าน ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่ประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องลูกข่าย และความเร็วในการอ่าน/เขียนข้อมูลของเครื่องลูกข่าย

2.3.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

2.3.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันตัวตนเครื่องลูกข่าย RFID และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้นๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

2.3.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

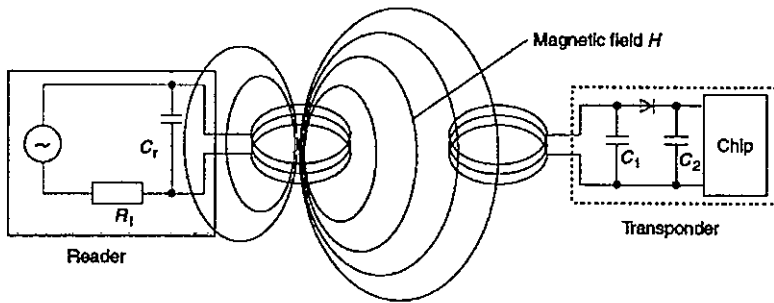
การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1-3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength : E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength : H) ไม่เกิน $16.3/f$ A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power Density : S) ไม่เกิน $10,000/f^2$ mW/cm² โดยคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging Time) 6 นาที ซึ่ง f มีหน่วยเป็น MHz [10] และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร จะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB μ A/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300 [1]

2.3.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของเครื่องลูกข่าย RFID ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้เครื่องลูกข่ายที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้เครื่องลูกข่ายแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือเครื่องลูกข่ายทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครื่องข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

2.4 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive Coupling

เป็นมาตรฐานที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของเครื่องลูกข่าย ประกอบไปด้วยแผงวงจรหรือชิปที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยมีขดลวดพื้นที่กว้างทำหน้าที่เป็น สายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.13 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย เป็นการรับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน [1]

2.4.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย

เนื่องจากการทำงานของเครื่องลูกข่ายนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) คือไม่มีแหล่งพลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับพลังงาน (Energy) มาจากเครื่องอ่าน โดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่าน (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและพลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งพลังงานสนามแม่เหล็กที่กำลังสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถเหนี่ยวนำขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของเครื่องลูกข่ายได้อย่างเหมาะสม ประกอบทั้งความยาวคลื่นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งกระจายออกมาจากเครื่องอ่านนั้นมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน ซึ่งโดยทั่วไปวางห่างกันไม่มากนัก

เทคโนโลยี RFID แบบ Inductive Coupling ส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำเพียง 125-134.2 kHz หรือ 13.56 MHz ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีความยาวคลื่นยาวมากถึง 2,400 เมตร ที่ความถี่ 125-134.2 kHz และ 22.12 เมตร ที่ความถี่ 13.56 MHz จึงไม่มีปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่นที่สั้นเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนหรือถูกกีดทอนจากผนังอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ หากพิจารณาถึงพื้นที่ใช้งาน โดยทั่วไปที่มีได้ไกลหรือกว้างมากนัก

สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะตกกระทบขดลวดสายอากาศของเครื่องลูกข่าย ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดอ่อนๆ ขึ้นบนขดลวด ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำไปเข้ากระบวนการเรกติไฟร์ โดยตัวเก็บประจุและไดโอดเพื่อกรองให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนให้กับอุปกรณ์ชิป การออกแบบอยู่ที่การเลือกค่าของตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งจะต้องมีค่าสัมพันธ์กับค่าความ

เหนี่ยวนำของขดลวดสายอากาศ เพื่อให้สามารถกำหนดค่าความถี่กำทอน (Resonant frequency) ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่าน เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องลูกข่าย เปรียบเทียบการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสอง ในรูปที่ 2.13 จะเทียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวด 2 ชุด แต่ขดลวดทั้งสองมิได้พันอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน โดยใช้อากาศซึ่งมีการลดทอนมากกว่าแกนแม่เหล็กมากกว่า

ดังนั้นในการออกแบบระบบ Inductive Coupling ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายทอดพลังงานให้มากที่สุดจึงต้องเน้นไปที่ย่านความถี่ที่เหมาะสมต่อการส่งกระจายพลังงาน จำนวนรอบของขดลวดที่เครื่องอ่าน และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่เครื่องลูกข่าย มุมติดตั้ง และระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย

เมื่อความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารมีค่าสูงมากขึ้น จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องใช้สำหรับขดลวดสายอากาศของเครื่องลูกข่ายจะมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงใช้จำนวนรอบในการพันลดลงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น หากใช้งานที่ความถี่ย่าน 125 kHz จะต้องมีการพันขดลวดสายอากาศที่เครื่องลูกข่ายในช่วง 100-1,000 รอบ แต่หากเพิ่มความถี่ในการใช้งานเป็น 13.56 MHz ก็จะสามารถลดจำนวนรอบของขดลวดจะเหลือเพียง 3-10 รอบเท่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์เครื่องลูกข่ายลงได้ แต่ในขณะที่เดียวกันก็จะส่งผลให้แรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามเหล็กในย่านความถี่สูงลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ทำให้จำกัดระยะทางในการใช้งานมากขึ้น การเลือกใช้อุปกรณ์ Inductive Coupling จึงต้องพิจารณาทั้งขนาดของเครื่องลูกข่ายและระยะทางที่ต้องการใช้งานตรวจจับเป็นสำคัญ เพื่อใช้กำหนดเลือกย่านความถี่ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ใช้งาน

สิ่งที่พึงให้ความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบ RFID แบบ Inductive Coupling ก็คือ พฤติกรรมการกินกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ชิปที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องลูกข่าย เนื่องจากค่อนข้างมีความหลากหลายและสัมพันธ์กับรูปแบบในการนำไปประยุกต์ใช้งาน การเลือกค่าความถี่พื้นฐานในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่ายระยะทางพื้นที่ใช้งาน และขนาดของอุปกรณ์อื่นเนื่องมาจากจำนวนรอบของขดลวดสายอากาศ จึงจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับประเภทของการใช้งานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.4.2 การส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมายังเครื่องอ่าน

มาตรฐาน RFID แบบ Inductive Coupling กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมายังเครื่องอ่าน หรือ Uplink Communication โดยใช้เทคโนโลยีที่เป็นการส่งกระจายคลื่นความถี่วิทยุคือ Load Modulation จะมีหลักการทำงานดังนี้

2.4.2.1 เทคโนโลยี Load Modulation

พฤติกรรมในการส่งสัญญาณระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านและขดลวดของเครื่องลูกข่ายมีแบบจำลองที่ไม่ต่างจากการทำงานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแต่อย่างใด หากแต่เพียงตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานเป็นอากาศไม่ใช่โลหะคั่งเช่นที่พบเห็นในหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป แต่การใช้อากาศเป็นตัวกลางถ่ายทอดสัญญาณระหว่างขดลวดทั้งสองนั้น จะทำได้ก็ต่อเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายห่างกันไม่เกิน 0.16 เท่าของความยาวคลื่น (0.16λ) ซึ่งหากคิดกรณีที่ใช้ความถี่ในย่าน 125 kHz ที่มีความยาวคลื่น $2,400$ เมตร ก็จะหมายความว่า จะวางเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่านห่างกันได้ในระยะทางไม่เกิน 0.16 คูณ $2,400 = 384$ เมตร [1]

หากมีการนำเครื่องลูกข่ายซึ่งมีคุณสมบัติของขดลวดและตัวเก็บประจุ ตรงกันกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องอ่านมาใช้ในพื้นที่ตรวจสอบที่มีการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กจากเครื่องอ่าน เครื่องลูกข่ายย่อมจะดึงพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน ซึ่งหากพิจารณาในแง่ของวงจรไฟฟ้าแล้ว เครื่องอ่านจะมองเห็นเครื่องลูกข่ายเป็น โหลดวงจรตัวหนึ่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_T ต่อพ่วงอยู่กับขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่าน การเปลี่ยนแปลงใดๆ ไม่ว่าจะเป็นการส่งหรือหยุดส่งพลังงานจากเครื่องอ่าน ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ Z_T ที่เครื่องอ่านอย่างแน่นอน เนื่องจากในแง่ของวงจรเรโซแนนซ์ ที่เกิดจากขดลวด และตัวเก็บประจุ บนเครื่องลูกข่ายย่อมมีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ตกกระทบ และไม่มีการจ่ายพลังงานก็เทียบเท่ากับความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์เสมือน Z_T นี้ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่าน โดยปริยาย ซึ่งเป็นสัญญาณแจ้งให้เครื่องอ่านทราบว่ากำลังจะมีการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมา เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Load modulation ส่วนจะประยุกต์ใช้งานส่งข้อมูลแบบ Half duplex หรือ Full Duplex นั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบวงจรตรวจจับและถอดรหัสสัญญาณซึ่งเป็นเรื่องที่ต้องรายละเอียดไปในการออกแบบ

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน

ในการพัฒนาสายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุของเครื่องอ่าน มีเหตุผลหลักอยู่ 2 ประการคือ

- เพื่อต้องการส่งความถี่วิทยุ (คลื่นพาร์) ให้เป็นกำลังงานของเครื่องลูกข่าย
- เพื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุ (สัญญาณข้อมูล) จากเครื่องลูกข่าย

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ สามารถที่จะแพร่กระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพในมิติเชิงเส้นของสายอากาศ ซึ่งเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ในการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ต่ำ ($100\text{kHz}-500\text{kHz}$) ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าประมาณ 2-3 กิโลเมตร (สัญญาณความถี่ 125 kHz จะได้ $\lambda = 2.4$ km) เนื่องจากค่าของความยาว

คลื่นมีค่ายาวมาก ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะสร้างสายอากาศได้ในระยะที่จำกัดตามจริง แต่มีทางเลือกหนึ่งเป็นสายอากาศขดลวดแบบรูปขนาดเล็กลง ซึ่งจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน (125 หรือ 134.2 kHz) สายอากาศชนิดนี้จะใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้ (near field magnetic) ในการเชื่อมต่อ การเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศขดลวดตัวส่งและตัวรับ

การทำให้เกิดสนามโดยสายอากาศแบบรูปขนาดเล็กลงนั้นจะไม่แพร่กระจายคลื่น แต่จะทำให้คลื่นอ่อนกำลังลงมากกว่า ความเข้มสนามถูกลดลงด้วย r^{-3} (เมื่อ r = ระยะห่างจากสายอากาศ) ในสนามระยะใกล้ (r^{-3}) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวจำกัดระยะการอ่านในการใช้งานของระบบระบุ ลักษณะทางคลื่นวิทยุ [1]

เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านขดลวด (สายอากาศ) เป็นการเหนี่ยวนำแรงดันให้ตกคร่อมด้านปลายสุดของขดลวด แรงดันนี้จะใช้เพื่อกระตุ้นเครื่องลูกข่ายแบบพาสซีฟ ดังนั้นสายอากาศขดลวดส่วนมากจะถูกออกแบบให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันได้สูงสุด

กฎของแอมแปร์ ได้กล่าวไว้ว่า การไหลของกระแสในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ รูปที่ 2.14 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสส่วนหนึ่ง ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในตัวนำ (ลวด) ที่มีความยาวจำกัด [3] [6] คัดได้จากสมการ

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2.1)$$

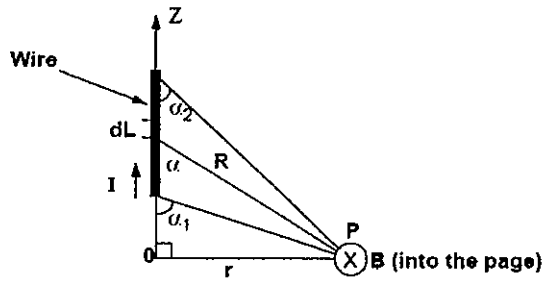
โดยที่ I = กระแส

r = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของลวด

μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของ Free space มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)

ในกรณีที่ลวดมีความยาวอนันต์ที่ $\alpha_1 = 180^\circ$ และ $\alpha_2 = 0^\circ$ จากสมการที่ 2.1 สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.14 การคำนวณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) ที่ลวดตัวนำ [3]

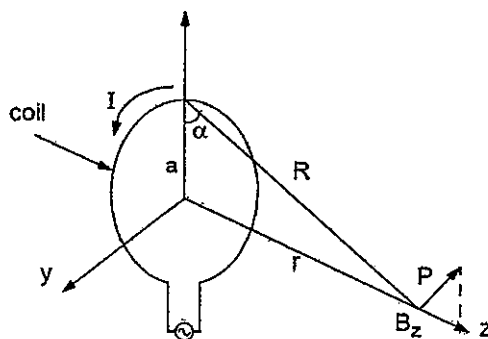
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดจากสายอากาศขดลวดแบบรูปวงกลม จำนวน N รอบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 จะได้สมการดังนี้ [3]

$$B_z = \frac{\mu_0 I N a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \quad (2.3)$$

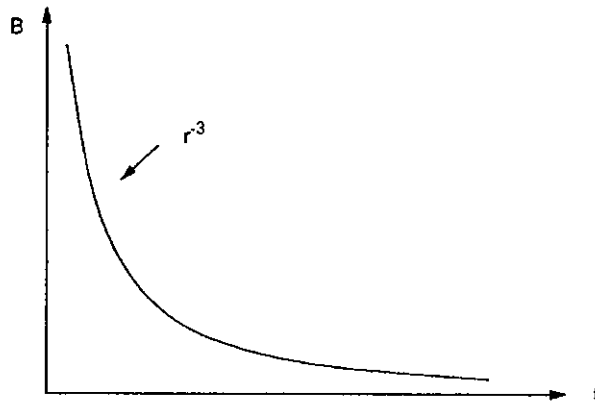
$$B_z = \frac{\mu_0 I N a^2}{2} \left(\frac{1}{r^3} \right) \quad ; r^2 \gg a^2 \quad (2.4)$$

โดยที่ $a =$ รัศมีของลูป

สมการที่ 2.4 นี้แสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศแบบรูปวงกลม ถูกลดลงด้วย $1/r^3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ความเข้มของสนามที่มากที่สุด ในระนาบของลูปและทิศทางที่เหมาะสมสัมพันธ์กับค่ากระแส (I), จำนวนรอบ (N) และพื้นที่ผิวของลูป สมการที่ 2.4 ใช้มากสำหรับคำนวณหาค่ากระแส-รอบ ซึ่งจำเป็นสำหรับระยะการอ่าน ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อกำลังงานที่เครื่องลูกข่ายจะได้รับตามสัดส่วน



รูปที่ 2.15 การคำนวณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) เข้าลูป [3]



รูปที่ 2.16 การลดลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r [3]

2.5.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศขดลวด

จากกฎของฟาราเดย์ กล่าวว่าไว้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านพื้นผิวปิด จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรูป ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับการทำงานของ อุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ

รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เมื่อ สายอากาศของเครื่องลูกข่ายและสายอากาศของเครื่องอ่านอยู่ในระยะที่ใกล้กัน สนามแม่เหล็ก B ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดจากสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านเหนี่ยวนำแรงดัน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) ในสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย และทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่เหมาะสมได้เรียกว่ากฎของฟาราเดย์

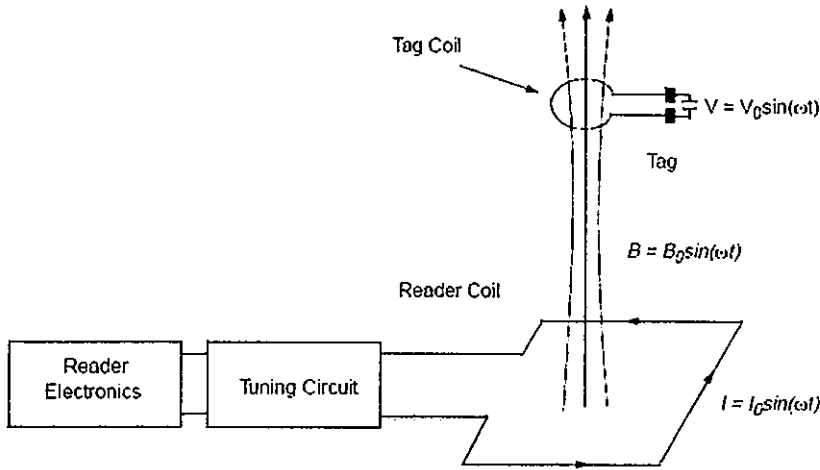
ในการเหนี่ยวนำแรงดันบนสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux : ψ) ต่อเวลา จะได้ดังสมการที่ 2.5

$$V = -N \frac{d\psi}{dt} \quad (2.5)$$

โดยที่ N = จำนวนรอบของสายอากาศขดลวด

ψ = เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านแต่ละรอบ

เครื่องหมายลบในสมการการเหนี่ยวนำแรงดัน แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดกระแสไหลซึ่งมีผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ที่รู้กันในชื่อกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ซึ่งเป็นการเน้นถึงความจริงของทิศทางกระแสไหลของกระแสในวงจร แสดงว่าแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม



รูปที่ 2.17 พื้นฐาน โครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านและสายอากาศเครื่องถูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3]

เส้นแรงแม่เหล็กในสมการที่ 2.5 คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวทั้งหมดของสายอากาศขดลวดและสามารถหาได้จากสมการ

$$\psi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.6)$$

โดยที่ \vec{B} คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ได้มาจากสมการที่ 2.4
 \vec{S} คือ พื้นที่ผิวของขดลวด

หมายเหตุ : ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก \vec{B} และพื้นที่ผิว \vec{S} เป็นปริมาณเวกเตอร์

ผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์ในสมการที่ 2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวด ซึ่งผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเวกเตอร์ทั้งสองอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวดของเครื่องถูกข่ายจะมีค่ามากที่สุดเมื่อขดลวดทั้งสอง (สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านและสายอากาศขดลวดของเครื่องถูกข่าย) อยู่ในทิศทางที่ขนานกัน

จากสมการที่ 2.3-2.6 จะเป็นการเห็นขบวนแรงดัน V_0 สำหรับสายอากาศรูปที่ไม่ได้จูน จะได้สมการที่ 2.7 ดังนี้

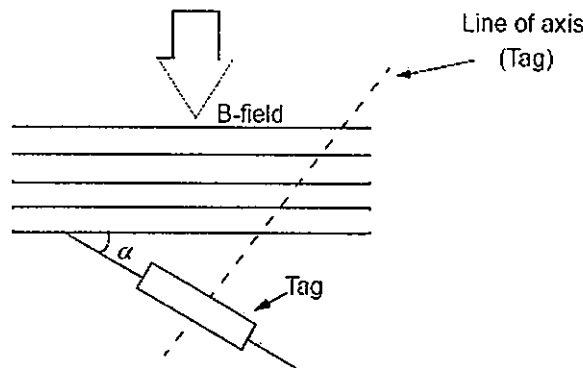
$$V_0 = 2\pi fNSB_0 \cos \alpha \quad (2.7)$$

- โดยที่ f = ความถี่ของสัญญาณ
 N = จำนวนรอบของขดลวดในรูป
 S = พื้นที่ของรูปในหน่วยเมตรยกกำลังสอง (m^2)
 B_0 = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก
 α = มุมระหว่างลูกข้ายกับระนาบสนามแม่เหล็ก

ถ้าทำการจูนขดลวด (ด้วยตัวเก็บประจุ:C) ที่สัญญาณความถี่ (125 หรือ 134.2 kHz) แรงดันเอาต์พุต V_o ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ 2.7 จะคูณด้วยค่าประสิทธิภาพ (Quality Factor) ของวงจรจูน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 50 ที่ความถี่ต่ำของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

$$V_o = 2\pi f_o N Q S B_o \cos \alpha \quad (2.8)$$

โดยค่าประสิทธิภาพ (Q) เป็นสิ่งบ่งชี้ของการเลือกความถี่ที่เหมาะสม



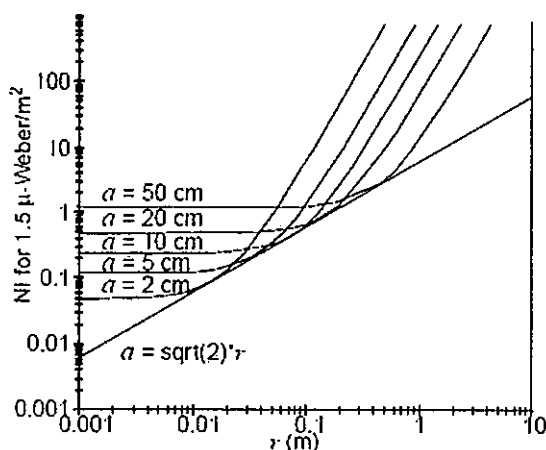
รูปที่ 2.18 การปรับทิศทางของสายอากาศของเครื่องลูกข่ายให้เหมาะสม [3]

การเหนี่ยวนำแรงดันข้ามสายอากาศขดลวดแบบรูปเป็นของฟังก์ชันมุมของสัญญาณแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่ามากที่สุดเมื่อสายอากาศขดลวดอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับทิศทางของสัญญาณที่ $\alpha = 0$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่เครื่องลูกข่ายต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และค่ากระแส-รอบ (Ampere-turns) ของสายอากาศขดลวดเครื่องอ่านที่มีรัศมีใดๆสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(NI) = \frac{2B_o (a^2 + r^2)^{3/2}}{\mu a^2} \quad (2.9)$$

สำหรับระยะการอ่านที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการบอกถึงการพิจารณา การเพิ่มขึ้นของรัศมีของขดลวดซึ่งจะได้ผลมากกว่าการเพิ่มกระแสให้กับขดลวด



Note: $B_0 = 1.5 \mu\text{Wb}/\text{m}^2$ is used.

รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน [3]

หมายเหตุ : จากรูปที่ 2.19 $B_0 = 1.5 \mu\text{Wb}/\text{m}^2$

รัศมีที่เหมาะสมของลูปต้องการค่าของกระแส-รอบที่น้อยที่สุด สำหรับระยะของการอ่านสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) เช่น

$$NI = K \frac{(a^2 + r^2)^{3/2}}{a^2} \quad (2.10)$$

โดยที่
$$K = \frac{2B_z}{\mu_0}$$

โดยการนำอนุพันธ์มาใช้เพื่อหาค่ารัศมีจะได้

$$\frac{d(NI)}{da} = K \frac{3/2(a^2 + r^2)^{1/2}(2a^3) - 2a(a^2 + r^2)^{3/2}}{a^4}$$

$$= K \frac{(a^2 - 2r^2)(a^2 + r^2)^{1/2}}{a^3}$$

จากสมการข้างต้นจะกลายเป็นสมการที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

$$a^2 - 2r^2 = 0$$

จากผลลัพธ์ข้างต้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่าง ค่ารัศมีที่เหมาะสมจะหาได้จาก

$$a = \sqrt{2}r \quad (2.11)$$

โดยที่ $a =$ รัศมีของขดลวด

$r =$ ระยะการอ่าน

จากผลลัพธ์ข้างต้นบอกให้รู้ว่า ค่ารัศมีที่เหมาะสมที่สุดของลูบสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านจะมีค่าประมาณ 1.414 เท่า ของระยะการอ่าน

2.5.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด

2.5.2.1 ขนาดและค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรง

เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทางไฟฟ้าจะแสดงตัวเลขตามมาตรฐานอเมริกา (American Wire Gauge : AWG) ค่าตัวเลขจะเป็นสัดส่วนที่ตรงกันข้ามกับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุกๆขนาดลวดลดไปหกเบอร์ ลวดที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมีค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงที่สูง ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงของตัวนำที่เป็นแบบเดียวกันตามพื้นที่หน้าตัดหาค่าได้โดย

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma S} \quad (2.12)$$

โดยที่ $l =$ ความยาวทั้งหมดของลวด

$\sigma =$ ค่าความนำ

$S =$ พื้นที่หน้าตัด

ตารางที่ 2.1 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับด้านในและสารเคลือบโลหะของลวด และค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรง

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของลวด

Wire Size (AWG)	Dia. in Mils (bare)	Dia. in Mils (coated)	Ohms/ 1000 ft.	Cross section (mils)	Wire Size (AWG)	Dia. in Mils (bare)	Dia. in Mils (coated)	Ohms/ 1000 ft.	Cross section (mils)
1	289.3	-	0.126	83690	26	15.9	17.2	41.0	253
2	287.6	-	0.156	66360	27	14.2	15.4	51.4	202
3	229.4	-	0.197	52620	28	12.6	13.8	65.3	159
4	204.3	-	0.249	41740	29	11.3	12.3	81.2	133
5	181.9	-	0.313	33090	30	10.0	11.0	106	100
6	162.0	-	0.395	26240	31	8.9	9.9	131	79.3
7	166.3	-	0.498	20820	32	8.0	6.8	162	64.0
8	128.5	131.6	0.628	16510	33	7.1	7.9	206	50.4
9	114.4	116.3	0.793	13090	34	6.3	7.0	261	39.7
10	101.9	106.2	0.999	10380	35	5.6	6.3	331	31.4
11	90.7	93.5	1.26	8230	36	5.0	5.7	415	25.0
12	80.8	83.3	1.59	6530	37	4.5	5.1	512	20.2
13	72.0	74.1	2.00	5180	38	4.0	4.5	648	16.0
14	64.1	66.7	2.52	4110	39	3.5	4.0	847	12.2
15	57.1	59.5	3.18	3260	40	3.1	3.5	1080	9.61
16	50.8	52.9	4.02	2580	41	2.8	3.1	1320	7.84
17	45.3	47.2	5.05	2060	42	2.5	2.8	1660	6.25
18	40.3	42.4	6.39	1620	43	2.2	2.5	2140	4.84
19	35.9	37.9	8.05	1290	44	2.0	2.3	2590	4.00
20	32.0	34.0	10.1	1020	45	1.76	1.9	3350	3.10
21	28.5	30.2	12.8	812	46	1.57	1.7	4210	2.46
22	25.3	28.0	16.2	640	47	1.40	1.6	5290	1.96
23	22.6	24.2	20.3	511	48	1.24	1.4	6750	1.54
24	20.1	21.6	25.7	404	49	1.11	1.3	8420	1.23
25	17.9	19.3	32.4	320	50	0.99	1.1	10600	0.98

หมายเหตุ : 1 mil = 2.54×10^{-3} เซนติเมตร

2.5.2.2 ค่าความต้านทานทางค้ำไฟกระแสสลับของลวด

สำหรับไฟกระแสตรง ประจุลื่นพาห้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของลวด ขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่ารีแอกแตนซ์ไกล์จุกศูนย์ของลวดก็เพิ่มขึ้นด้วย มีผลให้ขอบเขตความ

หนาแน่นกระแสในค่าอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นประจุจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของลวดไปยังขอบของลวด มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลงในจุดศูนย์กลางของลวดและเพิ่มขึ้นใกล้ขอบของลวด เรียกปรากฏการณ์ว่าผลกระทบของพื้นผิว (skin effect) ความหนาภายในตัวนำที่มีความหนาแน่นกระแสลดลง $1/e$ หรือ 37% จากค่าความหนาแน่นที่พื้นผิว (skin depth) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.13)$$

โดยที่ f = ความถี่
 μ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ
 σ = ค่าความนำของวัสดุ

ค่าความต้านทานของลวดที่ขึ้นกับความถี่ และค่าความต้านทานที่เกิดจากความหนาของพื้นผิวเรียกว่า ความต้านทานทางต้านไฟฟ้ากระแสสลับ การประมาณค่าความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับหาได้จากสมการ

$$R_{ac} \approx \frac{1}{2\sigma\pi\delta} = (R_{DC}) \frac{a}{2\delta} \quad (2.14)$$

โดยที่ a = รัศมีของขดลวด

สำหรับลวดทองแดง จะมีค่าความสูญเสียประมาณได้โดยค่าความต้านทานทางต้านไฟฟ้ากระแสตรงของลวดลวด ถ้ารัศมีของเส้นลวดใหญ่กว่า $0.066/\sqrt{f}$ เซนติเมตร ที่ 125 หรือ 134.2 kHz ค่ารัศมีวิกฤตคือ 0.019 เซนติเมตร ในที่นี้จะเท่ากับขนาดลวดเบอร์ 26 เพราะฉะนั้นสำหรับค่าความสูญเสียน้อยๆ ขนาดของลวดต้องใหญ่กว่าหรือเท่ากับเบอร์ 26 ถ้าต้องการให้ค่าประสิทธิภาพ (Q) ของขดลวดมีค่าสูงสุด

2.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด

กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสผ่านตัวนำอีกตัวหนึ่ง เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะของตัวนำ ขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าเส้นลวดที่

เป็นวัสดุที่เหมือนกัน และขดลวดที่มีจำนวนรอบมากก็จะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าขดลวดที่มีจำนวนรอบน้อย ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำมีนิยามคือ อัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

$$L = \frac{N\psi}{I} \quad (2.15)$$

โดยที่ $N =$ จำนวนรอบ

$I =$ กระแส

$\psi =$ เส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับสายอากาศขดลวดที่ความถี่ 125 kHz ของเครื่องลูกข่ายจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 2-3 (mH) และสายอากาศขดลวดเครื่องอ่านจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 200-300 ถึง 2,000-3,000 (μ H) จำนวนรอบที่มากขึ้นของสายอากาศขดลวดก็จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่มากขึ้นตามมา ดังนั้นสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่ายที่มีรูปแบบพื้นที่ที่จำกัดก็จะต้องพันหลายชั้น (Multi-layer winding) เพื่อลดจำนวนรอบของขดลวด

2.5.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด

ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวดตรง ที่แสดงในรูปที่ 2.14 สามารถหาได้จากสมการ

$$L = 0.002l \left[\log_e \frac{2l}{a} - \frac{3}{4} \right] \quad (2.16)$$

โดยที่ $L =$ ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี

l และ $a =$ ความยาวและรัศมีของลวดในหน่วยเซนติเมตร ตามลำดับ

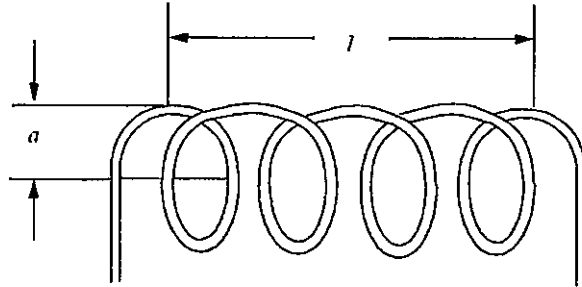
2.5.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 1 ชั้น

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2.20 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{(aN)^2}{22.9l + 25.4a} \quad (2.17)$$

โดยที่ $L =$ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี

- a = รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
 l = ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
 N = จำนวนรอบ



รูปที่ 2.20 รูปของขดลวด 1 ชั้น [3]

หมายเหตุ : สำหรับค่าประสิทธิภาพ (Q) ที่ดีที่สุดของขดลวด ควรจะมีความยาวประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

2.5.3.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบลูปวงกลมหลายชั้น

จากรูปแบบ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดขนาดใหญ่ในขอบเขตที่จำกัด จะมีประสิทธิภาพมากเมื่อพันขดลวดหลายๆ รอบ เป็นเหตุผลของรูปแบบในการออกแบบ โครงสร้างสายอากาศขดลวดของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 2.21 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบลูปวงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ [3]

$$L = \frac{0.31(aN)^2}{6a + 9h + 10b} \quad (2.18)$$

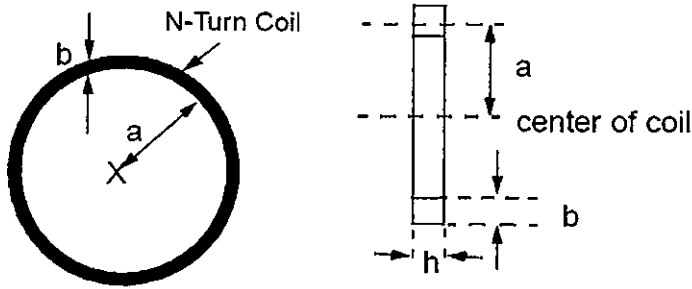
โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบลูปวงกลม มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี

a = รัศมีเฉลี่ยของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

N = จำนวนรอบ

b = ความหนาในการขด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

h = ความสูงในการขด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 2.21 สายอากาศขดลวดรูปวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใดๆ [3]

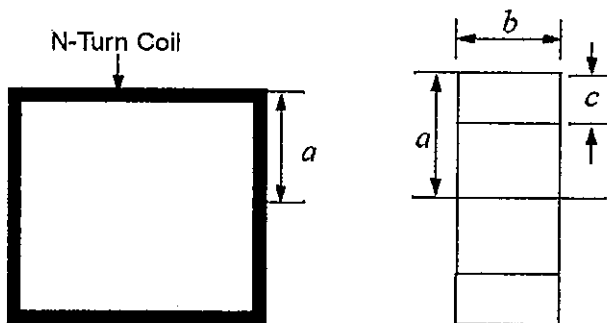
จำนวนรอบที่ต้องการสำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่แน่นอน สามารถคำนวณได้จาก การประยุกต์สมการที่ 2.16 ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$N = \sqrt{\frac{L_{\mu h} (6a + 9h + 10b)}{(0.31) a^2}} \quad (2.19)$$

2.5.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส

ถ้า N คือจำนวนรอบและ a เป็นความยาวที่วัดจากจุดศูนย์กลางของสี่เหลี่ยมถึงขอบด้านนอกของลวด ส่วนด้านข้างของลวดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว b และความหนา c ดังแสดงในรูปที่ 2.22

$$L = 0.008a^2 N^2 \left(2.303 \log_{10} \left(\frac{a}{b+c} \right) + 0.2235 \frac{b+c}{a} + 0.726 \right) \quad (2.20)$$



(ก) รูปด้านบน

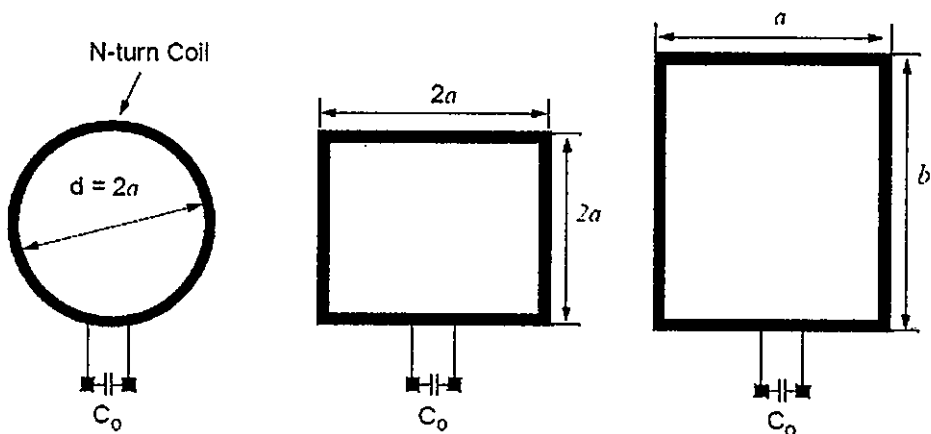
(ข) รูปด้านข้าง

รูปที่ 2.22 สายอากาศขดลวดแบบรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสหลายชั้น [3]

2.6 รูปแบบของสายอากาศขดลวด

2.6.1 สายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย

สายอากาศขดลวดสำหรับเครื่องลูกข่ายของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถทำได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์การใช้งาน ตัวอย่างหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำสำหรับสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่ายจะมีค่าประมาณ 2-3 mH ที่ความถี่ 125 kHz รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเครื่องลูกข่าย สายอากาศขดลวดโดยทั่วไปมักทำด้วยลวดเส้นเล็กๆ ค่าความเหนี่ยวนำและจำนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.23 หลากหลายรูปแบบของสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย [3]

2.6.2 สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน

ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดเครื่องอ่าน โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 200-300 ถึง 2,000-3,000 μH ที่ความถี่ต่ำ สายอากาศขดลวดเครื่องอ่านสามารถที่จะทำเป็นลูปเดี่ยวตามรูปแบบวงจรโซแนนซ์แบบอนุกรม หรือ ลูปคู่ (Transformer) ตามรูปแบบวงจรโซแนนซ์แบบขนาน

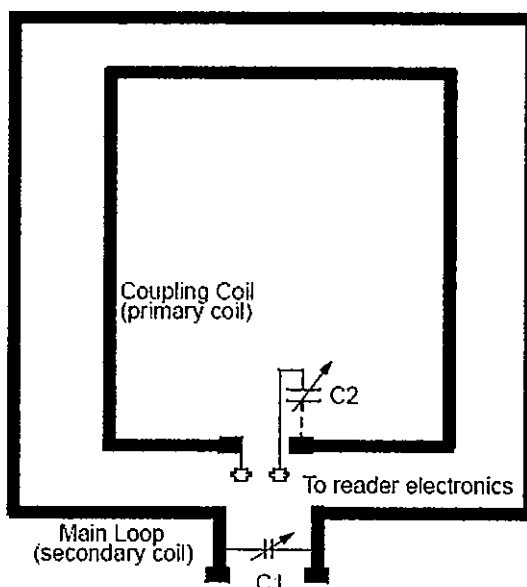
ในรูปแบบวงจรโซแนนซ์อนุกรมผลที่ได้จะให้ค่าความต้านทานที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่ามาก ส่วนในวงจรโซแนนซ์ขนานจะให้ผลของค่าความต้านทานสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่าน้อย เนื่องจากแรงดันสามารถเพิ่มระดับขึ้นได้โดยการใส่รูปแบบลูปคู่ขนาน วงจรโซแนนซ์แบบขนานมักจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการสัญญาณที่มีแรงดันสูง

รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของสายอากาศลูปทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer loop) ที่ลูปหลัก (Secondary) เป็นรูปแบบของรอบโครงสร้างขนาดใหญ่ของลวด โดยจูนค่าที่ตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (125 kHz) ลูปอื่นจะเรียกว่าลูปเชื่อมต่อ (Primary) และจะมีรูปแบบที่เล็กกว่า 2-3 รอบของขดลวด ตำแหน่งของลูปเชื่อมต่อ (Primary) จะวางอยู่ภายในลูปหลัก

ลูปเชื่อมต่อ (Primary) จะทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุต/เอาต์พุตของเครื่องอ่าน การเชื่อมต่อขดลวดที่จุดอินพุต/เอาต์พุตในตัวอ่าน ที่ลูปหลัก (Secondary) จะต้องทำการจูนให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์และไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน

ลูปเชื่อมต่อโดยทั่วไปจะไม่ได้ทำการจูน แต่ในการออกแบบจะทำการจูนที่ตัวเก็บประจุ C2 ที่ต่ออนุกรมอยู่กับลูปเชื่อมต่อ เพราะว่าจำนวนรอบที่ลูปหลัก (Secondary) มากกว่าลูปเชื่อมต่อ (Primary) 2-3 รอบ ทำให้ที่ลูปเชื่อมต้อมีค่าความเหนี่ยวนำน้อย เป็นผลให้ต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามาก



รูปที่ 2.24 สายอากาศลูปทรานฟอร์มเมอร์ของเครื่องอ่าน [3]

2.7 วงจรเรโซแนนซ์ ค่าประสิทธิภาพ Q และแบนด์วิดท์

ในการประยุกต์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สายอากาศขดลวดเป็นส่วนสำคัญของวงจรเรโซแนนซ์และระยะในการอ่านของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อย่างมาก

รูปที่ 2.25 และ 2.26 แสดงตัวอย่างรูปแบบของวงจรเรโซแนนซ์ ของสายอากาศขดลวดและการจูนตัวเก็บประจุ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) สามารถคำนวณได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.21)$$

โดยที่ $L =$ ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด

$C =$ ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้จูน

วงจรเรโซแนนซ์สามารถที่จะมีรูปแบบเป็นแบบอนุกรม หรือ แบบขนาน วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ ผลลัพธ์คือจะมีกระแสที่ใช้ในวงจรมาก โดยทั่วไปจะใช้วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสำหรับสายอากาศของเครื่องอ่าน

ส่วนวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งค่ากระแสที่ได้จะมีค่าต่ำและแรงดันจะมีค่าสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับสายอากาศของเครื่องลูกข่าย

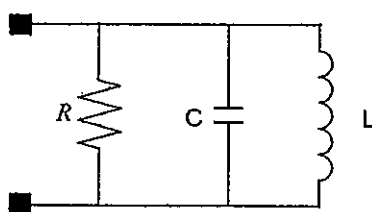
2.7.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรสามารถหาได้จากสมการ

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega L}{(1 - \omega^2 LC) + j\frac{\omega L}{R}} \quad (2.22)$$

โดยที่ $\omega =$ ความถี่เชิงมุม $= 2\pi f$

$R =$ ความต้านทานโหลด



รูปที่ 2.25 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [3]

ในที่นี้ไม่สนใจค่าความต้านทาน (r) ของขดลวด ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อตัวส่วนในสมการ (2.20) มีค่ามาก และค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยเมื่อ

$$\omega^2 LC = 1 \quad (2.23)$$

เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์และความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.24)$$

ทำการแทนสมการที่ 2.21 ลงในสมการที่ 2.20 ค่าความต้านทานที่ความถี่เรโซแนนซ์จะกลายเป็น

$$Z = R \quad (2.25)$$

ค่า R และ C ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน สามารถนำมาคำนวณแบนด์วิดท์ B ของวงจรได้ดังสมการ

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.26)$$

ค่าประสิทธิภาพ Q สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (2.27)$$

$$\text{โดยที่ } f_0 = \text{ความถี่เรโซแนนซ์}$$

$$B = \text{แบนด์วิดท์}$$

แทนสมการที่ 2.24 และ สมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.28 ค่าประสิทธิภาพ Q ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะได้ดังสมการ

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.28)$$

ค่าประสิทธิภาพในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน และค่ารากที่สองอัตราส่วนระหว่างค่าความจุกับค่าความเหนี่ยวนำในวงจร ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน จะใช้สำหรับวงจรสายอากาศของเครื่องลูกข่าย แรงดันที่ตกคร่อมในวงจรสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และ สมการที่ 2.28 ดังนี้

$$V_0 = 2\pi f_0 N \left(R \sqrt{\frac{C}{L}} \right) S B_0 \cos \alpha \quad (2.29)$$

สมการข้างต้นแสดงถึงการเหนี่ยวนำแรงดันในขดลวดเครื่องลูข่ายเป็นส่วนกลับของรากที่สองของค่าความเหนี่ยวนำ และเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนรอบและพื้นที่ผิวของขดลวด

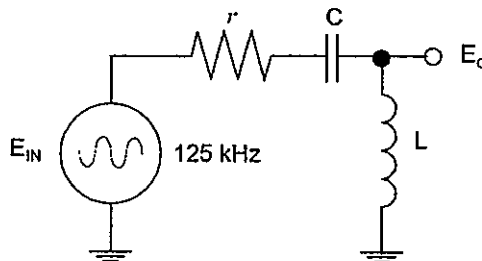
วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถใช้ในสายอากาศแบบลูปทรานฟอร์มเมอร์ สำหรับเครื่องอ่านที่ระยะทางไกลๆ อธิบายได้ในสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน (รูปที่ 2.24) แรงดันในลูปทุติยภูมิจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับอัตราส่วนของจำนวนรอบ (n_2/n_1) ของลูปทรานฟอร์มเมอร์ แม้ว่าสัญญาณมีแรงดันสูงก็ตามไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้ สาเหตุที่แยกสายอากาศเพื่อต้องการสำหรับการรับสัญญาณ วงจรสายอากาศรับควรจะมีสัญญาณที่ทำการมอดูเลทของเครื่องลูข่าย

2.7.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมอย่างง่ายแสดงดังในรูปที่ 2.26 สมการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ

$$Z(j\omega) = r + j(X_L - X_C) \quad (2.30)$$

โดยที่ r = ความต้านทานของวงจร



รูปที่ 2.26 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม [3]

$$X_L = 2\pi f_0 L \quad (2.31)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (2.32)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.30 จะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบค่ารีแอคแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ($X_L = X_C$) เรียกว่าสถานะเรโซแนนซ์ ความถี่เรโซแนนซ์จะเหมือนกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรขนานตามสมการที่ 2.24

กำลังครึ่งของความถี่แบนด์วิดท์จะถูกกำหนดโดยค่า r และ L ดังสมการ

$$B = \frac{r}{2\pi L} \quad (2.33)$$

ค่าประสิทธิภาพ Q ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q = \frac{f_0}{B} = \begin{cases} \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C r} \\ \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases} \quad (2.34)$$

วงจรอนุกรมเป็นรูปแบบการแบ่งแรงดันเพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมในขดลวดจะคำนวณได้จากสมการ

$$V_o = \frac{jX_L}{r + jX_L - jX_C} V_{in} \quad (2.35)$$

หรือ

$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = \frac{X_L}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{X_L}{r \sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r} \right)^2}} = \frac{Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r} \right)^2}} \quad (2.36)$$

2.7.3 ค่าประสิทธิภาพ (Q) และแบนด์วิดท์

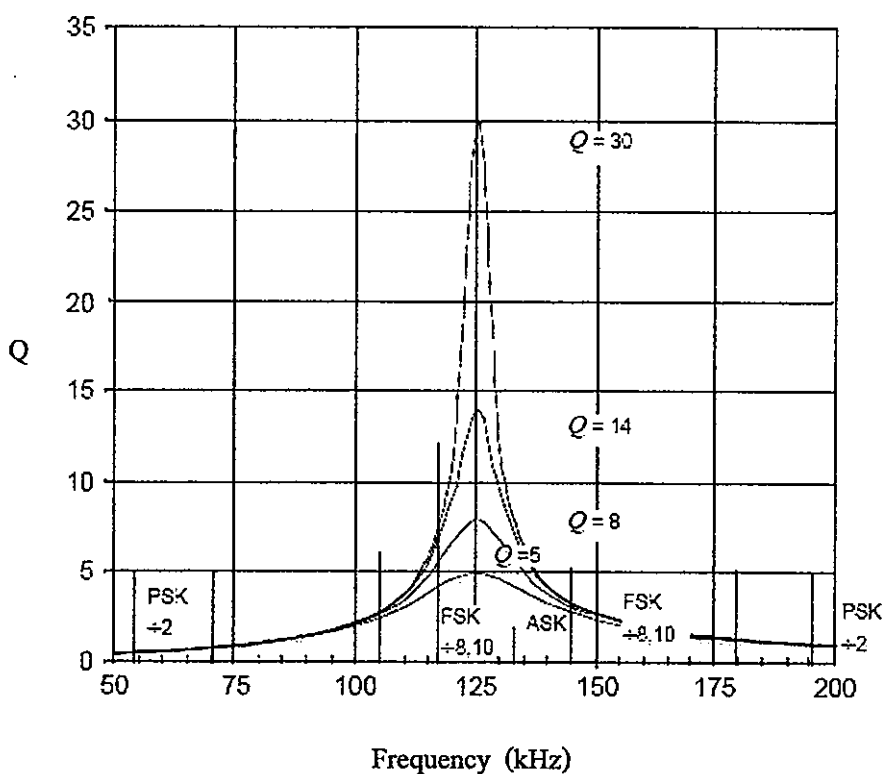
รูปที่ 2.27 แสดงการประมาณช่วงความถี่สำหรับรูปแบบรวมๆ ของการมอดูเลชัน (Modulation) แบบแอมพลิจูดชีพต์คีย์อิง (ASK) , ฟรีแควนซีชีพต์คีย์อิง (FSK) และเฟสชีพต์คีย์อิง (PSK) สำหรับการกู้ของสัญญาณข้อมูลจากเครื่องลูกข่าย วงจรของเครื่องอ่านต้องการแบนด์วิดท์ที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นสองเท่าของอัตราส่วนข้อมูล ดังนั้นถ้าอัตราส่วนของข้อมูลคือ 8 kHz สำหรับการสัญญาณแบบแอมพลิจูดชีพต์คีย์อิง แบนด์วิดท์จะต้องมีค่าน้อยที่สุดที่ 16 kHz สำหรับการกู้ของข้อมูลที่รับจากเครื่องลูกข่าย

อัตราข้อมูลสำหรับสัญญาณเฟรีแควนซีซีพดีคีย์อิง ($\div 10$) คือ 12.5 kHz ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่ต้องการสำหรับการกู้ข้อมูลคือ 25 kHz

ค่าประสิทธิภาพสำหรับสัญญาณเฟรีแควนซีซีพดีคีย์อิง ($\div 10$) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.34 ตัวอย่างเช่น

$$Q = \frac{f_o}{B} = \frac{125\text{kHz}}{25\text{kHz}} = 5$$

สำหรับสัญญาณเฟสซีพดีคีย์อิง ($\div 2$) อัตราข้อมูลคือ 62.5 kHz (ถ้าความถี่คลื่นพาห้คือ 125 kHz) ดังนั้นวงจรเครื่องอ่านต้องการแบนด์วิดท์ 125 kHz ค่าประสิทธิภาพในกรณีนี้จะเท่ากับ 1 ปัญหาในที่นี้แก้ไขโดยการแยกขดลวดส่งและขดลวดรับซึ่งขดลวดส่งสามารถออกแบบให้มีค่าประสิทธิภาพสูงและขดลวดรับสามารถออกแบบให้มีค่าประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 2.27 ค่าประสิทธิภาพกับรูปแบบการมอดูเลต [3]

2.7.3.1 ข้อจำกัดของค่าประสิทธิภาพ

เมื่อทำการออกแบบวงจรสาขาอากาศของเครื่องอ่าน อาจจะมีผลคิดว่าการออกแบบขดลวดจะต้องมีค่าประสิทธิภาพสูง ในที่นี้มีสามประการที่สำคัญที่เป็นข้อจำกัดของวิธีนี้

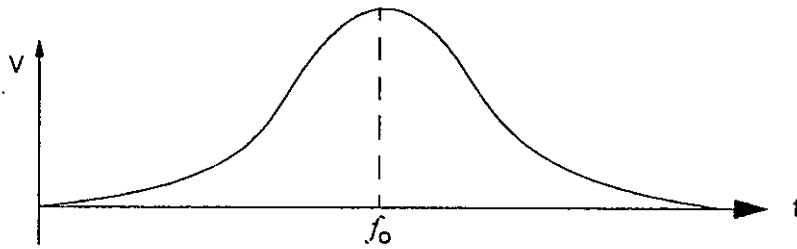
- ก) แรงดันที่สูงมากสามารถทำให้ฉนวนเบรกความชื้น เช่น ที่ขดลวดหรือตัวเก็บประจุที่เรโซแนนซ์ ยกตัวอย่าง กระแส 1 A ที่ไหลในขดลวด 2 mH จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวด 1500 Vpp ในกรณีของการออกแบบขดลวดเพียงรูปเดียวของตัวอ่าน การกู้สัญญาณที่ได้รับจากเครื่องลูกข่ายจะต้องทำในขณะที่แรงดันที่มีค่าสูง
- ข) การจูนที่เหมาะสมในช่วงวิกฤต อุปกรณ์ที่ใช้วัดวงจรสาขาอากาศที่มีค่าประสิทธิภาพสูง, แรงดันสูงจะมีส่วนประกอบของค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้และ มีความเสถียรภาพสูงน่าจะมีใช้ แต่โดยทั่วไปจะมีราคาแพงและยากที่จะมีใช้โดยทั่วไป
- ค) ค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ได้รับมีค่าสูง ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ย้อนกลับมาจะสัมพันธ์กับกำลังของคลื่นพาห้ที่ได้รับ ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องลูกข่ายจะมีค่าน้อย วงจรของเครื่องอ่านอาจเกิดความสับสนได้ในการกู้สัญญาณ

2.7.3.2 วิธีการจูน

วงจรจะต้องจูนที่ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับค่ามากที่สุดที่แสดง (ระยะการอ่าน) ของอุปกรณ์ มีอยู่สองตัวอย่างของการจูนของวงจรมีดังนี้

1. วิธีการวัดค่าแรงดัน

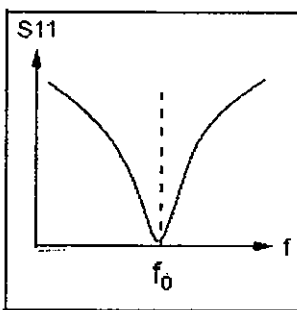
- ก) ทำการปรับค่าแรงดันที่ต้นกำเนิดของสัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์ (125 kHz)
- ข) ต่อแรงดันที่ได้จากต้นกำเนิดของสัญญาณक्रमวงจรเรโซแนนซ์
- ค) ต่อออสซิลโลสโคปक्रमวงจรเรโซแนนซ์
- ง) จูนตัวเก็บประจุหรือขดลวดขณะที่สังเกตแอมพลิจูดของสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป
- จ) หยุดการจูนเมื่อได้ค่าแรงดันสูงสุด



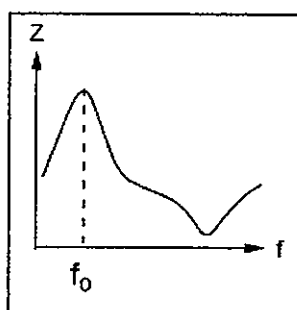
รูปที่ 2.28 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์[3]

2. เอส-พารามิเตอร์หรือวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

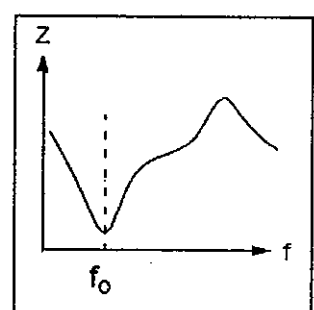
- ก) ทำการปรับค่าเอส-พารามิเตอร์ ทดสอบการปรับค่า (Network Analyzer) สำหรับการวัด S11 และปรับให้อยู่ในตำแหน่งมาตรฐาน
- ข) วัดค่า S11 สำหรับวงจรเรโซแนนซ์
- ค) อิมพีแดนซ์ที่สะท้อนหรือแอดมิทแตนซ์ที่สะท้อนสามารถวัดแทนค่า S11 ได้
- ง) จุดตัวเก็บประจุหรือขดลวดจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุด หรือมีค่าเป็นศูนย์ (S11) ที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_0 สำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ค่าพิกที่มีค่ามากที่สุดจะเกิดขึ้นสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและค่าพิกน้อยที่สุดสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3]

หมายเหตุ 1 : (ก) ผลตอบสนองของ S11 (ข) ผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน และ (ค) ผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

2 : ในรูป (ก) จะไม่มีค่าที่ความถี่เรโซแนนซ์แสดงถึงการส่งกลับอินพุตที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ วิธีนี้วงจรจะดูคล้ายสัญญาณที่ความถี่ขณะที่ความถี่อื่นๆสะท้อนกลับมา ในรูป (ข) ความโค้งที่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีพีคที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในที่นี้เพราะว่าวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ (ค) แสดงผลตอบสนองสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และพีคที่มีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์

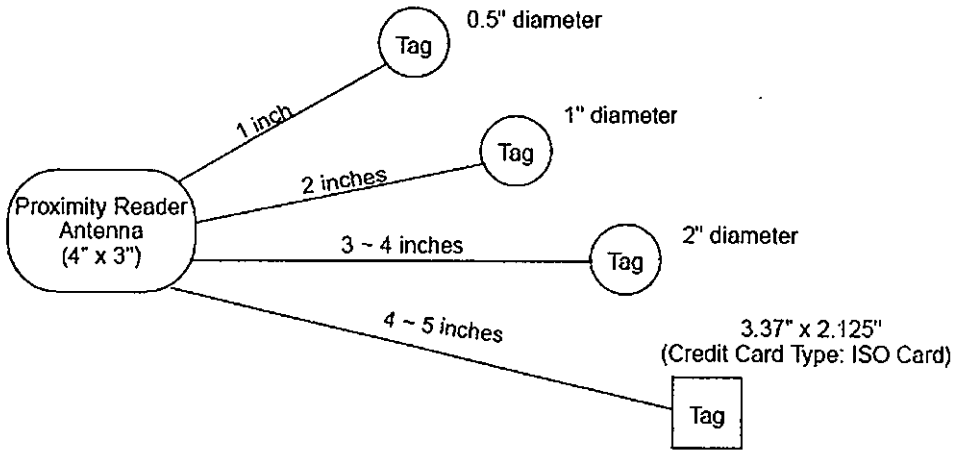
2.8 ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระยะเวลาอ่านเป็นคำจำกัดความของค่าที่มากที่สุด ในระยะที่ใช้สื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดพาสซีฟจะอยู่ในช่วง 1 นิ้วถึง 1 เมตร จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุโดยทั่วไปจะมีผลกระทบมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

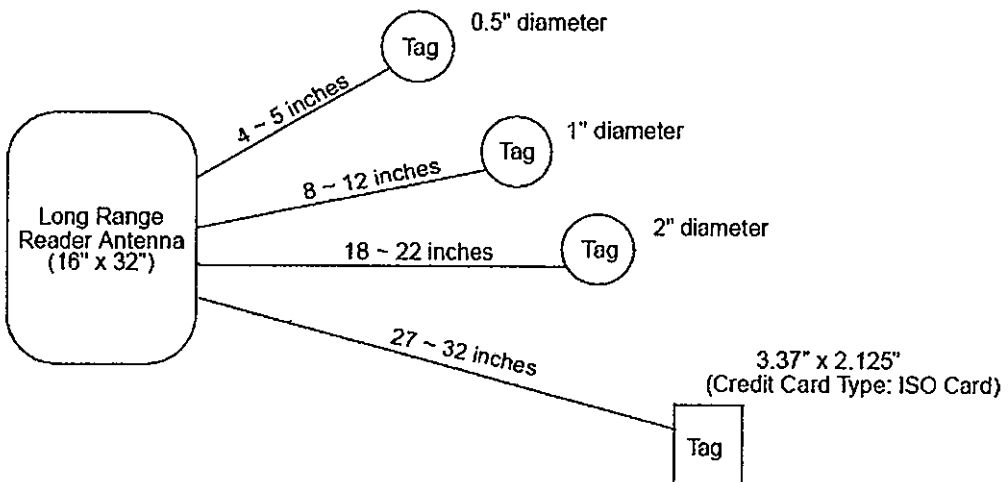
- ก) ความถี่ที่ใช้และการทำงานของขดลวดสายอากาศ
- ข) ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศการจูนวงจร
- ค) การปรับทิศทางของสายอากาศ
- ง) ค่ากระแสและแรงดัน
- จ) ความไวของการรับสัญญาณ
- ฉ) การเข้ารหัส (หรือการมอดูเลต) และการถอดรหัส (หรือการดีมอดูเลต)
- ช) จำนวนของบิตข้อมูล
- ซ) สภาพของสิ่งแวดล้อม (โลหะ, สัญญาณรบกวนจากเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์) อื่นๆ

ความถี่ที่ใช้จะเป็นข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้ว (ก-ค) จะมีความสัมพันธ์กับ โครงสร้างของสายอากาศและการจูนวงจร ข้อจำกัด (ง-จ) จะกำหนดโดยเทคโนโลยีของวงจรของเครื่องอ่าน ข้อจำกัด (ฉ) คือ โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของอุปกรณ์ และ (ซ) แสดงความสัมพันธ์ของโปรแกรม Firm Ware สำหรับการแปลความหมายของข้อมูล

ขนาดของสายอากาศจะมีผลต่อระยะเวลาอ่านข้อมูลซึ่งสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะทำให้ระยะเวลาอ่านมากขึ้นด้วย รูปที่ 2.30 และ 2.31 แสดงตัวอย่างของระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดพาสซีฟแบบต่างๆ



รูปที่ 2.30 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ [3]



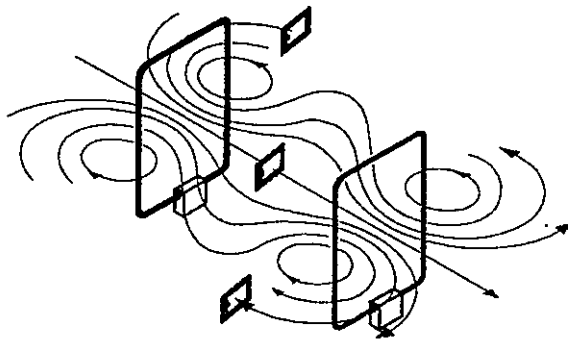
รูปที่ 2.31 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล [3]

2.9 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวดต่อเป็น 2 เกตประตู่

สายอากาศของเครื่องอ่านนั้นสามารถต่อสายอากาศได้มากกว่า 1 เกต โดยใช้วิธีการแยก แม้ว่าตัวแยกที่นำมาใช้อาจทำให้เกิดการสูญเสียอยู่บ้าง แต่เมื่อต่อสายอากาศ 2 เกตจะทำให้ได้ระยะของการอ่านเพิ่มขึ้นจากการต่อสายอากาศเกตเดี่ยว และทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวดนั้น จะขึ้นอยู่กับทิศทางของการป้อนกระแสให้กับสายอากาศแบบรูปขดลวด ดังนั้นลักษณะการต่อสายอากาศเป็นแบบเกตประตู่จึงมีการป้อนกระแสได้ 2 แบบดังนี้

2.9.1 สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ In phase

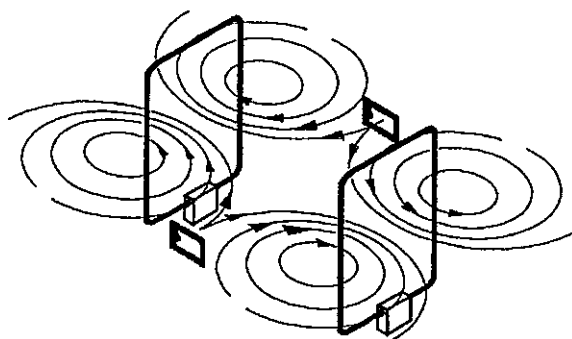
จากสายอากาศแบบรูปขดลวดเกตเดียวจะได้ค่าสนามแม่เหล็กที่ลดลงตามระยะทางที่มากขึ้น แต่เมื่อทำการต่อสายอากาศแบบ 2 เกต โดยทำการป้อนทิศทางของกระแสเหมือนกันทั้ง 2 เกต จะทำให้เครื่องอ่านอ่านได้ระยะไกลกว่าเดิม ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีสำหรับเพื่อใช้ในการตรวจสอบเครื่องลูกข่ายที่มีการขนส่งบนเครื่องขนส่งลำเลียง เนื่องจากเมื่อทำการต่อสายอากาศกับเครื่องอ่าน เครื่องอ่านจะสามารถอ่านได้ดีเฉพาะลักษณะที่ลูกข่ายวางตัวขนานกับสายอากาศเครื่องอ่าน แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ In phase [5]

2.9.2 สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ Out of phase

เมื่อทำการต่อสายอากาศ 2 เกตแบบ Out of phase จะได้รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป และเมื่อเครื่องลูกข่ายอยู่ในแนวขนานกับสายอากาศจะไม่สามารถอ่านได้ที่จุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศ แต่เมื่อเครื่องลูกข่ายทำมุม 90 องศา กับสายอากาศของเครื่องอ่าน ก็จะสามารถอ่านได้ทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศเครื่องอ่าน แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตต่อแบบ Out of phase [5]

2.10 กฎของ Biot-Savart

โดยทั่วไปกฎของ Biot-Savart นั้นจะใช้ในการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ในวิชานี้พจน์นี้นำเสนอการวิเคราะห์โดยใช้กฎของ Biot-Savart เพราะว่าจากสมการของ Maxwell [6] ซึ่งเป็นสมการในโดเมนเชิงเวลา

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.37)$$

หรือกรณีในโดเมนเชิงความถี่จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon_0\vec{E} \quad (2.38)$$

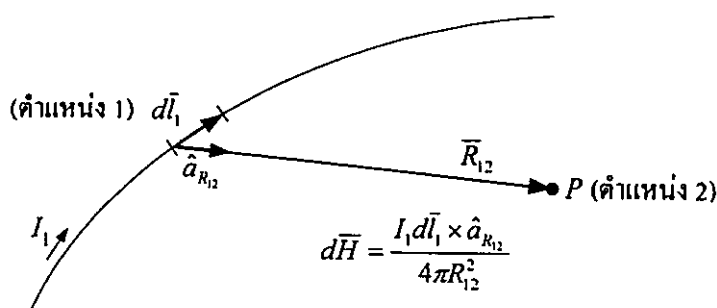
เนื่องจากความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 125 kHz ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้น $\omega = 78.54 \times 10^6$ rad/s และ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m เพราะฉะนั้นพจน์ของ $\omega\epsilon_0\vec{E}$ จะมีค่าน้อยมากจึงประมาณได้ว่า

$$\nabla \times \vec{H} \approx \vec{J} \quad (2.39)$$

จากสมการเห็นได้ว่ากฎของ Biot-Savart สามารถในการวิเคราะห์ปัญหาได้

การคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity : \vec{H}) เมื่อ $d\vec{H}$ ที่จุด P (ตำแหน่ง 2) ที่เกิดจากส่วนของกระแส I_1 ไหลในตัวนำที่มีความยาว $d\vec{l}_1$ ซึ่งมีทิศทางตามเวกเตอร์ $d\vec{l}_1$ (ตำแหน่ง 1) เมื่อระยะทางระหว่างตำแหน่ง 1 และตำแหน่ง 2 เป็น R_{12} และมีทิศทางของเวกเตอร์เป็น $\hat{a}_{R_{12}}$ ได้จาก [6]-[8]

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \hat{a}_{R_{12}}}{4\pi R_{12}^2} \quad (\text{แอมแปร์/เมตร}) \quad (2.40)$$



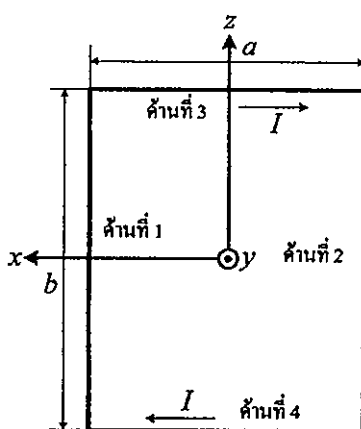
รูปที่ 2.34 การคำนวณกฎของ Biot-Savart

เมื่ออินทิเกรตตลอดเส้นทางที่กระแสไหล นั่นคือ

$$\bar{H} = \oint \frac{Id\bar{l} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2.41)$$

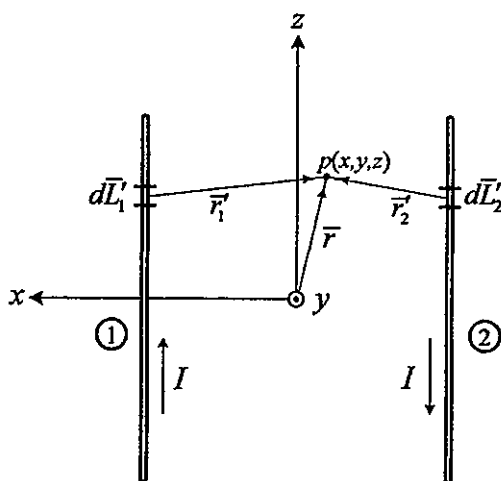
2.11 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะทำการคำนวณแบ่งทีละด้าน โดยทั้งหมดจะมี 4 ด้านด้วยกัน โดยจะคำนวณกรณีละ 2 ด้าน แบ่งเป็น 2 กรณี สุดท้ายจะทำการรวมผลของทั้ง 2 กรณีเข้าด้วยกัน เพื่อหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.35 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

กรณีที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากด้านที่ 1 และ 2 ของบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.36 การคำนวณกรณีที่ 1

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 คือ $(x' = \frac{a}{2}, y', z')$ จะได้

$$\bar{R}_1 = (x-x')\hat{a}_x + (y-y')\hat{a}_y + (z-z')\hat{a}_z \quad (2.42)$$

$$R_1 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.43)$$

จากรูปที่ 2.36 จะได้ว่า

$$d\bar{L}_1 = dz'\hat{a}_z \quad (2.44)$$

จาก $\bar{H}_1 = \oint \frac{Id\bar{L}_1 \times \hat{a}_{R_1}}{4\pi R_1^2}$ จะได้

$$\bar{H}_1 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'\hat{a}_z \times ((x-x')\hat{a}_x + (y-y')\hat{a}_y + (z-z')\hat{a}_z)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{3/2}} \quad (2.45)$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I((x-x')\hat{a}_y - (y-y')\hat{a}_x)}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{3/2}} \quad (2.46)$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I((x-x')\hat{a}_y - (y-y')\hat{a}_x)}{4\pi((x-x')^2 + (y-y')^2)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{4(x-x')^2 + 4(y-y')^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{4(x-x')^2 + 4(y-y')^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (2.47)$$

ทำการแทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 $y' = 0, x' = \frac{a}{2}$ ลงในสมการ (2.47) จะได้

$$\bar{H}_1 = \frac{I\left(\left(x-\frac{a}{2}\right)\hat{a}_y - y\hat{a}_x\right)}{4\pi\left(\left(x-\frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (2.48)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 คือ $(x'_2 = \frac{-a}{2}, y'_2, z'_2)$ จะได้ว่า

$$\vec{R}_2 = (x - x'_2)\hat{a}_x + (y - y'_2)\hat{a}_y + (z - z'_2)\hat{a}_z \quad (2.49)$$

$$R_2 = \sqrt{(x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2 + (z - z'_2)^2} \quad (2.50)$$

จากรูปที่ 2.36 จะได้ว่า

$$d\vec{L}_2 = dz'_2\hat{a}_z \quad (2.51)$$

จาก $\vec{H}_2 = \oint \frac{I d\vec{L}_2 \times \hat{a}_{R_2}}{4\pi R_2^2}$ ทำแบบเดียวกับกรณีแหล่งกำเนิดที่ 1 จะได้

$$\vec{H}_2 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_2\hat{a}_z \times ((x - x'_2)\hat{a}_x + (y - y'_2)\hat{a}_y + (z - z'_2)\hat{a}_z)}{[(x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2 + (z - z'_2)^2]^{3/2}} \quad (2.52)$$

$$\vec{H}_2 = \frac{I((x - x'_2)\hat{a}_y - (y - y'_2)\hat{a}_x)}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_2}{[(x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2 + (z - z'_2)^2]^{3/2}} \quad (2.53)$$

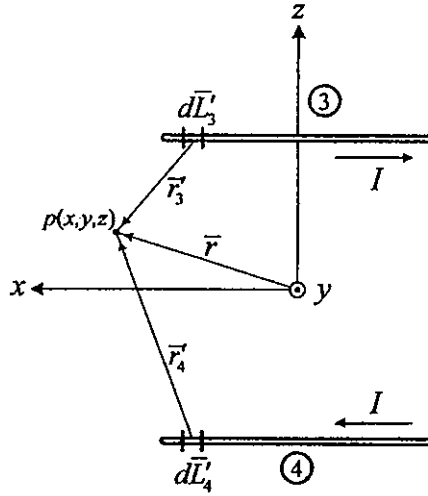
$$\vec{H}_2 = \frac{I((x - x'_2)\hat{a}_y - (y - y'_2)\hat{a}_x)}{4\pi((x - x'_2)^2 + (y - y'_2)^2)} \left[\frac{b - 2z}{\sqrt{4(x - x'_2)^2 + 4(y - y'_2)^2 + (b - 2z)^2}} - \frac{b + 2z}{\sqrt{4(x - x'_2)^2 + 4(y - y'_2)^2 + (b + 2z)^2}} \right] \quad (2.54)$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 $y'_2 = 0, x'_2 = \frac{-a}{2}$ ลงใน (2.54) จะได้

$$\vec{H}_2 = \frac{I\left(\left(x + \frac{a}{2}\right)\hat{a}_y - y\hat{a}_x\right)}{4\pi\left(\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{b - 2z}{\sqrt{(a + 2x)^2 + 4y^2 + (b - 2z)^2}} - \frac{b + 2z}{\sqrt{(a + 2x)^2 + 4y^2 + (b + 2z)^2}} \right] \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.48) และ (2.55) จะได้ว่าสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 2 เป็นการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากด้านที่ 3 และ 4 ของขั้ววงสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.37 การคำนวณกรณีที่ 2

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 คือ $(x'_3, y'_3, z'_3 = \frac{b}{2})$

$$\vec{R}_3 = (x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z \quad (2.56)$$

$$R_3 = \sqrt{(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2} \quad (2.57)$$

จากรูปที่ 2.37 จะได้ว่า

$$d\vec{L}_3 = dx'_3\hat{a}_x \quad (2.58)$$

จาก $\vec{H}_3 = \oint \frac{Id\vec{L}_3 \times \hat{a}_{R_3}}{4\pi R_3^2}$ จะได้

$$\vec{H}_3 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}}^{-\frac{a}{2}} \frac{dx'_3\hat{a}_x \times ((x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z)}{[(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2]^{3/2}} \quad (2.59)$$

$$\vec{H}_3 = \frac{I((y - y'_3)\hat{a}_z - (z - z'_3)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}}^{-\frac{a}{2}} \frac{dx'_3}{[(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2]^{3/2}} \quad (2.60)$$

$$\bar{H}_3 = \frac{I(-z-z'_3)\hat{a}_y + (y-y'_3)\hat{a}_z}{4\pi((y-y'_3)^2 + (z-z'_3)^2)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_3)^2 + 4(z-z'_3)^2}} - \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_3)^2 + 4(z-z'_3)^2}} \right] \quad (2.61)$$

แทนค่าจุดแหล่งกำเนิด $y'_3 = 0$, $z'_3 = \frac{b}{2}$ ใน สมการที่ (2.61) จะได้

$$\bar{H}_3 = \frac{I\left(-\left(z-\frac{b}{2}\right)\hat{a}_y + y\hat{a}_z\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z-\frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} - \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} \right] \quad (2.62)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 คือ $(x'_4, y'_4, z'_4 = \frac{-b}{2})$

$$\bar{R}_4 = (x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z \quad (2.63)$$

$$R_4 = \sqrt{(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2} \quad (2.64)$$

จากรูปที่ 2.27 จะได้

$$d\bar{L}_4 = dx'_4\hat{a}_x \quad (2.65)$$

จาก $\bar{H}_4 = \oint \frac{I d\bar{L}_4 \times \hat{a}_{R_4}}{4\pi R_4^2}$ ทำนองเดียวกับกรณีแหล่งกำเนิดที่ 3

$$\bar{H}_4 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_4\hat{a}_x \times ((x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z)}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (2.66)$$

$$\bar{H}_4 = \frac{I((y-y'_4)\hat{a}_z - (z-z'_4)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_4}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (2.67)$$

$$\bar{H}_4 = \frac{I(-z-z'_4)\hat{a}_y + (y-y'_4)\hat{a}_z}{4\pi((y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_4)^2 + 4(z-z'_4)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_4)^2 + 4(z-z'_4)^2}} \right] \quad (2.68)$$

แทนค่าจุดแหล่งกำเนิด $y'_4 = 0$, $z'_4 = \frac{-b}{2}$ ในสมการที่ (2.68) จะได้

$$\bar{H}_4 = \frac{I\left(-\left(z+\frac{b}{2}\right)\hat{a}_y + y\hat{a}_z\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z+\frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (2.69)$$

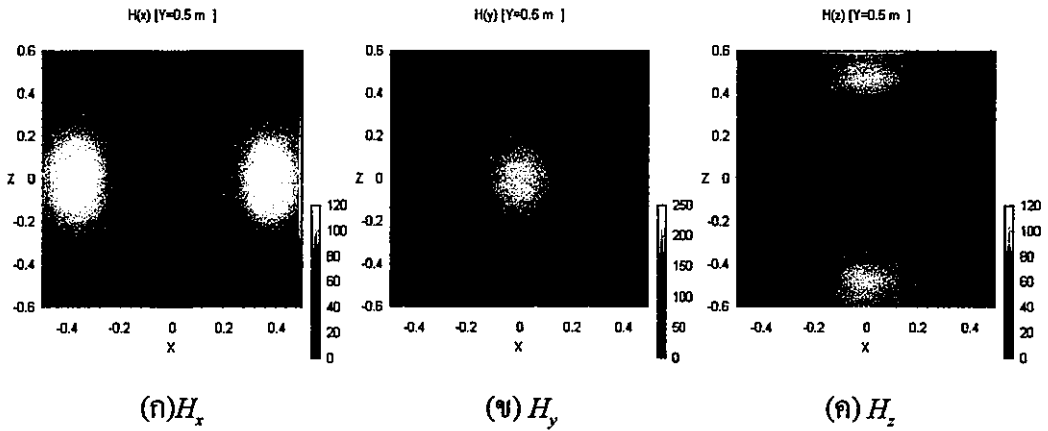
จากสมการที่ (2.62) และ (2.69) จะได้สนามแม่เหล็กที่มิ่งค์ประกอบทิศทาง y และ z จากนั้นทำการรวมสมการสนามทั้ง 2 กรณี โดยใช้สมการ (2.48) (2.55) (2.62) และ (2.69) แทนค่าลงในสมการ (2.70) จะได้ค่าสนามแม่เหล็กของบ่วงแบบสี่เหลี่ยม

$$\bar{H} = \bar{H}_1 + \bar{H}_2 + \bar{H}_3 + \bar{H}_4 \quad (2.70)$$

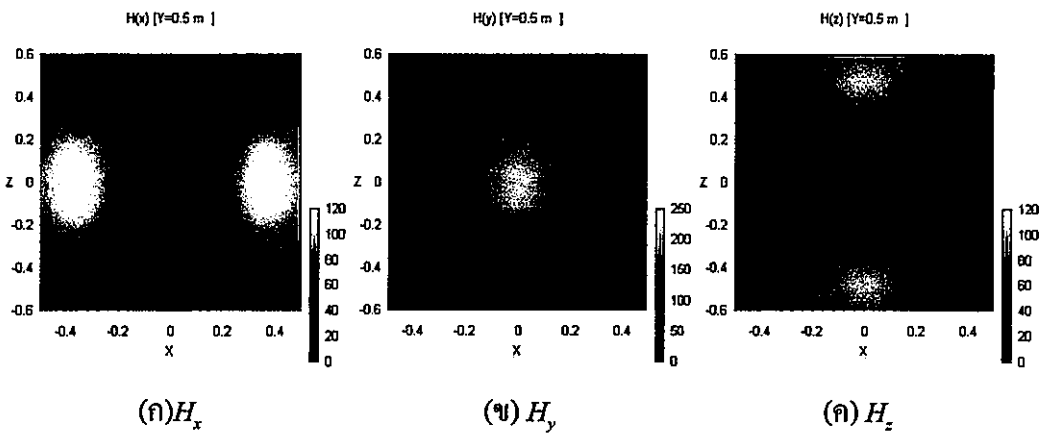
ค่าสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมัดที่เป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแตกองค์ประกอบย่อยของสนาม H_x , H_y และ H_z ได้

$$\bar{H} = H_x\hat{a}_x + H_y\hat{a}_y + H_z\hat{a}_z \quad (2.71)$$

พล็อตสนามแม่เหล็ก โดยแทนค่าขนาด a และ b เท่ากับ 60 cm และ 90 cm ตามลำดับ ซึ่งขนาดของสายอากาศนี้เป็นขนาดที่ออกแบบเพื่อให้ครอบคลุมช่วงลำตัวของผู้ที่เดินผ่านสายอากาศเข้ามาทางแนวแกน x จากนั้นป้อนกระแส เท่ากับ 1 A และพล็อตสนามแม่เหล็กในระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0.5 m โดยค่าแกน x เริ่มจาก -0.5 m ถึง 0.5 m และค่าแกน z เริ่มจาก -0.6 m ถึง 0.6 m ซึ่งความเข้มสนามมีหน่วยเป็นมิลลิแอมแปร์ต่อเมตร (mA/m) ผลของการวิเคราะห์ที่ใช้กฎของ Biot-Savart แสดงดังรูปที่ 2.38 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์นั้นได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม NEC แสดงดังรูปที่ 2.39 จากการเปรียบเทียบข้อมูลตัวเลขที่ได้จากการคำนวณกับการจำลองและเปรียบเทียบรูปทั้ง 2 กรณีพบว่าผลของแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กมีความสอดคล้องกันและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.38 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้กฎของ Biot-Savart



รูปที่ 2.39 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม NEC

2.12 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่ต่ำ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้ อุปกรณ์ การสื่อสารแบบ Inductive coupling ที่ได้กล่าวถึง Load modulation นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศขดลวดที่นิยมใช้กันทั่วไป และการนำกฎของ Biot-Savart มาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ จากนั้นได้แสดงการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดต่างๆ โดยการคำนวณกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

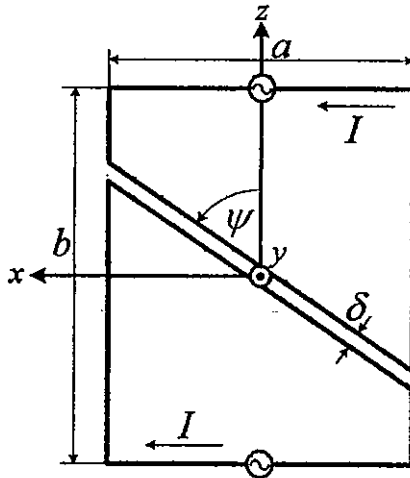
บทที่ 3

การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์

ในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งรูปแบบของสายอากาศจะมีตัวนำที่อยู่ในแนวเฉียงเพื่อให้มีสนามแม่เหล็กครบทุกองค์ประกอบทิศทางอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้งานกับลูกข่ายทุกลักษณะการจัดวาง สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สะดวกในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศ และการวิเคราะห์สายอากาศ ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นได้ใช้กฎของ Biot-Savart คำนวณแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยได้แสดงผลสุดท้ายในแต่ละกรณีเท่านั้น ในส่วนของรายละเอียดการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในภาคผนวกนอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC อีกด้วย

3.1 โครงสร้างของสายอากาศ

โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยบ่วงสี่เหลี่ยมคางหมู 2 บ่วงวางต่อกัน แสดงตามรูปที่ 3.1 ซึ่งมีการจัดกระแสทั้งสองบ่วงต่างเฟสกัน 180 องศา เพื่อให้กระแสที่ไหลในตัวนำแนวเฉียงทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน โดยแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศดังต่อไปนี้ ความกว้างคือระยะ a ความสูงรวมคือระยะ b มุมแนวเฉียงวัดจกตัวนำของสายอากาศคือ ψ และ ระยะห่างระหว่างบ่วงทั้งสองคือ δ

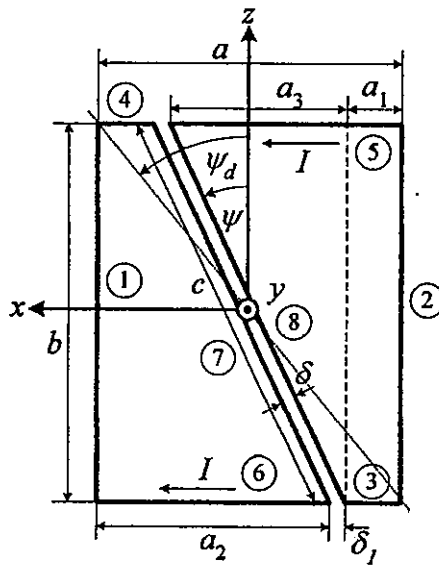


รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

3.2 การวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

การวิเคราะห์ได้แบ่งเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ บ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง และบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จะทำการวิเคราะห์บ่วงทีละด้าน โดยทั้งหมดจะมี 8 ด้านด้วยกัน โดยจะวิเคราะห์กรณีละ 2 ด้าน แบ่งเป็น 4 กรณี สุดท้ายจะทำการรวมผลของทั้ง 4 กรณีเข้าด้วยกันเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กพร้อมค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

3.2.1 การวิเคราะห์กรณีที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง



รูปที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

จากรูปจะเห็นว่ามุมทแยงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\psi_d = \tan^{-1} \frac{a}{b} \quad (3.1)$$

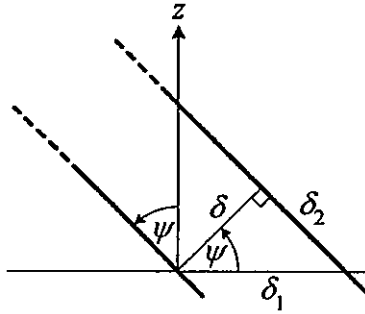
ดังนั้นบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูในกรณีนี้จะได้ว่า $0^\circ \leq \psi < \psi_d$

ความสัมพันธ์ของระยะต่างๆ ของบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากรูปที่ 3.2 คือ

$$a = 2a_1 + a_3 + \delta_1 \quad (3.2)$$

$$c = \frac{b}{\cos \psi} \quad (3.3)$$

ความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้ง 2 บ่วง δ ที่ตัวนำแนวเฉียง

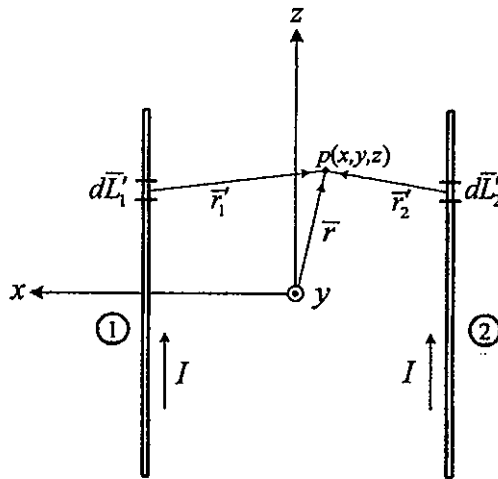


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของระยะ δ ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

จากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\cos \psi} \quad \text{และ} \quad \delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 - \delta^2} \quad (3.4)$$

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ด้านที่ 1 และ 2 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.4 การคำนวณกรณีที่ 1 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 คือ $(x'_1 = \frac{a}{2}, y'_1 = 0, z'_1)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

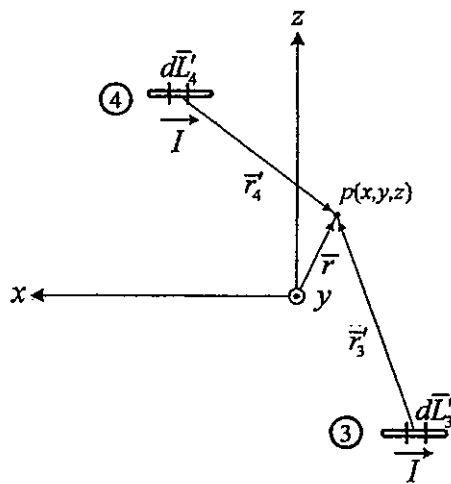
$$\vec{H}_1 = \frac{I \left(\left(x - \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y - y \hat{a}_x \right)}{4\pi \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{4(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (3.5)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 คือ $(x'_2 = \frac{-a}{2}, y'_2 = 0, z'_2)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{H}_2 = \frac{I \left(\left(x + \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y - y \hat{a}_x \right)}{4\pi \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.5) และ (3.6) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ด้านที่ 3 และ 4 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.5 การคำนวณกรณีที่ 2 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 คือ $(x'_3, y'_3 = 0, z'_3 = \frac{-b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

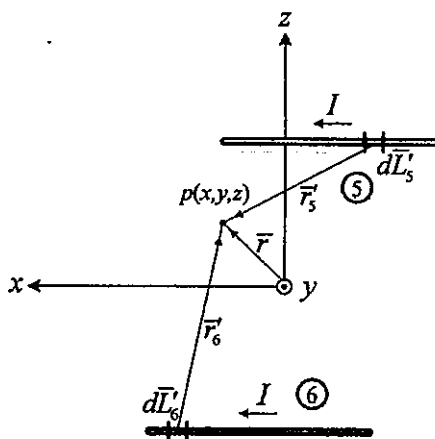
$$\vec{H}_3 = \frac{I \left(y \hat{a}_z - \left(z + \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z + \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a-2(a_1-x)}{\sqrt{(a-2(a_1-x))^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} - \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (3.7)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 คือ $(x'_4, y'_4 = 0, z'_4 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{H}_4 = \frac{I \left(y \hat{a}_z - \left(z - \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z - \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{-a + 2(a_1 + x)}{\sqrt{(a - 2(a_1 + x))^2 + 4y^2 + (b - 2z)^2}} - \frac{a - 2x}{\sqrt{(a - 2x)^2 + 4y^2 + (b - 2z)^2}} \right] \quad (3.8)$$

จากสมการ (3.7) และ (3.8) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 3 การวิเคราะห์ด้านที่ 5 และ 6 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.6 การคำนวณกรณีที่ 3 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 คือ $(x'_5, y'_5 = 0, z'_5 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

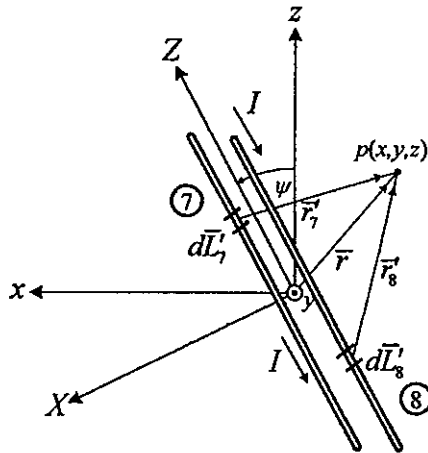
$$\bar{H}_5 = \frac{I \left(y \hat{a}_z - \left(z - \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z - \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a + 2x}{\sqrt{(a + 2x)^2 + 4y^2 + (b - 2z)^2}} - \frac{a - 2(a_2 - x)}{\sqrt{(a - 2(a_2 - x))^2 + 4y^2 + (b - 2z)^2}} \right] \quad (3.9)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 คือ $(x'_6, y'_6 = 0, z'_6 = \frac{-b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I \left(y \hat{a}_z - \left(z + \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z + \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a - 2x}{\sqrt{(a - 2x)^2 + 4y^2 + 4(b + 2z)^2}} + \frac{-a + 2(a_2 + x)}{\sqrt{(a - 2(a_2 + x))^2 + 4y^2 + 4(b + 2z)^2}} \right] \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.9) และ (3.10) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 4 การวิเคราะห์ด้านที่ 7 และ 8 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.7 การคำนวณกรณีที่ 4 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

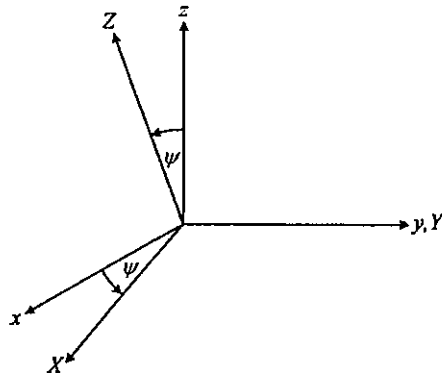
ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 7 คือ $(X'_7 = \frac{\delta}{2}, y'_7 = 0, Z'_7)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ แปลงเป็น $p(X, y, Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{H}_7 = \frac{I \left(-y\hat{a}_x + \left(X - \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(X - \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{c+2Z-\delta_2}{\sqrt{(\delta-2X)^2+4y^2+(c+2Z-\delta_2)^2}} \frac{c-2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta-2X)^2+4y^2+(c-2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (3.11)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 8 คือ $(X'_8 = -\frac{\delta}{2}, y'_8 = 0, Z'_8)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ แปลงเป็น $p(X, y, Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{H}_8 = \frac{I \left(-y\hat{a}_x + \left(X + \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(X + \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{-c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta+2X)^2+4y^2+(-c+2Z+\delta_2)^2}} \frac{c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta+2X)^2+4y^2+(c+2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (3.12)$$

จากนั้นแปลงพิกัด (X, y, Z) ไปเป็น (x, y, z) โดยใช้วิธีแกนหมุน y



รูปที่ 3.8 แกนหมุน y

สมการการหมุนแกน y ที่อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} X &= x \cos \psi - z \sin \psi & \hat{a}_X &= \hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi \\ Y &= y & \text{และ } \hat{a}_Y &= \hat{a}_y \\ Z &= x \sin \psi + z \cos \psi & \hat{a}_Z &= \hat{a}_x \sin \psi + \hat{a}_z \cos \psi \end{aligned} \quad (3.14)$$

ทำการแทนค่าสมการ (3.14) ลงในสมการ (3.11), (3.12) ซึ่งจุดสังเกต $p(x,y,z)$ กับ $p(X,y,Z)$ เป็นจุดเดียวกันจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{H}_7 &= \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left((x \cos \psi - z \sin \psi) - \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left((x \cos \psi - z \sin \psi) - \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \\ &= \left[\frac{c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2}{\sqrt{(\delta - 2(x \cos \psi - z \sin \psi))^2 + 4y^2 + (c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2)^2}} \right. \\ &\quad \left. \frac{c - 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta - 2(x \cos \psi - z \sin \psi))^2 + 4y^2 + (c - 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)^2}} \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\bar{H}_x = \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left((x \cos \psi - z \sin \psi) + \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left((x \cos \psi - z \sin \psi) + \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \quad (3.16)$$

$$\left[\frac{-c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta + 2(x \cos \psi - z \sin \psi))^2 + 4y^2 + (-c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)^2}} \right]$$

$$\left[\frac{c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta + 2(x \cos \psi - z \sin \psi))^2 + 4y^2 + (c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)^2}} \right]$$

จากสมการ (3.15) และ (3.16) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x y และ z ตามลำดับ

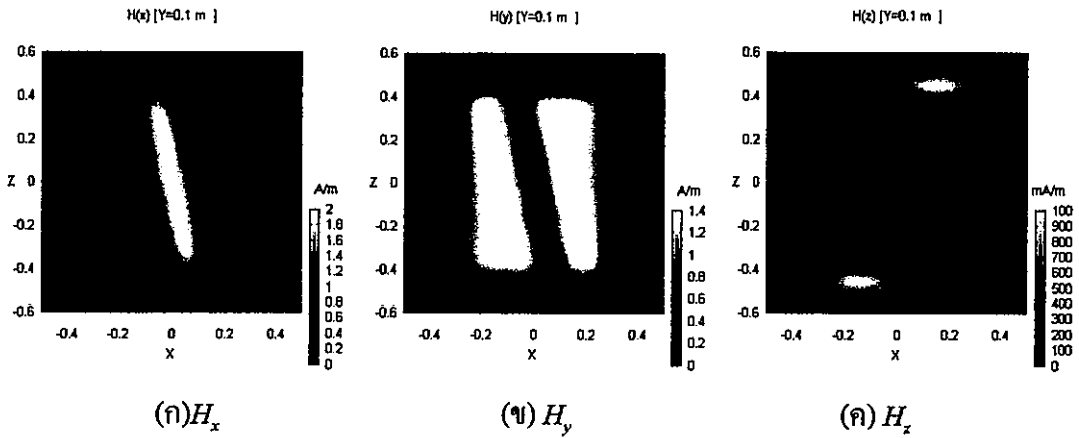
จากสมการสนามทั้ง 4 กรณีได้แก่สมการที่ (3.5) (3.6) (3.7) (3.8) (3.10) (3.9) (3.15) และสมการที่ (3.16) นำมารวมเข้าด้วยกันจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\bar{H} = \bar{H}_1 + \bar{H}_2 + \bar{H}_3 + \bar{H}_4 + \bar{H}_5 + \bar{H}_6 + \bar{H}_7 + \bar{H}_8 \quad (3.17)$$

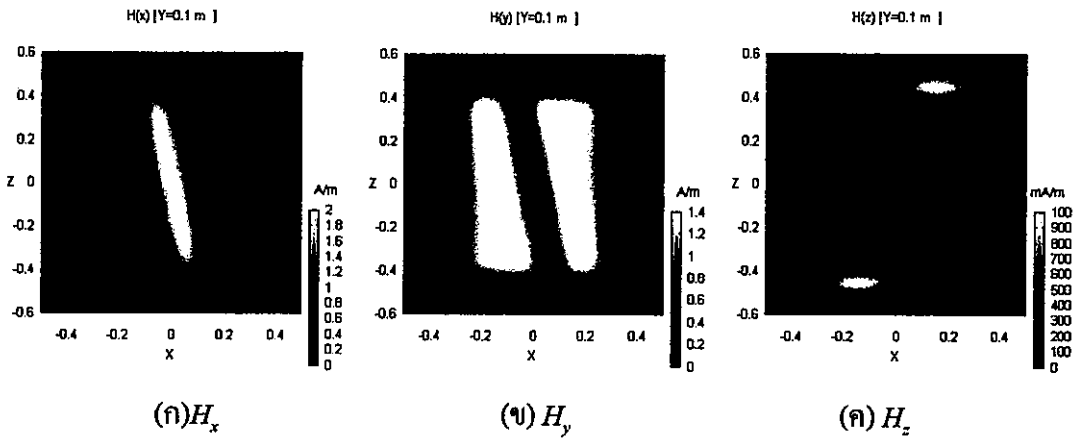
ค่าสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมดที่เป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแตกองค์ประกอบย่อยของสนาม H_x H_y และ H_z ได้จาก

$$\bar{H} = H_x \hat{a}_x + H_y \hat{a}_y + H_z \hat{a}_z \quad (3.18)$$

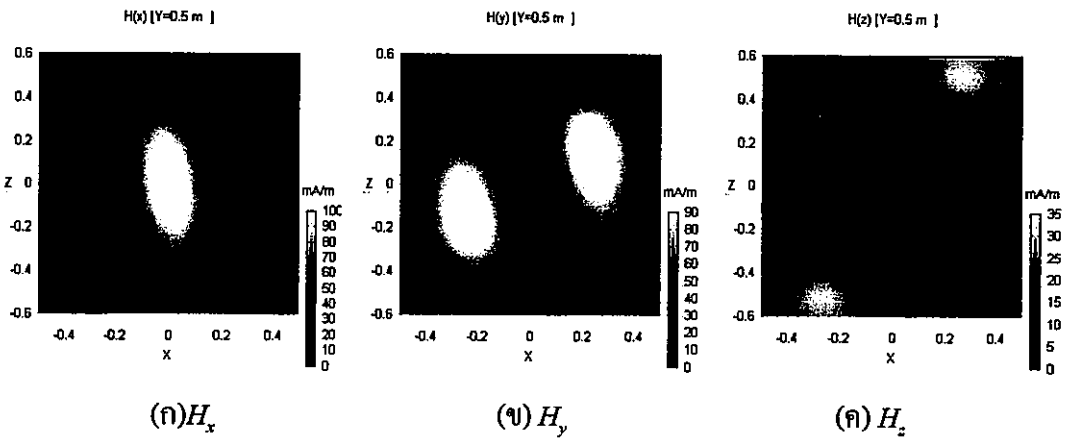
ผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกับ โปรแกรม NEC โดยแทนค่าขนาด a , b เท่ากับ 60 cm 90 cm ตามลำดับ ซึ่งขนาดของ a และ b ที่เลือกนี้เป็นขนาดที่จะนำไปสร้างสายอากาศ ต้นแบบเพื่อทดสอบ ในส่วนของมุม ψ ที่ใช้เปรียบเทียบกับ โปรแกรม NEC เท่ากับ 10 องศา และ 20 องศา ซึ่งในกรณีนี้ ψ_d จะเท่ากับ 33.6 องศา กระแสแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ 1 A ทำการพล็อตสนามแม่เหล็กในระนาบ xz โดยค่าแกน x เริ่มจาก -0.5 ถึง 0.5 m และค่าแกน z เริ่มจาก -0.6 ถึง 0.6 m ที่ระยะ y เท่ากับ 0.1 m และ 0.5 m ตามลำดับ



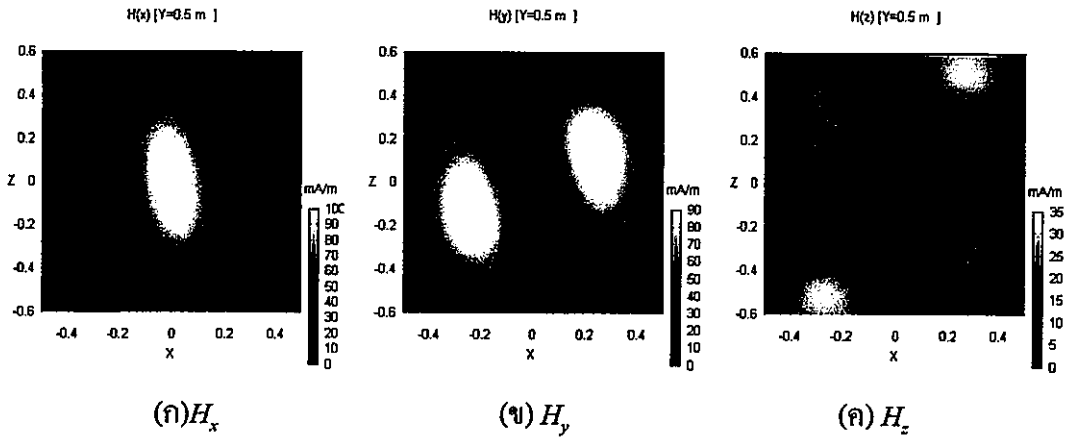
รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



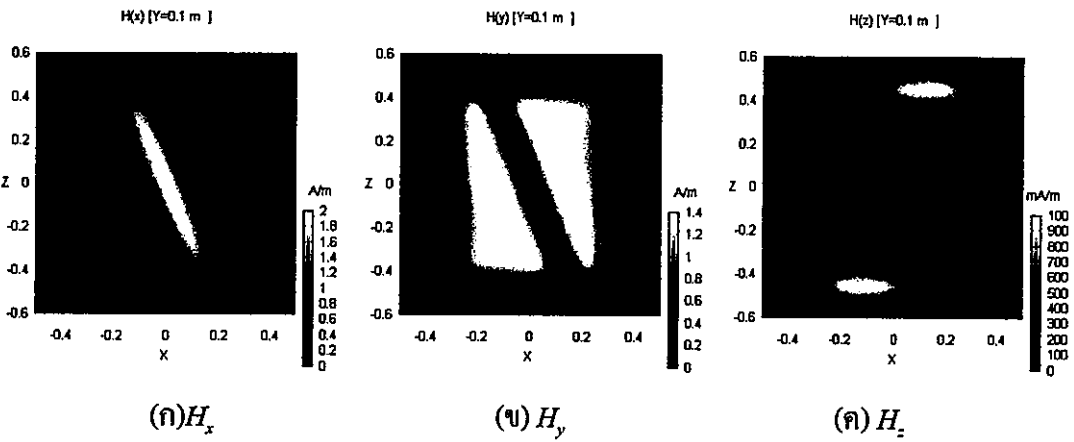
รูปที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



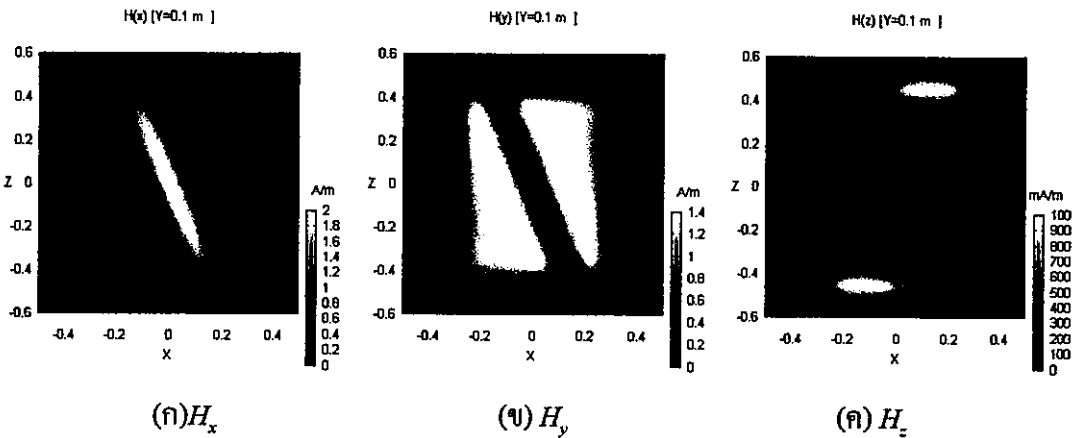
รูปที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



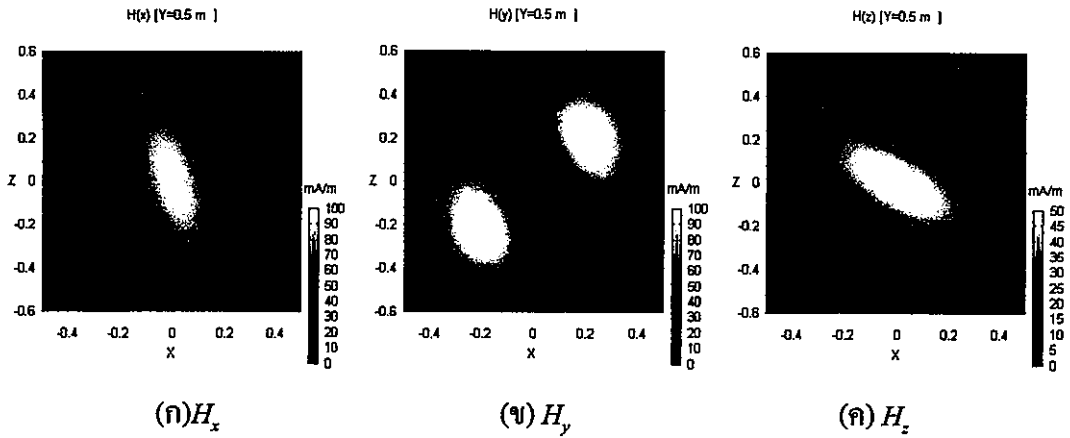
รูปที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 10 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



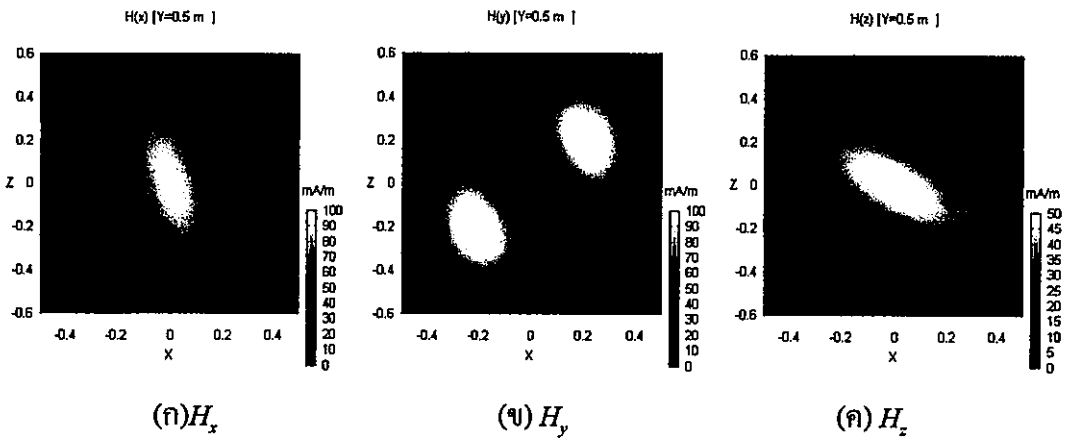
รูปที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



รูปที่ 3.14 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



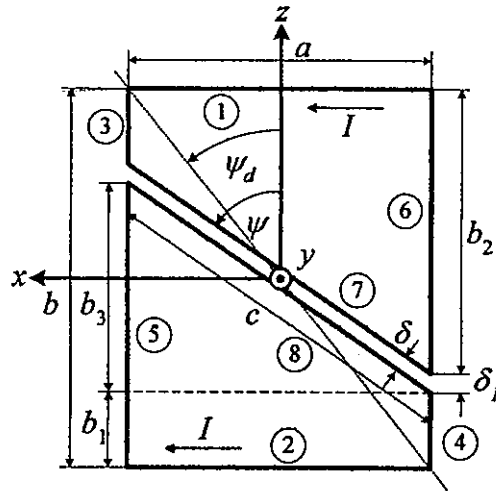
รูปที่ 3.15 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



รูปที่ 3.16 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

จากรูปที่ 3.9 ถึง รูปที่ 3.16 เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก ระหว่างผลการวิเคราะห์กับผลการจำลองโดยโปรแกรม NEC ซึ่งผลของแบบรูปการแพร่กระจายสนาม และ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีและเมื่อได้ตรวจสอบจาก ข้อมูลตัวเลขที่นำมาพล็อตแบบรูปการแพร่กระจายสนามพบว่าผลการวิเคราะห์และผลจาก โปรแกรม NEC มีค่าที่ตรงกันในทุกกรณี

3.2.2 การวิเคราะห์กรณีที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง



รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง

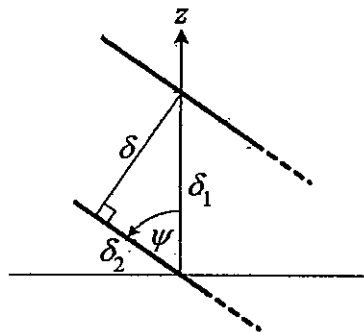
ดังนั้นช่วงคู่ตรงสี่เหลี่ยมคางหมูในกรณีนี้จะได้ว่า $\psi_d < \psi \leq 90^\circ$

ความสัมพันธ์ของระยะต่างๆ ของช่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากรูปที่ 3.17

$$b = 2b_1 + b_3 + \delta_1 \quad (3.19)$$

$$c = \frac{a}{\sin \psi} \quad (3.20)$$

ความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้ง 2 ช่วง δ ที่ตัวนำแนวเฉียง

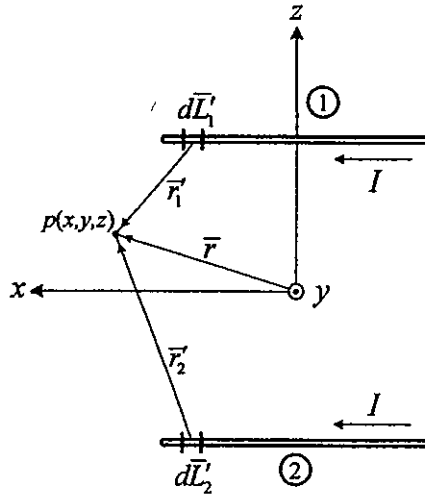


รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ของระยะ δ ของสายอากาศแบบที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง

จากรูปที่ 3.18 จะได้ว่า

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\sin \psi} \quad \text{และ} \quad \delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 - \delta^2} \quad (3.21)$$

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ด้านที่ 1 และ 2 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.19 การคำนวณในกรณีที่ 1 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 คือ $(x'_1, y'_1 = 0, z'_1 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

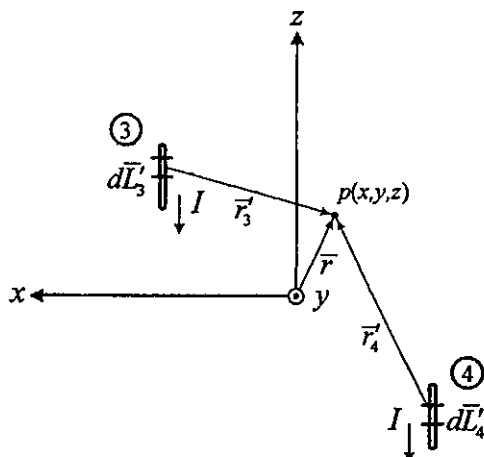
$$\bar{H}_1 = \frac{I \left(-\left(z - \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y + y \hat{a}_z \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z - \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} \right] \quad (3.22)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 คือ $(x'_2, y'_2 = 0, z'_2 = -\frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{H}_2 = \frac{I \left(-\left(z + \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y + y \hat{a}_z \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z + \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.22) และ (3.23) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ด้านที่ 3 และ 4 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.20 การคำนวณในกรณีที่ 2 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 คือ $(x'_3 = \frac{a}{2}, y'_3 = 0, z'_3)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได

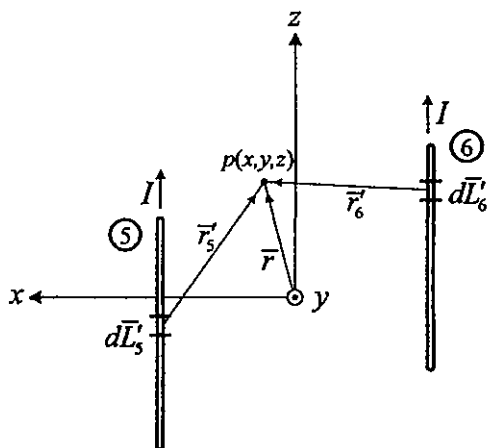
$$\bar{H}_3 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(x - \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} - \frac{-b+2(b_1+z)}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_1+z))^2}} \right] \quad (3.24)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 คือ $(x'_4 = -\frac{a}{2}, y'_4 = 0, z'_4)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได

$$\bar{H}_4 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(x + \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b+2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} + \frac{b-2(b_1-z)}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_1-z))^2}} \right] \quad (3.25)$$

จากสมการ (3.24) และ (3.25) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 3 การวิเคราะห์ด้านที่ 5 และ 6 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.21 การคำนวณในกรณีที่ 3 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 คือ $(x'_5 = \frac{a}{2}, y'_5 = 0, z'_5)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

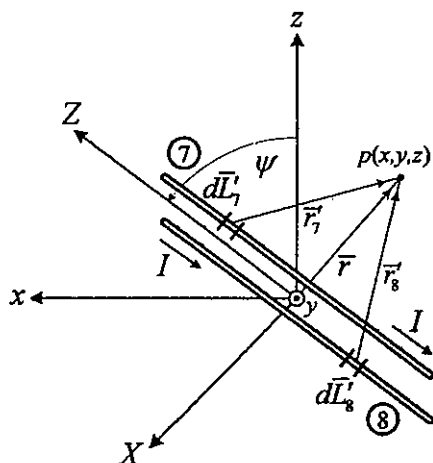
$$\bar{H}_5 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(x - \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b+2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} - \frac{b-2(b_2-z)}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_2-z))^2}} \right] \quad (3.26)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 คือ $(x'_6 = \frac{-a}{2}, y'_6 = 0, z'_6)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(x + \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{-b+2(b_2+z)}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_2+z))^2}} \right] \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.26) และ (3.27) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 4 การวิเคราะห์หัด้านที่ 7 และ 8 ของสายอากาศ



รูปที่ 3.22 การคำนวณในกรณีที่ 4 ของสายอากาศแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด 7 คือ $(X'_7 = \frac{-\delta}{2}, y'_7 = 0, Z'_7)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ แปลงเป็น $p(X,y,Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{H}_7 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(X + \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(X + \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{c+2Z-\delta_2}{\sqrt{(2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c+2Z-\delta_2)^2}} - \frac{c-2Z+\delta_2}{\sqrt{(2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c-2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (3.28)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 8 คือ $(X'_8 = \frac{\delta}{2}, y'_8 = 0, Z'_8)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ แปลงเป็น $p(X,y,Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{H}_8 = \frac{I \left(-y \hat{a}_x + \left(X - \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left(X - \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{-c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(-2X+\delta)^2 + 4y^2 + (-c+2Z+\delta_2)^2}} - \frac{c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(-2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c+2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (3.29)$$

จากสมการที่ (3.28) (3.29) ทำการแปลงพิกัด (X,y,Z) ให้เป็นพิกัด (x,y,z) โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการ (3.14) จะได้

$$\bar{H}_7 = \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left((x \cos \psi - z \sin \psi) + \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left[\left((x \cos \psi - z \sin \psi) + \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right]} \quad (3.30)$$

$$\left[\frac{c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2}{\sqrt{(2(x \cos \psi - z \sin \psi) + \delta)^2 + 4y^2 + (c + 2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2)^2}} \right]$$

$$\left[\frac{c - 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2}{\sqrt{(2(x \cos \psi - z \sin \psi) + \delta)^2 + 4y^2 + (c - 2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)^2}} \right]$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left((x \cos \psi - z \sin \psi) - \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left[\left((x \cos \psi - z \sin \psi) - \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right]} \quad (3.31)$$

$$\left[\frac{-c + 2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)}{\sqrt{(-2(x \cos \psi - z \sin \psi) + \delta)^2 + 4y^2 + (-c + 2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2))^2}} \right]$$

$$\left[\frac{c + 2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)}{\sqrt{(-2(x \cos \psi - z \sin \psi) + \delta)^2 + 4y^2 + (c + 2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2))^2}} \right]$$

จากสมการ (3.30) และ (3.31) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x y และ z ตามลำดับ

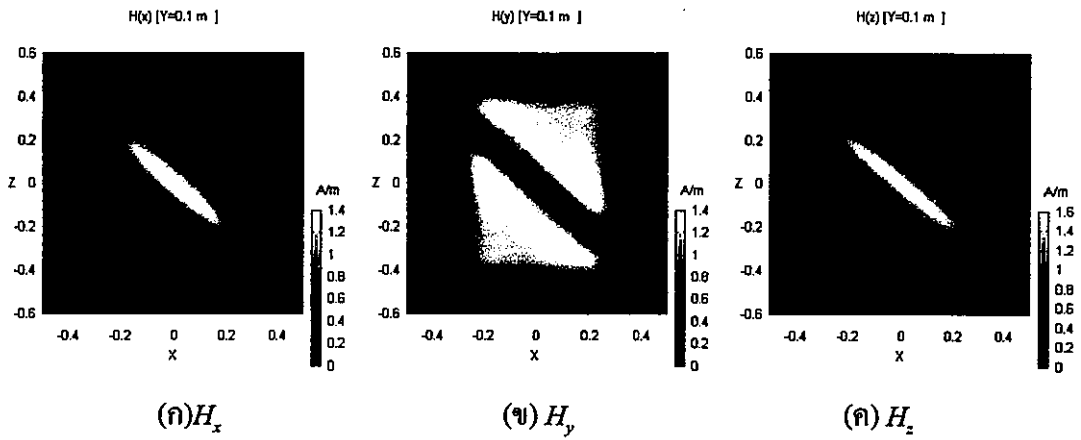
จากสมการสนามทั้ง 4 กรณีได้แก่สมการที่ (3.22) (3.23) (3.24) (3.25) (3.26) (3.27) (3.30) และ (3.31) นำมารวมเข้าด้วยกันจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง

$$\bar{H} = \bar{H}_1 + \bar{H}_2 + \bar{H}_3 + \bar{H}_4 + \bar{H}_5 + \bar{H}_6 + \bar{H}_7 + \bar{H}_8 \quad (3.32)$$

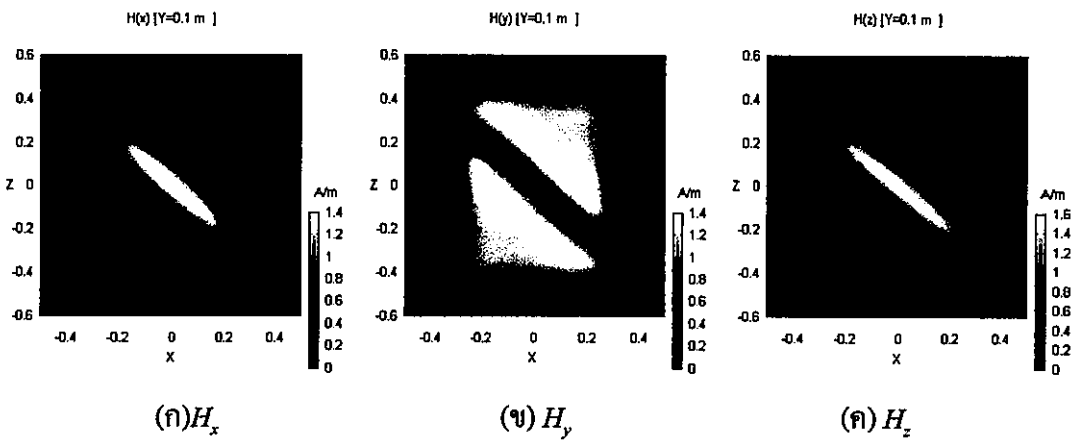
ค่าสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมดที่เป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแตกองค์ประกอบย่อยของสนาม H_x H_y และ H_z ได้

$$\bar{H} = H_x \hat{a}_x + H_y \hat{a}_y + H_z \hat{a}_z \quad (3.33)$$

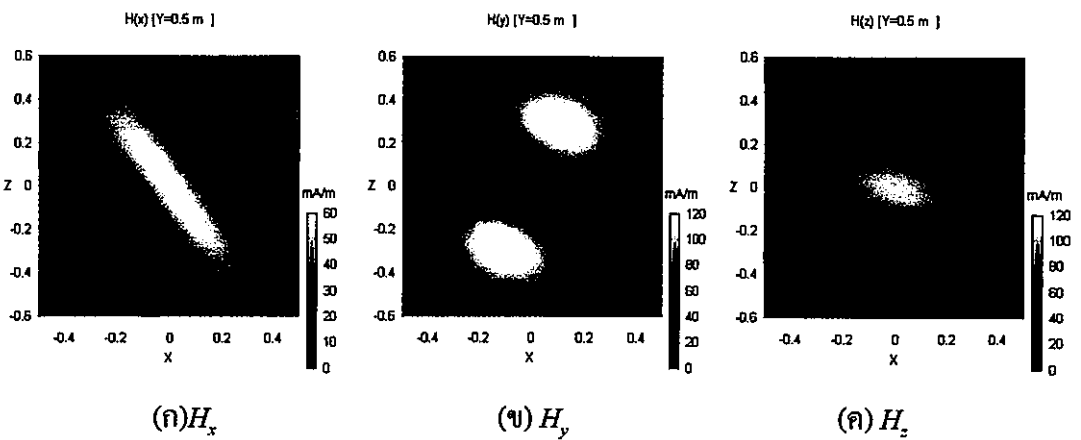
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และผลจากโปรแกรม NEC เช่นเดียวกันกับวิธีในข้างต้น แต่กระทำที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา และ 60 องศา พล็อตแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กในระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0.1 m และ 0.5 m



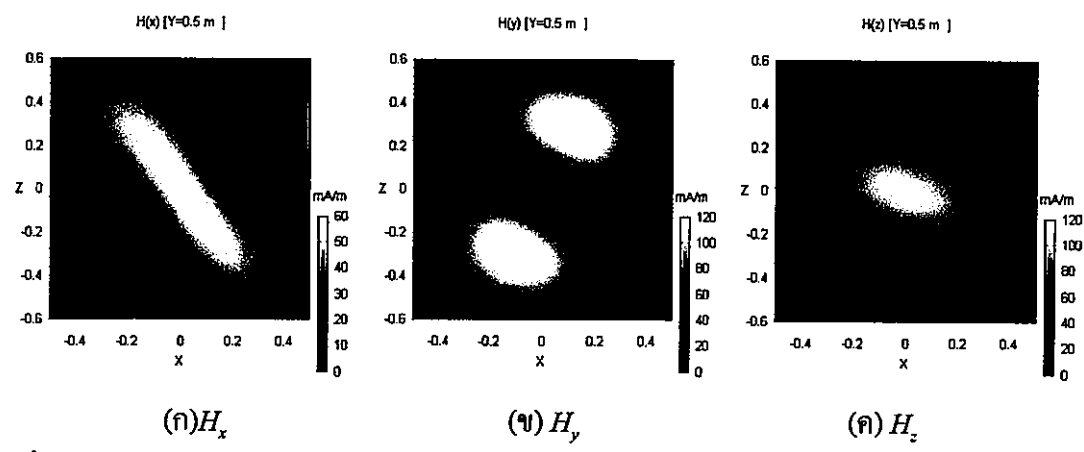
รูปที่ 3.23 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



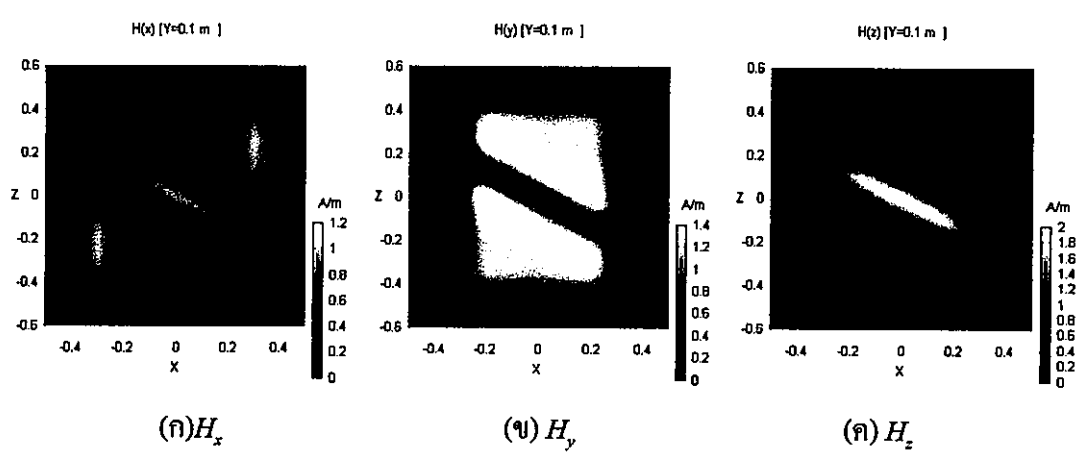
รูปที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



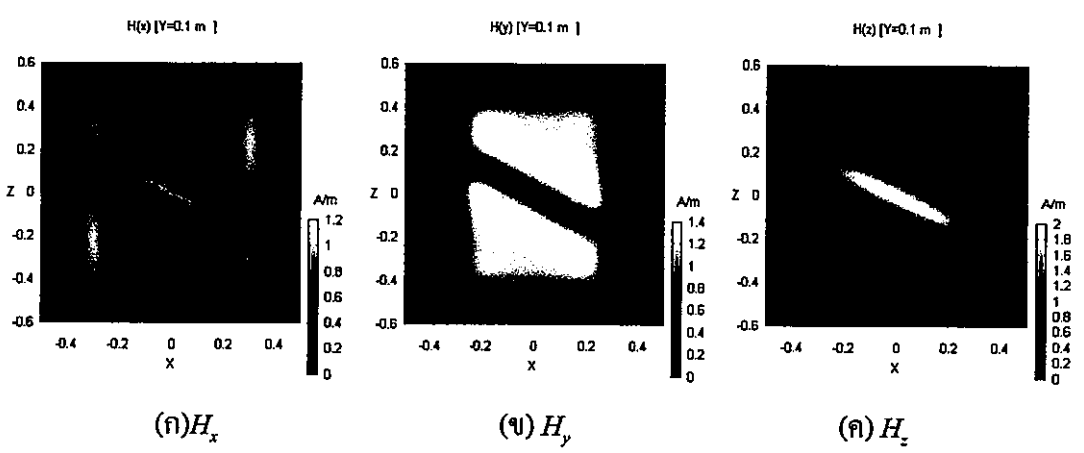
รูปที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



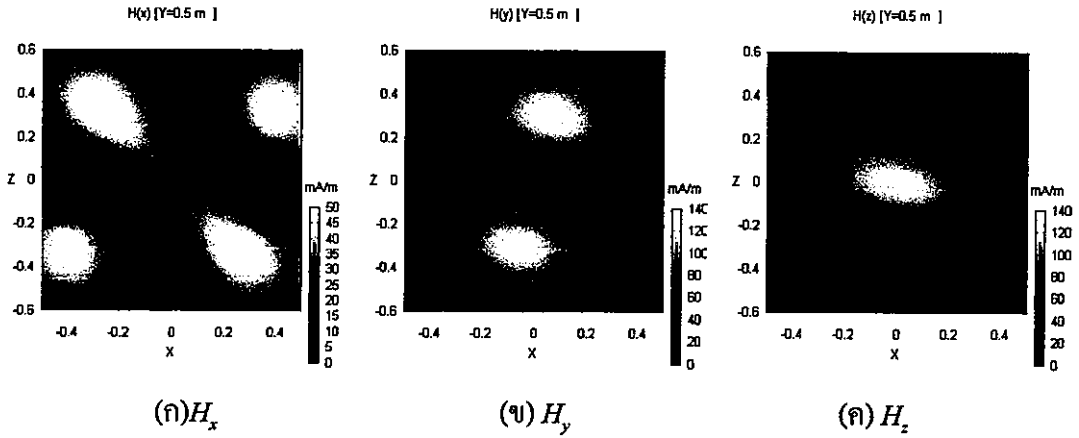
รูปที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



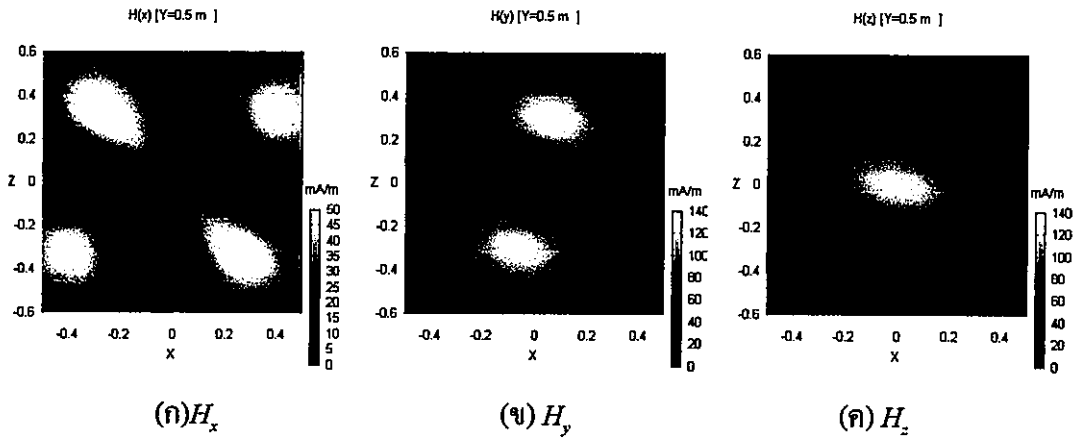
รูปที่ 3.27 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



รูปที่ 3.28 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.1 m



รูปที่ 3.29 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้กฎของ Biot-Savart ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



รูปที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 60 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

จากรูปที่ (3.23) ถึงรูปที่ (3.30) พบว่าผลของแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแบบที่มุม ψ มากกว่ามุมทแยง ทั้งจากการวิเคราะห์และจากโปรแกรม NEC มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างมากเช่นเดียวกับผลของกรณีในข้างต้น

3.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงรูปแบบโครงสร้างสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศและการวิเคราะห์สายอากาศโดยใช้กฎของ Biot-Savart ในการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูนั้น ได้แบ่งการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูออกเป็น 2 แบบ ซึ่งในแต่ละแบบจะมีการแบ่งการคำนวณย่อยๆ ไปอีกแบบละ 4 กรณีด้วยกันเพื่อเป็นการง่ายต่อการคำนวณ และในขั้นตอน

สุดท้ายของแต่ละแบบได้นำเอาผลการคำนวณแต่ละกรณีมารวมกันเป็นผลลัพธ์สุดท้าย โดยแสดงในรูปของแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กในและองค์ประกอบทิศทางพร้อมด้วยความเข้มของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม NEC ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และในบทต่อไปจะแสดงการจำลองและผลการจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

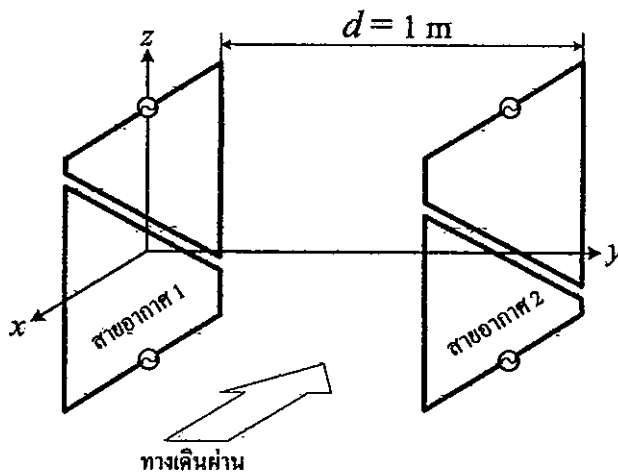
บทที่ 4

การจำลองผลสายอากาศ

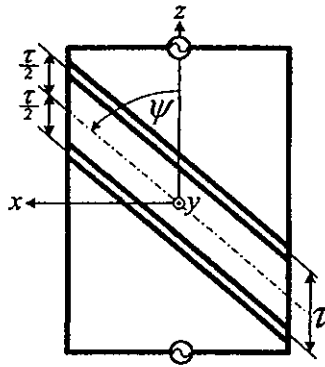
ในบทนี้จะแสดงการจำลองผลสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิว และ ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรระหว่างสายอากาศ เพื่อต้องการทราบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีความแรงเพียงพอครอบคลุมบริเวณเชิงเส้น เชิงพื้นผิว และเชิงปริมาตรระหว่างสายอากาศที่ต้องการมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เองที่จะนำไปสู่การสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

4.1 การจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสม

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบนั้น เริ่มจากการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กก่อน จากนั้นจึงนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น (Percentage of line) ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิว (Percentage of surface) และ ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรระหว่างสายอากาศ (Percentage of volume) ซึ่งเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิว และ เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร บ่งบอกถึงอัตราการครอบคลุมพื้นผิวและปริมาตร ระหว่างสายอากาศของสนามแม่เหล็กที่มีค่าเกินระดับเริ่มเปลี่ยน (threshold) โครงสร้างของสายอากาศจะเป็นสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดวางแบบประตูเดินผ่าน (Walk-through) แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ซึ่ง d คือ ระยะห่างของสายอากาศทั้งสองชุด โดยกำหนดให้เท่ากับ 1 m เพื่อกำหนดให้ใช้กับทางเดินที่มีความกว้างเท่ากับ 1 m และ r คือ ระยะเอียงของแนวตัวนำเลี้ยงของสายอากาศที่มองจากทางด้านข้างแสดงดังรูปที่ 4.2

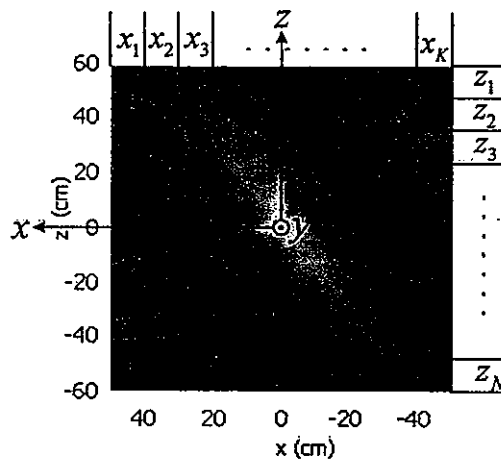


รูปที่ 4.1 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดวางแบบประตูเดินผ่าน



รูปที่ 4.2 การจัดวางแบบประตูเดินผ่าน โดยมองจากด้านข้าง

การพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น และ เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ จะใช้แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของแต่ละองค์ประกอบทิศทางในระนาบ xz มาพิจารณา ซึ่งพื้นที่ผิวที่ใช้จะมีขนาดความกว้าง 100 cm ความสูง 120 cm โดยการแบ่งระยะตามแนว z ออกเป็นเส้นย่อยๆ เป็นจำนวน N ส่วนตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การแบ่งระยะตามแนว x และ z ออกเป็นส่วนย่อย

ซึ่งในแต่ละเส้นของ z_n นั้นจะแบ่งย่อยระยะตามแนว x ออกเป็นส่วน ๆ เป็นจำนวน K ส่วน และจากนั้นพิจารณาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแต่ละส่วน $H(x_k)$ เปรียบเทียบกับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) H_t ระดับของจุดเริ่มเปลี่ยนนี้ได้จากการทดสอบร่วมกับการจำลอง โดยวัฏจักรการอ่านไกลที่สุดจากลูกข่าย ไปยังเครื่องอ่านแล้วนำระยะอ่าน ไกลสุดนี้ไปจำลองผลเพื่อหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนซึ่งจะเท่ากับ 245 mA/m (สำหรับลูกข่ายแบบ ISO Card และเครื่องอ่านรุ่นที่ใช้ในงานวิจัย) ในกรณีที่สมมติการป้อนแหล่งจ่ายกระแสสายอากาศเครื่องอ่านเท่ากับ 1 A เหตุที่ต้องใช้การสมมติกระแสแหล่งจ่ายเพราะไม่สามารถวัดกระแสที่ป้อนให้แก่สายอากาศได้โดยตรง เนื่องจากเครื่องมือ

วัดมีผลกระทบต่อระยะการอ่านของเครื่องอ่านเป็นอย่างมากดังนั้นผลจะมีความผิดพลาดมาก การหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยน โดยใช้วิธีนี้พอจะมีความน่าเชื่อถือได้ เพราะได้ทดสอบกับสายอากาศของเครื่องอ่านหลายแบบหลายรูปทรง พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เชิงเส้นนั้นจะพิจารณาจากการนำสายอากาศไปใช้ในทางปฏิบัติ คือ ถูกข่ายจะเคลื่อนจากประตูด้านเข้าไปยังประตูด้านออกดังนั้นถ้าจุดใดจุดหนึ่งในแนวเส้นตรง (แนวแกน x) ที่พิจารณาอยู่จากด้านเข้าไปยังด้านออก มีค่า $H(x_k) \geq H$, ควรจะถือว่าเส้นตรงเส้นนั้นมีค่า $P_i(z_n) = 100\%$ ในทางกลับกันถ้าทุกจุดบนเส้นตรงจากด้านเข้าไปยังด้านออกมีค่า $H(x_k) < H$, เส้นตรงนั้นจะมีค่า $P_i(z_n) = 0\%$ เสร็จแล้วนำค่า $P_i(z_n)$ นั้นมาใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวดังสมการต่อไปนี้

$$P_s(y_m) = \frac{\sum_{n=1}^N P_i(z_n)}{N} ; P_s(y_m) \leq 100\% \tag{4.1}$$

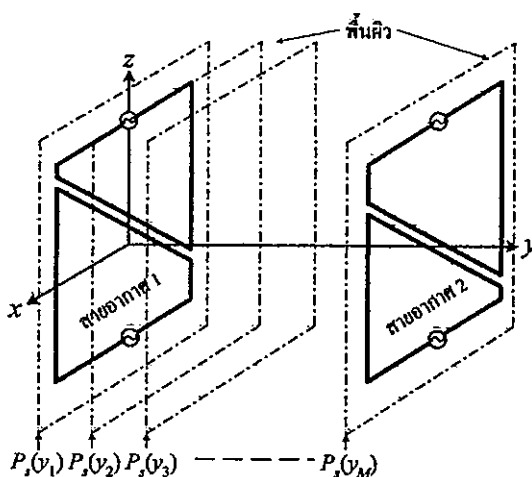
ซึ่ง N คือ จำนวนเส้นทั้งหมดที่แบ่งตามแนวแกน z

$P_s(y_m)$ คือ เปอร์เซนต์เชิงพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง y_m ใดๆ

n เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, N$

m เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, M$

จากการพิจารณาในกรณีของแต่ละพื้นผิวจาก $y = 0$ ถึง 100 cm จึงสามารถคิดในกรณีทั้งปริมาตรระหว่างสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.4 ได้ดังนี้คือ



รูปที่ 4.4 การพิจารณาเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร

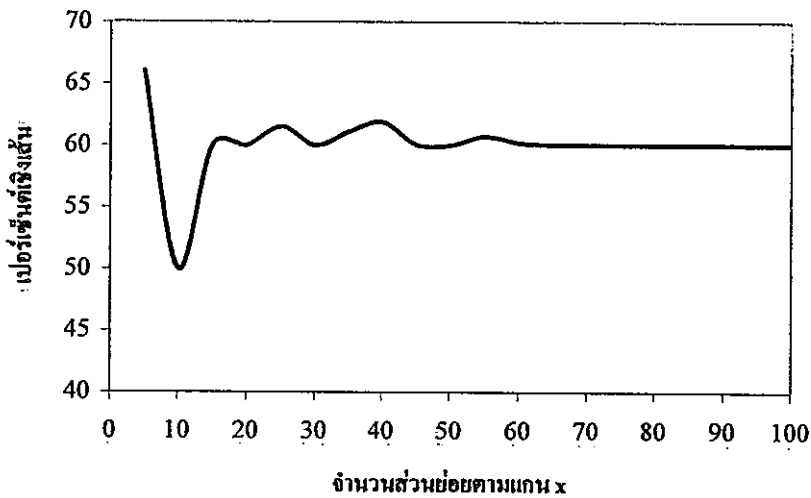
$$P_v = \frac{\sum_{m=1}^M P_s(y_m)}{M} ; P_v \leq 100\% \quad (4.2)$$

ซึ่ง M คือ จำนวนทั้งหมดของพื้นผิวที่แบ่งตามแนวแกน y

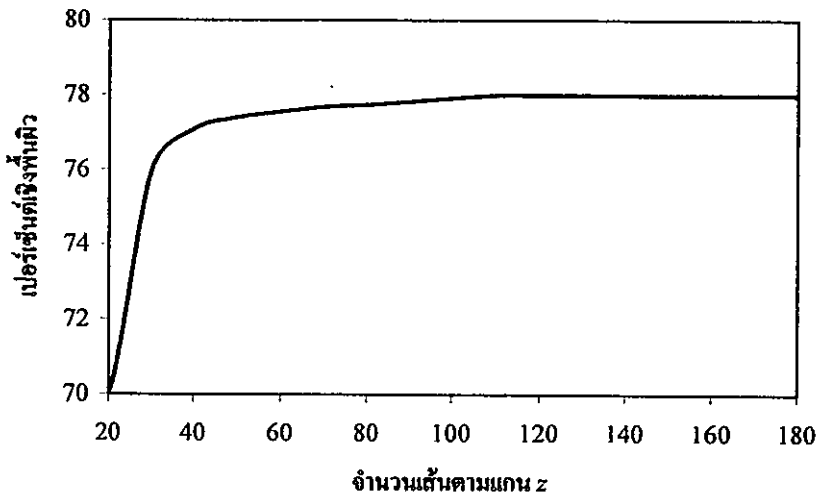
P_v คือ เปอร์เซนต์เชิงปริมาตร

m เท่ากับ $1, 2, 3, \dots, M$

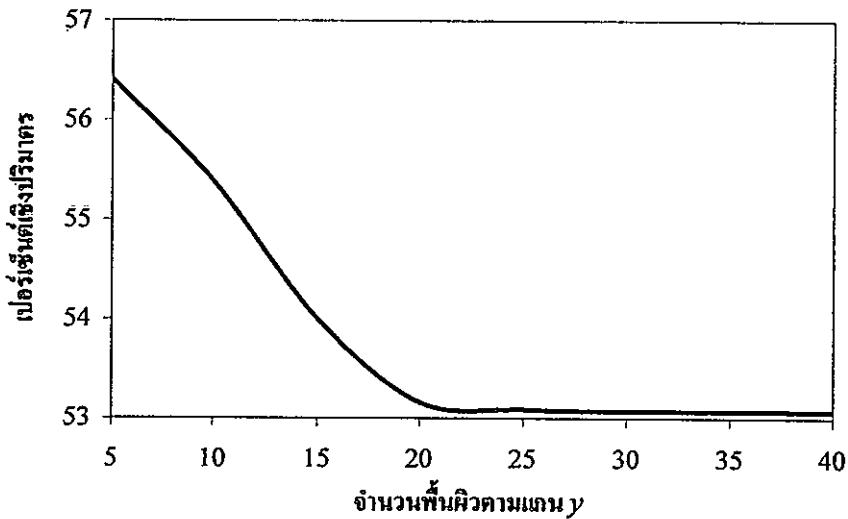
ความละเอียดในการแบ่งส่วนย่อย ในแนว x, y และ z เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน เพราะจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ผลลัพธ์เกิดการลู่เข้า (converge) ซึ่งการแบ่งส่วนย่อยที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.5 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 การหาค่าลู่เข้าในการแบ่งส่วนย่อยตามแกน x

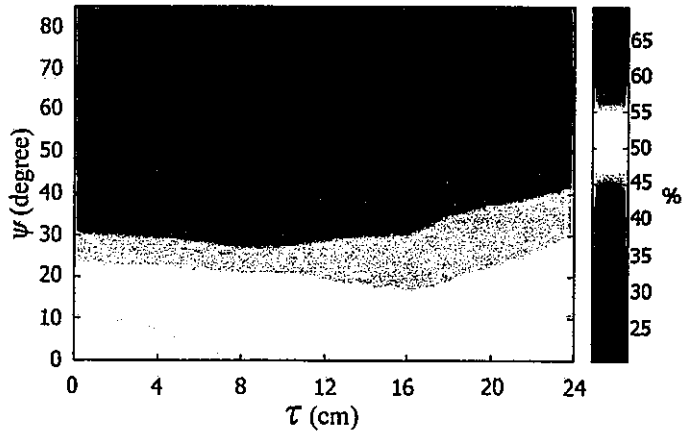


รูปที่ 4.6 การหาค่าคู่เข้าในการแบ่งจำนวนเส้นตามแกน z

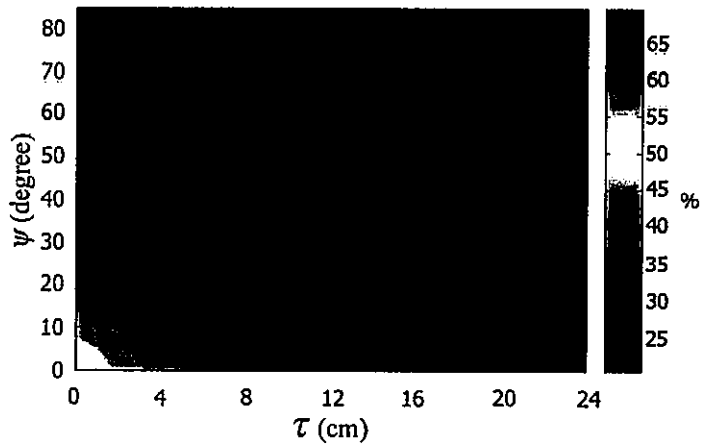


รูปที่ 4.7 การหาค่าคู่เข้าในการแบ่งจำนวนพื้นผิวทั้งหมดตามแกน y

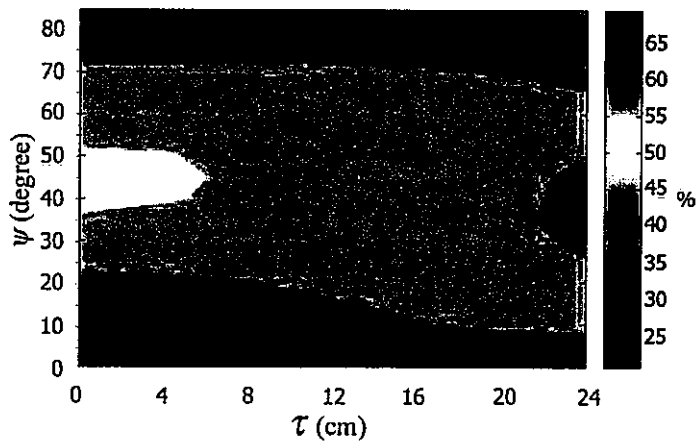
การหาค่าคู่เข้าของทั้ง 3 รูปนั้นมาจาก แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก H_y ของสายอากาศ บ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จัดแบบประตูดินผ่านโดยจัดเฟสสายอากาศแต่ละชุดต่างกัน 180 องศา ซึ่งมี ระยะ d เท่ากับ 1 m a เท่ากับ 60 cm และ b เท่ากับ 90 cm โดยสายอากาศแต่ละชุดซึ่งจำนวน ส่วนย่อยตามแกน x ที่เลือกไว้คือ 60 ส่วน จำนวนเส้นตามแกน z เลือกใช้ 100 ส่วน และจำนวน ส่วนย่อยพื้นผิวตามแกน y เลือกใช้ 20 ส่วน โดยสนามแม่เหล็ก H_x และ H_z มีลักษณะค่าการคู่เข้าที่เป็นไปในทางเดียวกัน กล่าวคือมีลักษณะกราฟที่สอดคล้องกันและมีค่าคู่เข้าค่าเดียวกันและสามารถนำไปใช้กับกรณีของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูได้ทุกกรณี



(ก) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x

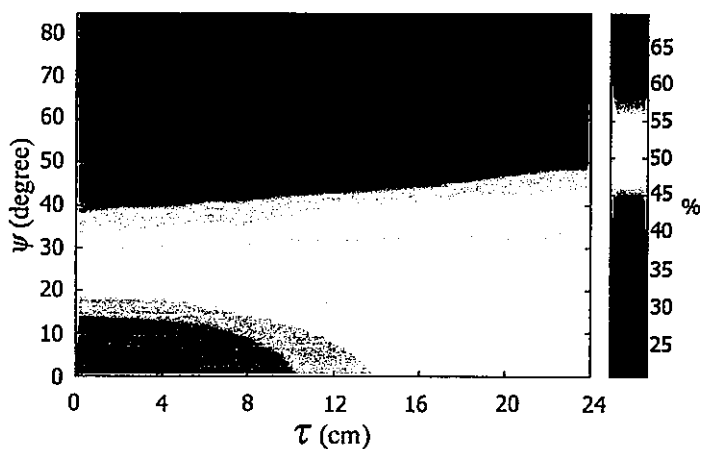


(ข) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_y

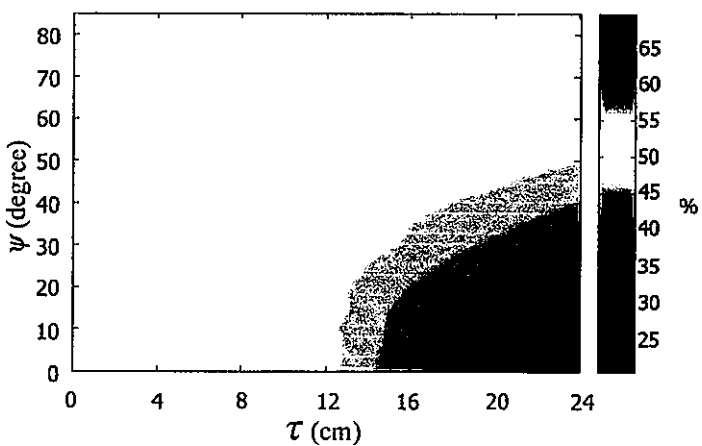


(ค) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_z

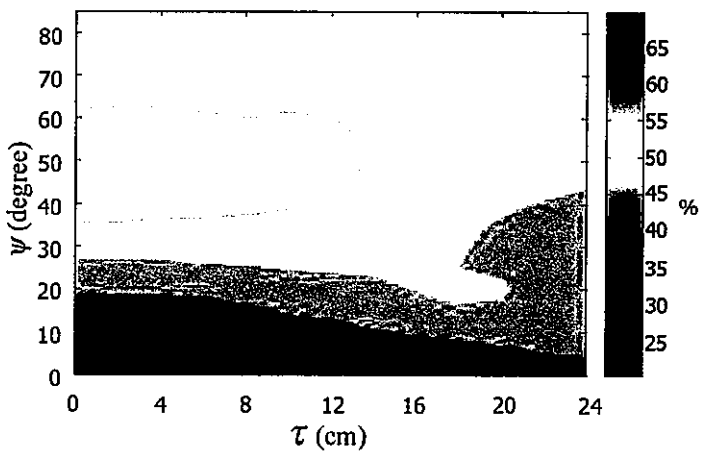
รูปที่ 4.8 เปอร์เซนต์เชิงปริมาตร กรณีกระแสสายอากาศทั้งสองจุดเฟสตรงกัน



(ก) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x



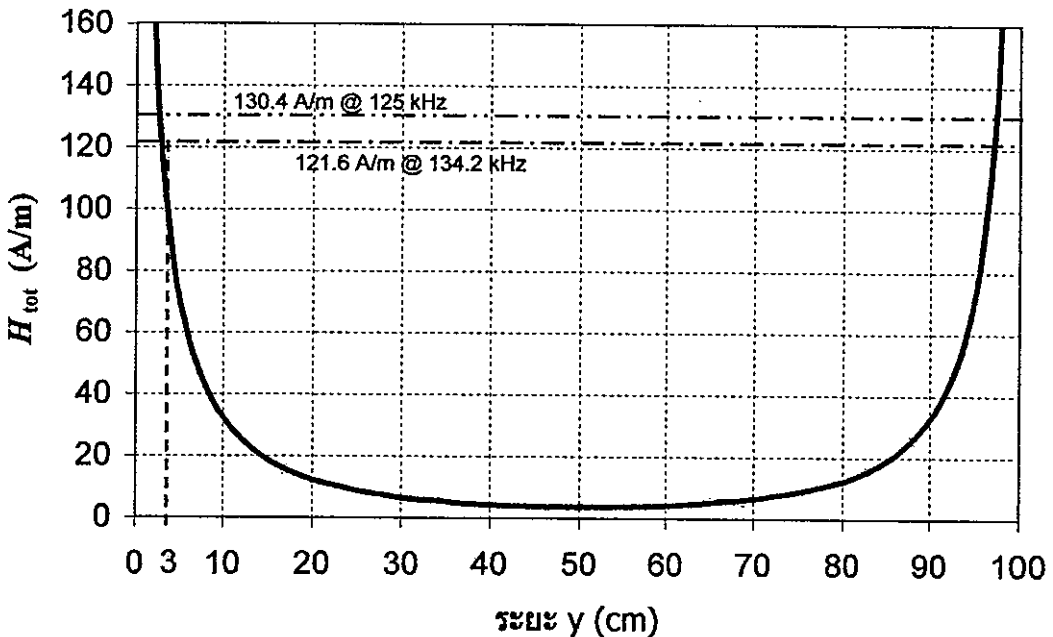
(ข) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_y



(ค) เปอร์เซนต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_z

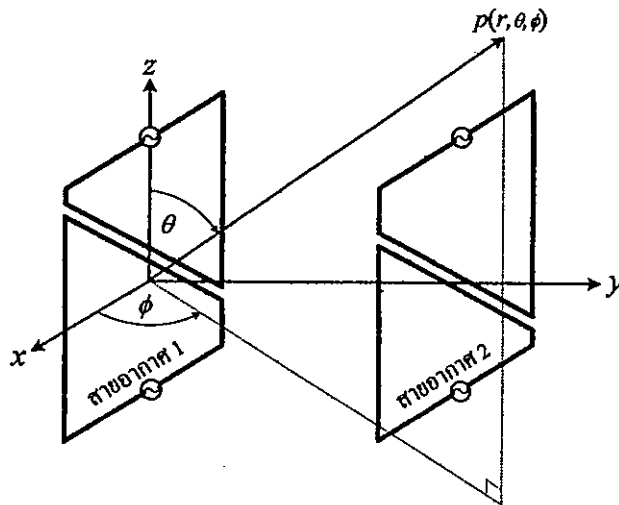
รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์เชิงปริมาตร กรณีกระแสสายอากาศทั้งสองต่างเฟสกัน 180 องศา

สำหรับในการจำลองผลได้ให้ a เท่ากับ 60 cm และ b เท่ากับ 90 cm ทำการเปลี่ยนค่ามุม ψ และระยะ r เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่คิดควรจะมีค่าไม่น้อยกว่า 50% หมายถึงบริเวณที่ใช้งานได้อย่างน้อยควรจะมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาตรซึ่งพิจารณาจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก H_x , H_y , และ H_z ที่แพร่กระจายอยู่ระหว่างสายอากาศ ผลที่ได้มีอยู่ 2 กรณี คือ กรณีป้อนกระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกัน และป้อนกระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสต่างกัน 180 องศา ผลของกรณีแรกแสดงดังรูปที่ 4.8 แกนนอนของกราฟแสดงค่า r และแกนตั้งแสดงค่ามุม ψ ซึ่ง การพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมจากกราฟต้องหาจุดที่ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x , H_y , และ H_z ตำแหน่งเดียวกันซึ่งมีค่ามากที่สุด และจะต้องมีค่าใกล้เคียงกัน ในการหาที่เหมาะสมจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ซึ่งจากรูปที่ 4.8 จุดที่ดีที่สุดจะได้ค่า r ประมาณ 0 cm และ ψ ประมาณ 45 องศา ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x ประมาณ 48% H_y ประมาณ 65% และ H_z ประมาณ 50% แสดงในรูปที่ 4.8(ก)-4.8(ค) ตามลำดับ แต่สังเกตว่า H_x ที่ประมาณ 48% เป็นค่าที่อนุโลมให้ใช้ได้เนื่องจากตำแหน่งอื่นๆที่ H_x เกิน 50% นั้น H_y และ H_z จะมีค่าน้อยลงไป ในส่วนของกรณีกระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสต่างกัน 180 องศา กราฟแสดงดังรูปที่ 4.9 จุดที่ดีที่สุดจะได้ค่า r ประมาณ 18 cm และ ψ ประมาณ 20 องศา จากรูปที่ 4.9(ก)-4.9 (ค) มีค่าประมาณ 55% 60% และ 55% ตามลำดับ จากการจำลองผลจะเห็นว่ากรณีกระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสต่างกัน 180 องศา ให้ผลดีที่สุด จากนั้นได้นำกรณีที่ดีที่สุดนี้ไปจำลองจำลองผลมาตรฐานความปลอดภัยต่อไป



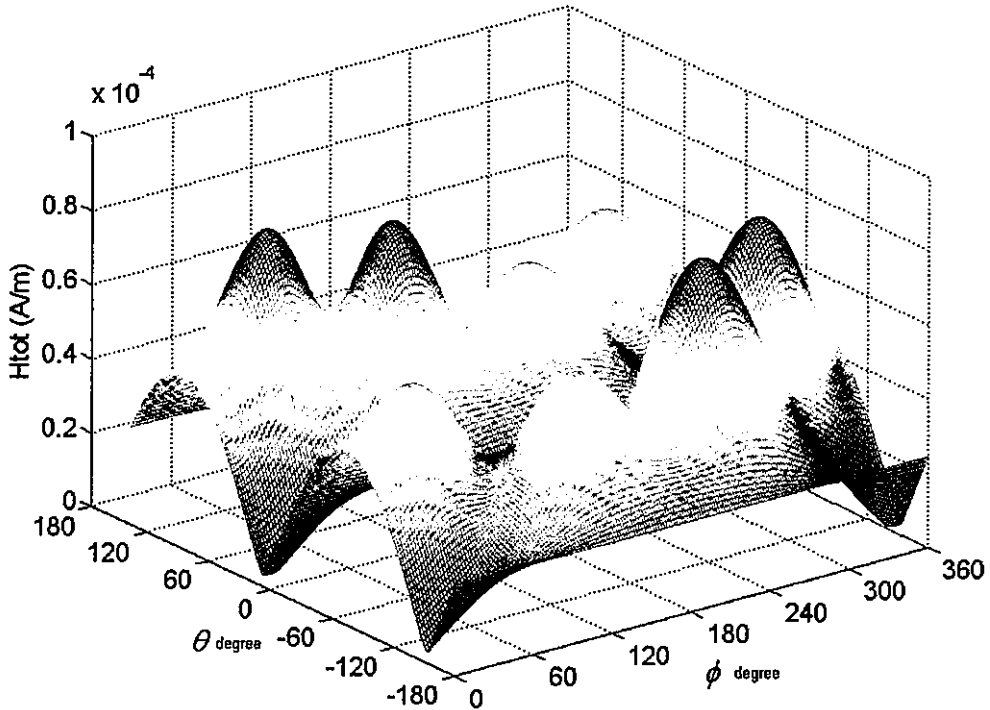
รูปที่ 4.10 ความเข้มของสนามแม่เหล็กรวมระหว่างช่องทางเดินผ่าน

การจำลองผลมาตรฐานความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1-3.0 MHz ซึ่งสายอากาศที่จำลองมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างช่องทางเดินไม่เกินมาตรฐานซึ่งตามมาตรฐานจะต้องมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ไม่เกิน 130.4 A/m ที่ความถี่ 125 kHz และ 121.6 A/m ที่ความถี่ 134.2 kHz กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างช่องทางเดินผ่านสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.10 จะสังเกตเห็นได้ว่าจากตัวสายอากาศมาถึงระยะ 3 cm ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเกินมาตรฐาน ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องใส่วัสดุครอบสายอากาศที่มีความหนารวม 6 cm



รูปที่ 4.11 การพิจารณามุมยกและมุมกวาดเพื่อหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร

ในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร พิจารณาจากรูปที่ 4.11 มุม θ แสดงมุมยก และ มุม ϕ แสดงมุมกวาดโดยกำหนดให้ระยะ r มีค่าเท่ากับ 10 เมตร แล้วเลื่อนจุดสังเกตไปรอบๆตัวสายอากาศเป็นทรงกลม ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมตามมาตรฐานจะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB μ A/m หรือ 3.9 mA/m นั้นจากการจำลองพบว่า ที่ระยะ 10 เมตร รอบๆตัวสายอากาศ มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมมากที่สุด 81.2 μ A/m ซึ่งอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร รอบๆตัวสายอากาศ

ค่ากระแสที่ใช้ในการจำลองผลมาตรฐานความปลอดภัยนั้นหามาจากการวัดกระแสเอาท์พุทสูงสุดของเครื่องอ่านที่เข้าสู่สายอากาศ ซึ่งจากเครื่องอ่านที่ใช้วัดได้ 1.025 A และจำนวนขดลวดของสายอากาศคือ 16 รอบ เพราะฉะนั้น กระแสรอบจึงเท่ากับ 16.4 A แล้วนำค่ากระแสรอบนี้ไปจำลองผล อย่งไรก็ตามค่ากระแสที่วัดโดยตรงจากเครื่องอ่าน อาจมีความผิดพลาดไปบ้างด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไว้แล้ว แต่ก็สามารถนำมาพิจารณาอย่างคร่าวๆได้

4.2 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงการจำลองผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งหาได้จาก เปอร์เซ็นต์เชิงเส้น เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวและเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร ผลของเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรมี 2 กรณีคือ กรณีที่สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน และกรณีที่สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสต่างกัน 180 องศา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์หาจุดที่มีค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของปริมาตร และจะต้องอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทั้ง 3 กราฟ แต่ในกรณีที่กระแสสายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกันนั้น สนามแม่เหล็ก H_x ได้ประมาณ 48% ซึ่งไม่ถึงครึ่งของปริมาตร แต่พอจะอนุโลมได้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองนี้สามารถนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทดสอบต่อไป ในส่วนของการพิจารณามาตรฐานความปลอดภัยที่ความถี่ใช้งานพบว่า อยู่ในขอบเขตของมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

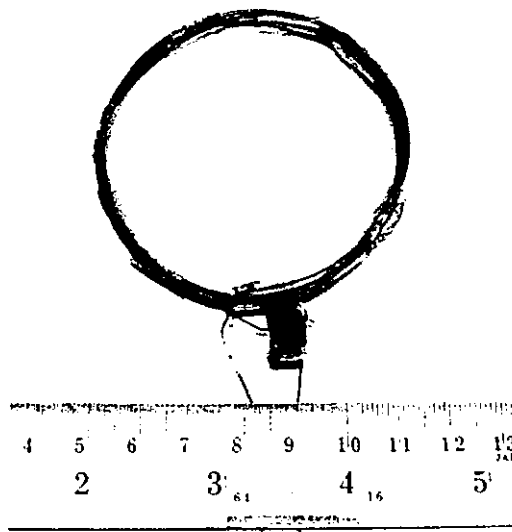
บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศ

ในบทนี้จะแสดงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กับสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูทั้ง 2 แบบ และการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่กับเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศประจูดินผ่านแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เปรียบเทียบกับสายอากาศคั่นแบบ นอกจากนี้ได้ทดสอบระยะห่างไกลที่สุดระหว่างสายอากาศทั้งสองชุดอีกด้วย

5.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กต้องใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก (Gauss Teslar Meter) ที่สามารถใช้งานได้ที่ความถี่ 125 kHz ได้ แต่เนื่องจากไม่มีเครื่องมือดังกล่าว จึงต้องสร้างอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กขึ้นเอง โดยใช้ขดลวดวงกลมต่อกับตัวเก็บประจุเป็นวงจรรีโซแนนซ์ แสดงดังรูปที่ 5.1 จากนั้นต่อวงจรดังกล่าวเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดแรงดันตกคร่อมซึ่งค่าแรงดันตกคร่อมวงจรนี้สามารถนำมาพล็อตเป็นแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กได้ แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้วัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แท้จริงได้ ดังนั้นค่าความเข้มจึงแสดงเป็นค่าออร์มัลไรซ์



รูปที่ 5.1 ขดลวดวงกลมที่ใช้ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก

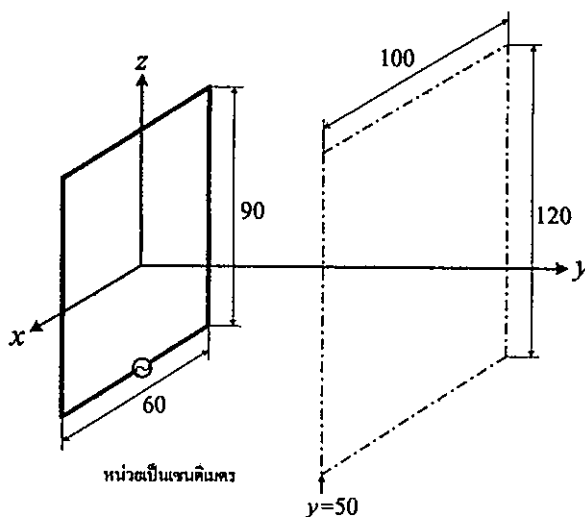
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดที่ใช้ขึ้นอยู่กับขนาดของจุดทดสอบ ซึ่งระนาบที่ทำการศึกษาทดสอบนี้มีความกว้าง 100 cm ความสูง 120 cm มีจุดทดสอบทั้งหมด 525 จุด ฉะนั้นแต่ละจุดจะมีขนาด กว้าง 5 cm และ สูง 5 cm จึงใช้ขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 cm นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมวงจรกับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กแสดงดังสมการ

$$V_o = 2\pi f_o N Q S B_o \cos \alpha \quad (5.1)$$

- โดยที่ f = ความถี่ของสัญญาณ
 N = จำนวนรอบของขดลวดในรูป
 S = พื้นที่ของรูปในหน่วยเมตรยกกำลังสอง (m^2)
 B_o = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก
 α = มุมระหว่างลูกข้ายกับระนาบสนามแม่เหล็ก
 Q = ค่า Q ของวงจรเรโซแนนซ์

5.1.1 การทดสอบสายอากาศวงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

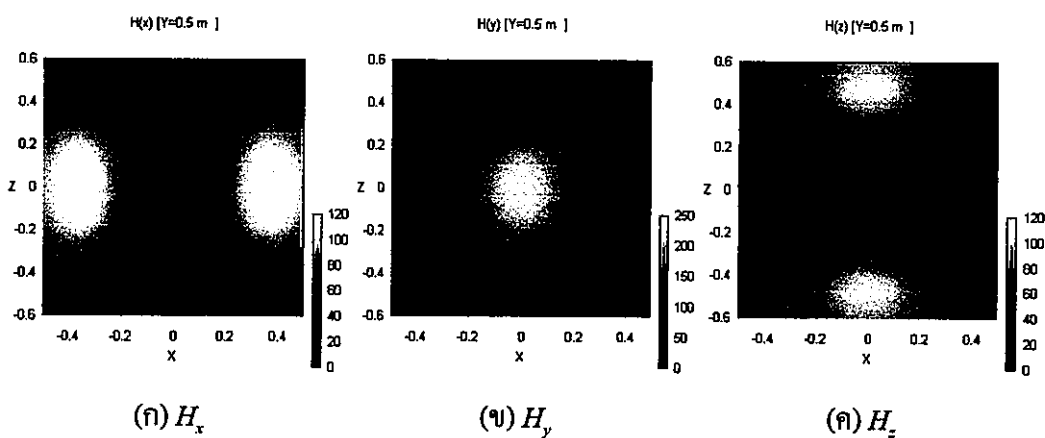
สายอากาศวงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่นำมาทดสอบมีขนาดความกว้าง 60 cm ความสูง 90 cm โดยทดสอบในระนาบขนานกับสายอากาศและห่างจากสายอากาศ 50 เซนติเมตร และได้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC แสดงดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จากแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กพบว่า การทดสอบและการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน แต่ขาดตรงที่การทดสอบไม่สามารถบอกค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่แท้จริงได้ ซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากการจำลองมีหน่วยเป็น mA/m



รูปที่ 5.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าระยะ y เท่ากับ 0.5 m



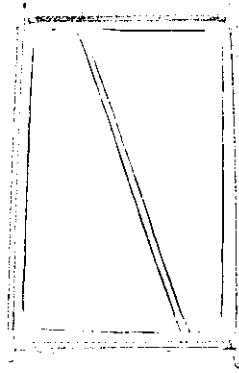
รูปที่ 5.3 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



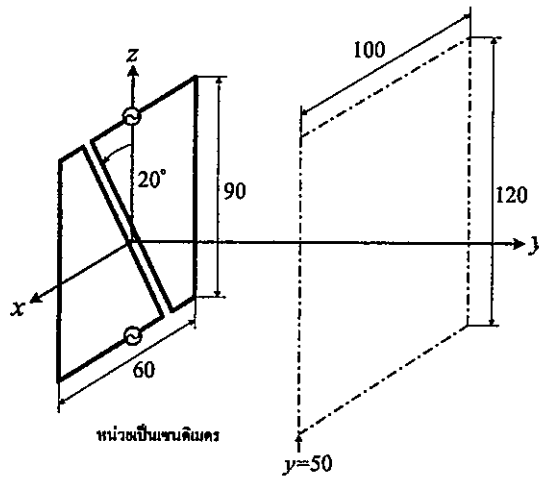
รูปที่ 5.4 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้โปรแกรม NEC ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

5.1.2 การทดสอบสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา

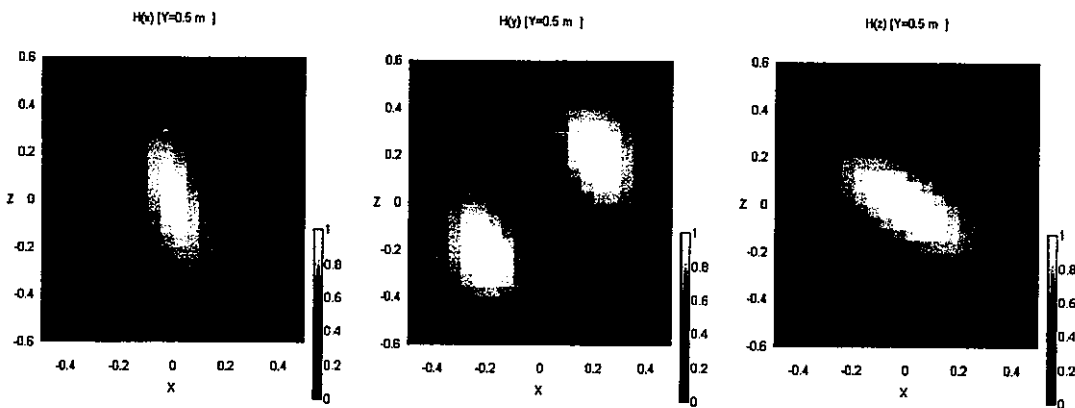
สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่นำมาทดสอบมีขนาดเดียวกันกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มุม $\psi = 20$ องศา รูปสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยทดสอบในระนาบขนานกับสายอากาศและห่างจากสายอากาศ 50 cm ซึ่งระยะที่ทำการศึกษาครั้งนี้มีความกว้าง 100 cm ความสูง 120 cm มีจุดทดสอบทั้งหมด 525 จุด ในส่วนของรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบกับการจำลองผลด้วยโปรแกรม NEC พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กมีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 5.5 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา



รูปที่ 5.6 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

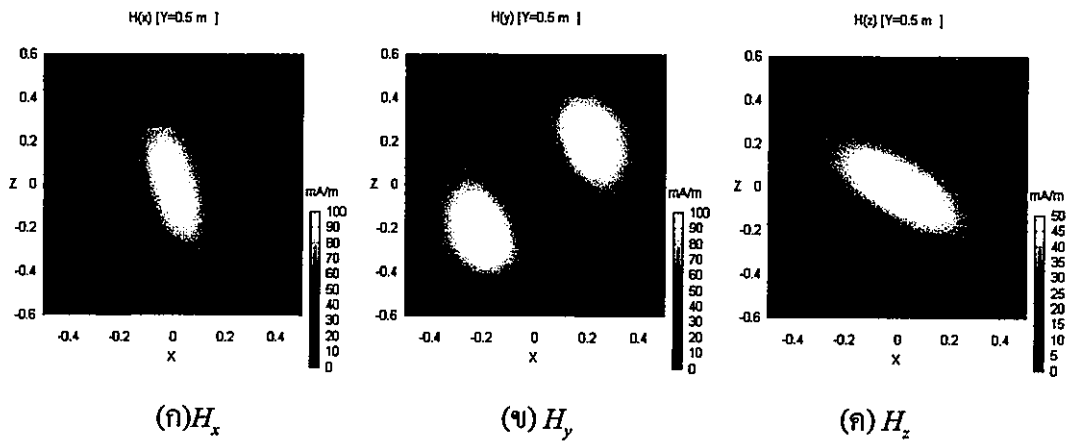


(ก) ค่าแอมพลิจูดไรซ์ H_x

(ข) ค่าแอมพลิจูดไรซ์ H_y

(ค) ค่าแอมพลิจูดไรซ์ H_z

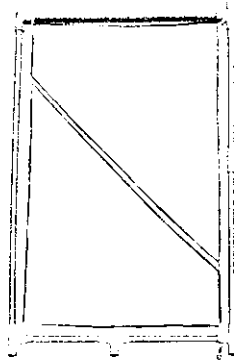
รูปที่ 5.7 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 20$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



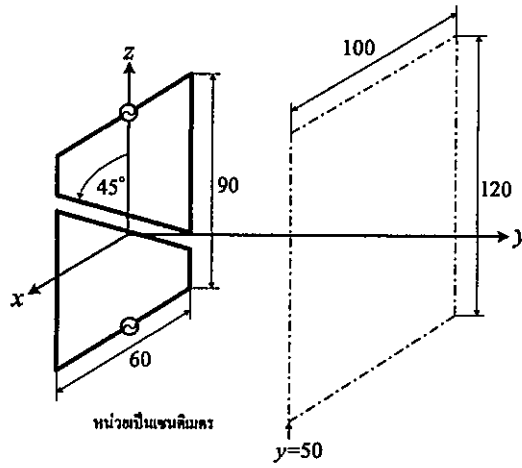
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

5.1.3 การทดสอบสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา

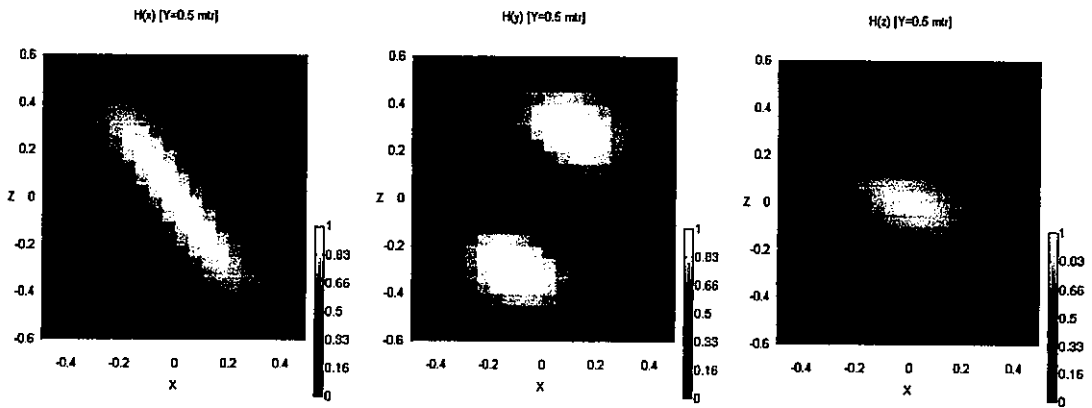
สายอากาศมีขนาดเดียวกันกับสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า มุม $\psi = 45$ องศา รูปสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5.9 ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC แสดงดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 จากแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กพบว่าผลการทดสอบและการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 5.9 สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา



รูปที่ 5.10 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

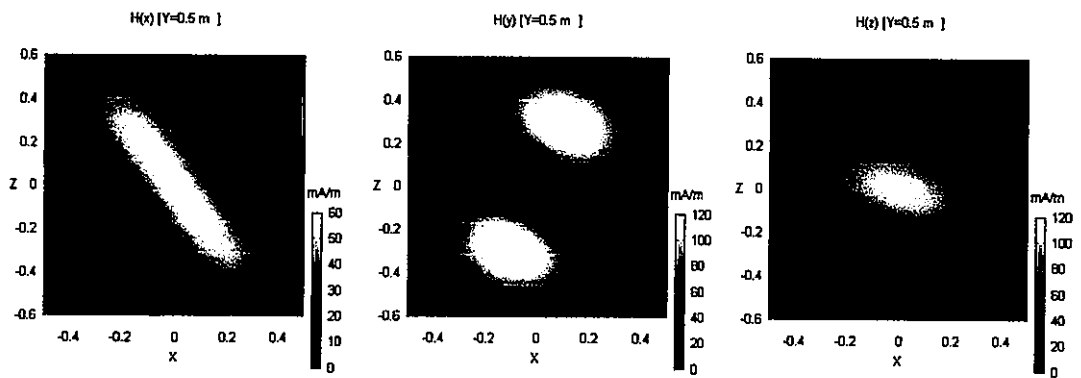


(ก) ค่าแอมพลิจูดของ H_x

(ข) ค่าแอมพลิจูดของ H_y

(ค) ค่าแอมพลิจูดของ H_z

รูปที่ 5.11 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู $\psi = 45$ องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m



(ก) H_x

(ข) H_y

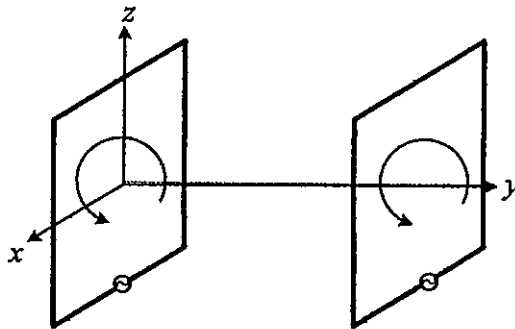
(ค) H_z

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูโดยใช้โปรแกรม NEC ที่มุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ y เท่ากับ 0.5 m

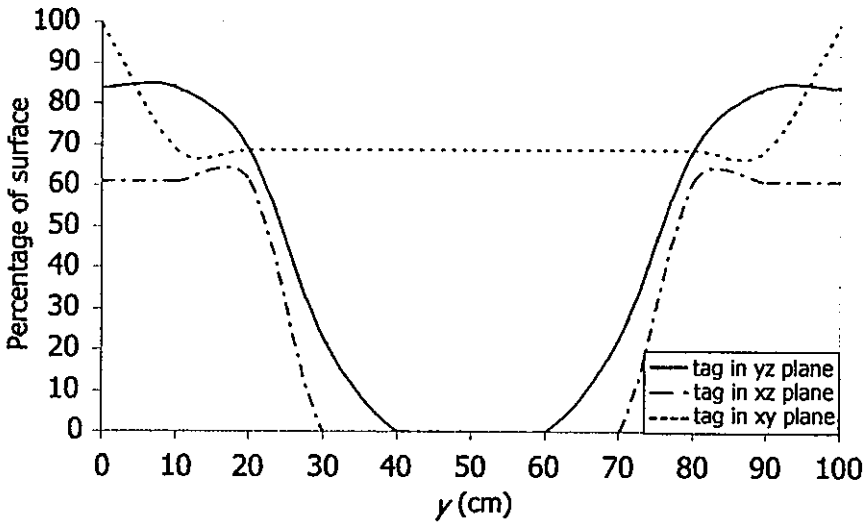
5.2 การทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวและเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร

การทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกับเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศประจุเดินผ่านแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เปรียบเทียบกับสายอากาศต้นแบบ โดยในการทดสอบจะใช้หลักการหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวจากหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งแต่ละพื้นผิวมีขนาด กว้าง 100 cm สูง 120 cm แบ่งจำนวนส่วนย่อยตามแนวแกน z กับ y ทั้งหมด 13 ส่วนและ 10 ส่วนตามลำดับ ซึ่งค่านี้ไม่ใช่ค่าที่ลู่อเข้า แต่ก็ยังพอใช้ได้เพราะค่าลู่อเข้าเป็นค่าที่ค่อนข้างละเอียด แต่ในการทดสอบไม่มีเครื่องมืออัตโนมัติที่มีความแม่นยำสูงจึงต้องใช้ในการทดสอบค่าแบบหยาบๆ แทน โดยในการทดสอบแต่ละจุดนั้นจะใช้ลูกข่างเป็นตัวทดสอบ ถ้าเครื่องอ่านติดต่อกับลูกข่างได้แสดงว่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดนั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับระดับจุดเริ่มเปลี่ยนก็นำค่าส่วนนั้นแทนในสมการที่ 4.1 สายอากาศประจุเดินผ่านที่ทำการทดสอบจะมีระยะห่างของสายอากาศทั้ง 2 ชุด 100 cm และแต่ละชุดมีขนาดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

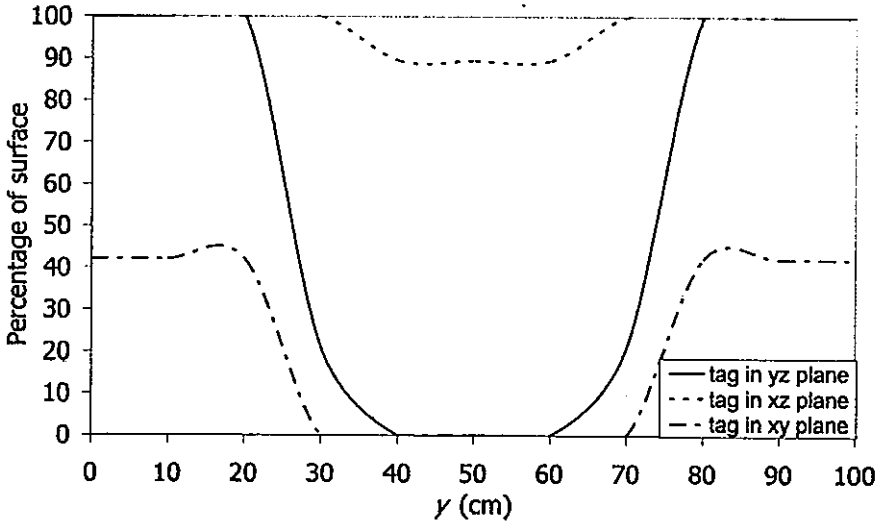
ผลการทดสอบและผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศประจุเดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะแสดง 2 กรณีด้วยกันคือ สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน และต่างเฟสกัน 180 องศา แสดงในรูปที่ 5.13 ถึง รูปที่ 5.18 ตามลำดับ ในส่วนของสายอากาศประจุเดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูก็จะแสดง 2 กรณีเช่นกันคือ สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm ส่วนในอีกกรณีคือ สายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศาจะมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm แสดงดังรูปที่ 5.19 ถึง รูปที่ 5.24 ตามลำดับ



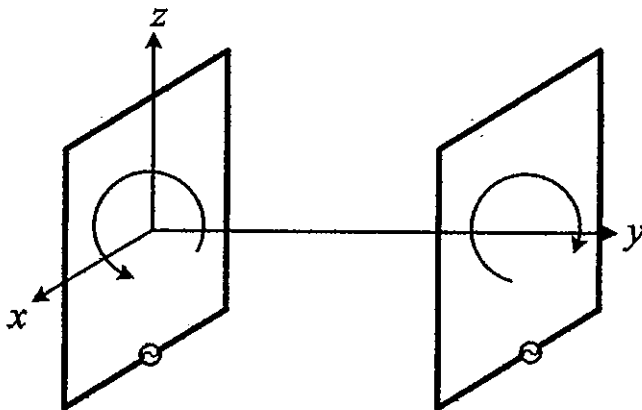
รูปที่ 5.13 สายอากาศประจุเดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จัดเฟสกระแสสายอากาศตรงกัน



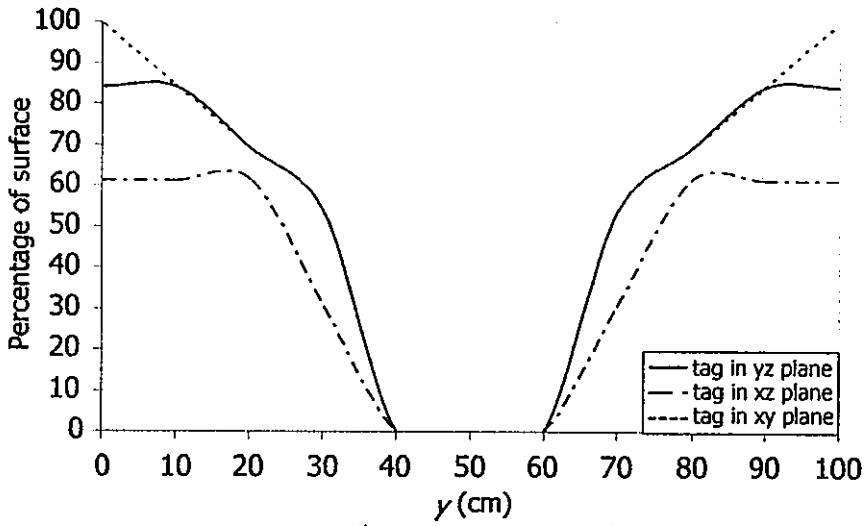
รูปที่ 5.14 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน



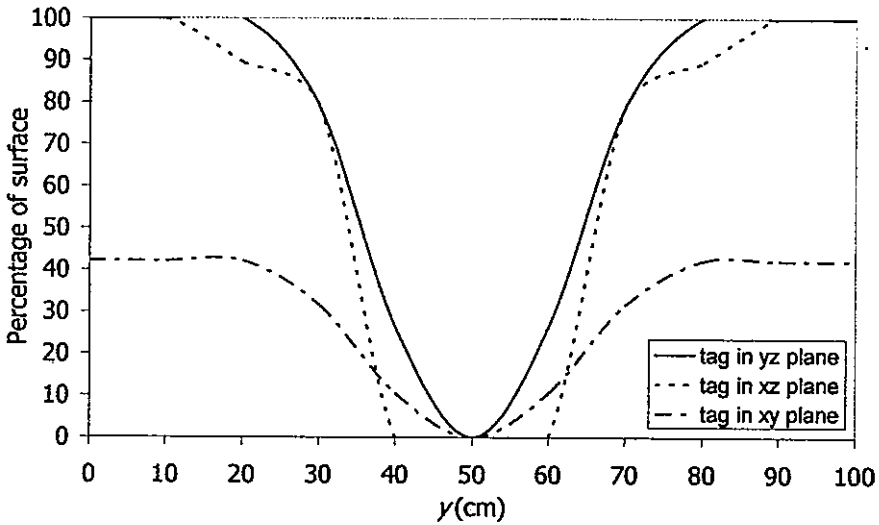
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน



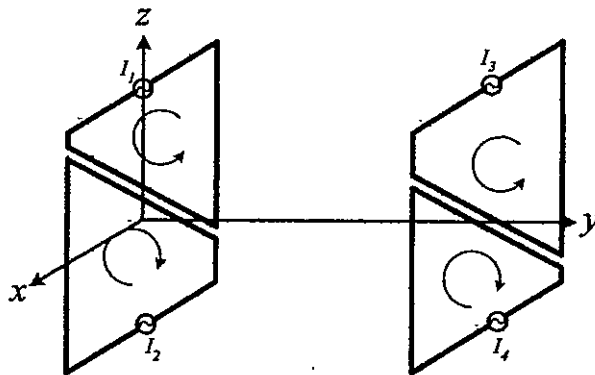
รูปที่ 5.16 สายอากาศประตูดเคลื่อนผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่จัดเฟสกระแสดต่างกัน 180 องศา



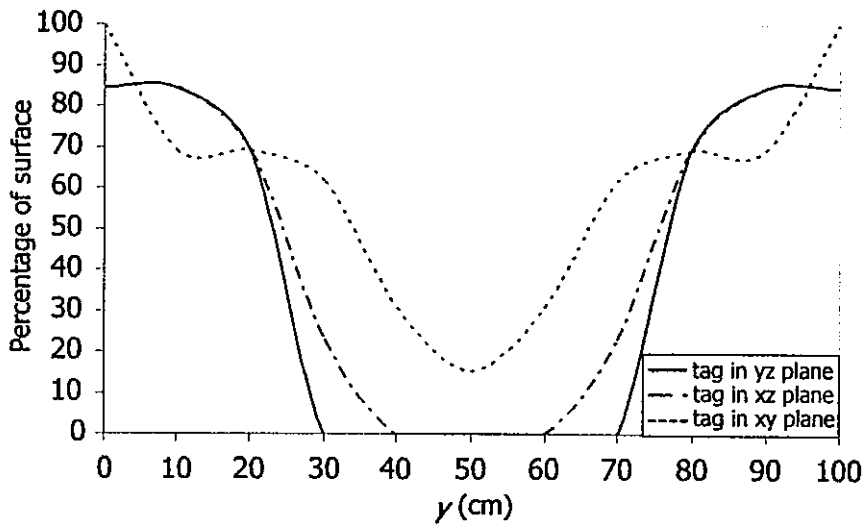
รูปที่ 5.17 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา



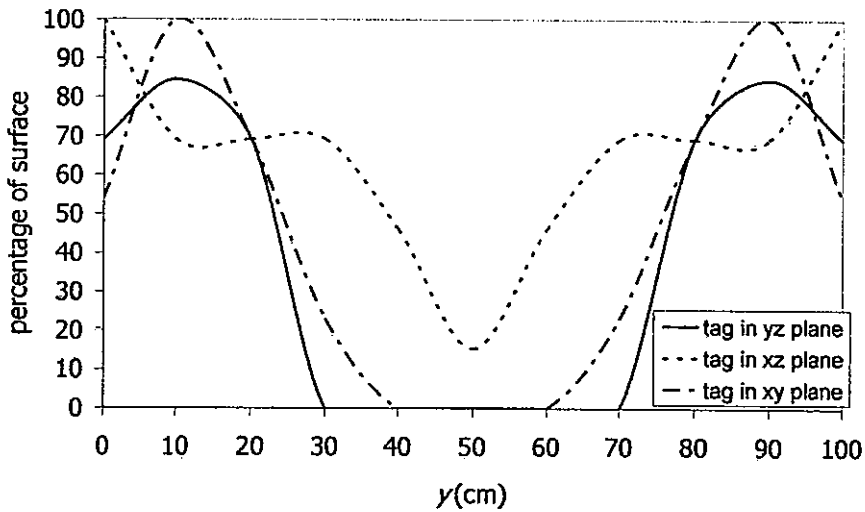
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา



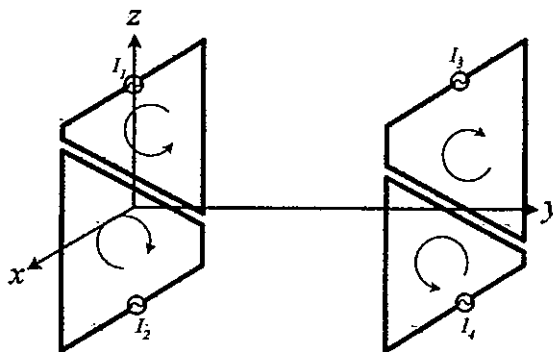
รูปที่ 5.19 สายอากาศประตูดเคลื่อนผ่านแบบปวงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดเฟสตรงกัน



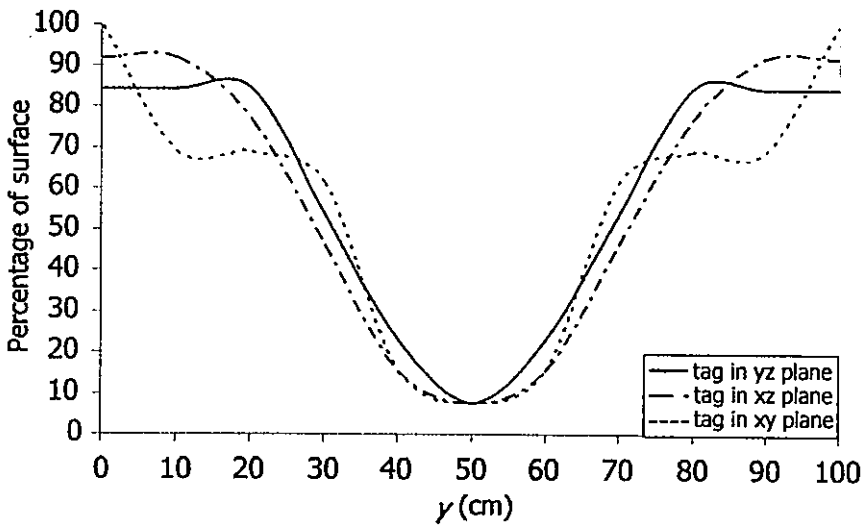
รูปที่ 5.20 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศ ทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm



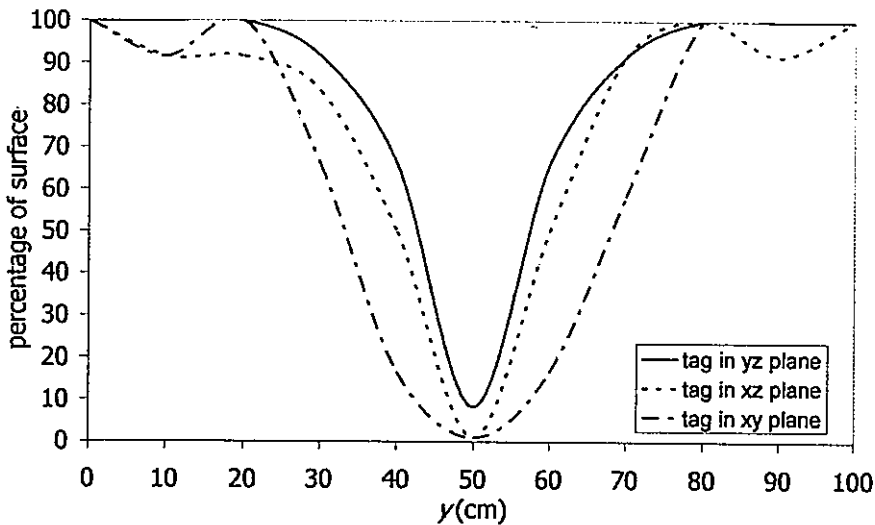
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศ ทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm



รูปที่ 5.22 สายอากาศประดิษฐ์ผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่จัดเฟสต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 5.23 ผลการจำลองเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา มีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา τ เท่ากับ 18 cm



รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา จะมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา τ เท่ากับ 18 cm

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.15 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวกรณีสายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน จะเห็นว่าลูกข่ายใช้งานได้ดีในระนาบ xz ส่วนในระนาบ yz และ xy ใช้งานห่างจากสายอากาศแต่ละข้างได้ไม่เกินระยะ 40 cm และ 30 cm ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาจากแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กพบว่า สนามแม่เหล็ก H_z ซึ่งใช้กับลูกข่ายในระนาบ xy มีจุดบอดตรงกลาง ถ้านำมาใช้กับทางเดินผ่านจะไม่สามารถใช้งานได้

กรณีของเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา รูปที่ 5.18 พบว่าลูกข่ายใช้งานในระนาบ yz ได้ดีขึ้นแต่บริเวณกึ่งกลาง

สายอากาศยังไม่ดีนัก ลูกข่ายในระนาบ xz ใช้งานห่างจากสายอากาศแต่ละข้างได้ไม่เกิน 40 cm และในส่วนของ ระนาบ xy เมื่อนำแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กมาพิจารณาไม่ถือว่าใช้งานได้ เพราะการพิจารณาจากโครงสร้างของสายอากาศตามรูปที่ 5.2 เมื่อมีการเดินผ่านสายอากาศเข้ามาทางแกน x พบว่าบริเวณกลางสายอากาศสนามแม่เหล็กในทิศทาง z มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งบริเวณกลางสายอากาศนี้เป็นบริเวณที่สำคัญเพราะ โอกาสที่ลูกข่ายผ่านเข้ามาบริเวณนี้มีมาก

ในส่วนของเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวของสายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm รูปที่ 5.21 โดยพิจารณาพร้อมกับแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กแล้วพบว่าสามารถใช้งานกับลูกข่ายจัดวางตามแนวแกนหลักได้ แต่จะใช้งานได้ตลอดช่วงสายอากาศในระนาบ xz ส่วนในระนาบ yz และ xy ใช้งานห่างจากสายอากาศแต่ละข้างได้ไม่เกิน 30 cm และ 40 cm ตามลำดับ

เปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวสายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองชุดกลับเฟสกัน จะมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm รูปที่ 5.24 เมื่อทำการพิจารณาพร้อมกับแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็ก พบว่า สามารถใช้งานกับลูกข่ายได้ทุกแนวแกนหลักแต่จะใช้งานได้ตลอดช่วงสายอากาศในระนาบ yz ส่วนในระนาบ xz และ xy ก็ใช้งานได้ตลอดช่วงสายอากาศเช่นกัน แต่ยังไม่ดีนักเพราะเปอร์เซ็นต์พื้นผิวบริเวณกลางสายอากาศยังเข้าใกล้ศูนย์ในบางตำแหน่ง

ในส่วนค่าของเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศที่ทำการทดสอบแต่ละแบบหาได้จากกราฟผลการทดสอบที่ผ่านมามีดังนี้

- สายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณีสายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกัน ลูกข่ายในระนาบ $y-z$ (H_x) ประมาณ 58% ในระนาบ $x-z$ (H_y) ประมาณ 97% และในระนาบ $x-y$ (H_z) ประมาณ 23%
- สายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา ลูกข่ายในระนาบ $y-z$ (H_x) ประมาณ 73% ในระนาบ $x-z$ (H_y) ประมาณ 67% และในระนาบ $x-y$ (H_z) ประมาณ 30%
- สายอากาศประดิษฐ์เดินผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กรณีสายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกันมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm ลูกข่ายในระนาบ $y-z$ (H_x) ประมาณ 41% ในระนาบ $x-z$ (H_y) ประมาณ 66% และในระนาบ $x-y$ (H_z) ประมาณ 45%

- สายอากาศประดิษฐ์ผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา มุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm ลูกข่ายในระนาบ $y-z$ (H_x) ประมาณ 84% ในระนาบ $x-z$ (H_y) ประมาณ 77% และในระนาบ $x-y$ (H_z) ประมาณ 68%

ตารางที่ 5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศแต่ละแบบ

ลักษณะบ่วง	ความต่างเฟส	เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร		
		P_{vx}	P_{vy}	P_{vz}
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	0°	58	97	23
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	180°	73	67	30
สี่เหลี่ยมคางหมู	0°	41	66	45
สี่เหลี่ยมคางหมู	180°	84	77	68

เมื่อ P_{vx} คือ เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็กทิศทาง x (H_x)

P_{vy} คือ เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็กทิศทาง y (H_y)

P_{vz} คือ เปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็กทิศทาง z (H_z)

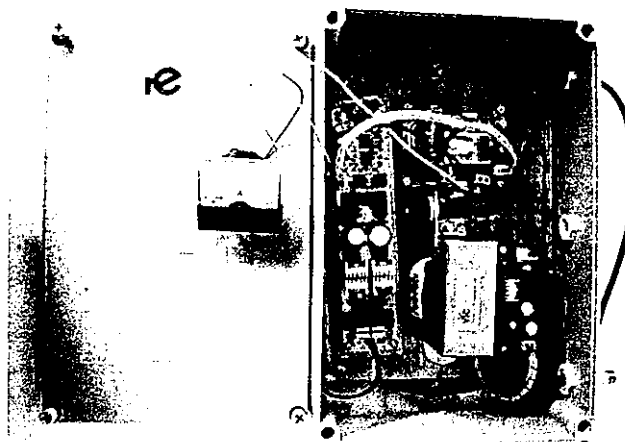
เมื่อพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรจากตารางที่ 5.1 เห็นว่า สายอากาศประดิษฐ์ผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา จะมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm มีค่าที่สูงทั้งสามระนาบเกินหลักคือกว่าทุกแบบ

5.3 การทดสอบการใช้งานจริงของสายอากาศ

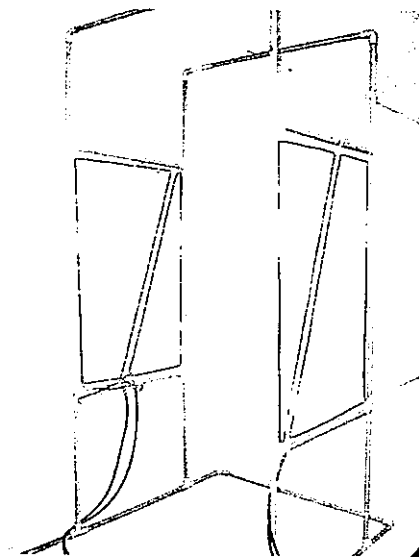
ในการทดสอบการใช้งานจริงของสายอากาศจะมีขั้นตอนการทดสอบคือ

- ทดสอบการใช้งานลูกข่ายที่จัดวางตามแนวแกนหลักและทุกลักษณะการจัดวาง และเมื่อลูกข่ายวางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสม
- ทดสอบหาระยะห่าง ไกลสุดระหว่างสายอากาศ เมื่อลูกข่ายวางตัวทุกลักษณะการจัดวาง และเมื่อลูกข่ายวางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสม

เครื่องอ่านที่ใช้ทำการทดสอบสายอากาศเป็นเครื่องอ่านชนิด FDx ซึ่งมีระยะการอ่านปานกลางและสามารถต่อเข้ากับสายอากาศที่มีค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) อยู่ในช่วง 270 - 400 μH โดยสายอากาศต้นแบบมีค่าความเหนี่ยวนำ 390 μH ในส่วนของลูกข่ายที่ใช้ทดสอบสายอากาศเป็นแบบ ISO card ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.25 ทดสอบที่ความถี่ 125 kHz และ 134.2 kHz

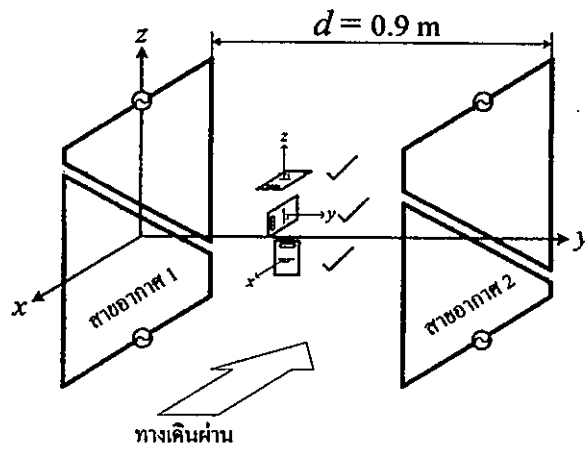


รูปที่ 5.25 เครื่องอ่านและลูกข่ายที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศ

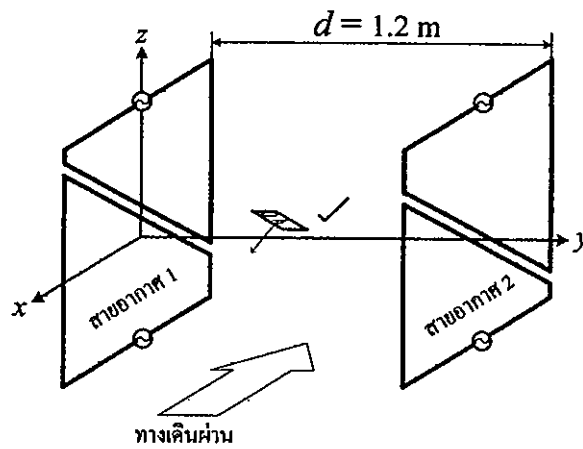


รูปที่ 5.26 สายอากาศต้นแบบ

จากการทดสอบการใช้งานลูกข่ายที่จัดวางตามแนวแกนหลักและทุกลักษณะการจัดวาง พบว่าสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมาย ในส่วนของการหาระยะห่างไกลสุดระหว่างสายอากาศ เมื่อลูกข่ายจัดวางตามแนวแกนหลักและวางตัวทุกลักษณะการจัดวาง ที่ใช้งานได้คืออยู่ที่ประมาณ 90 cm แสดงดังรูปที่ 5.27 นอกจากนี้การทดสอบหาระยะห่างไกลสุดระหว่างสายอากาศ เมื่อลูกข่ายวางตัวอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 120cm แสดงดังรูปที่ 5.28 ซึ่งลูกข่ายต้องวางตัวในลักษณะเอียงไปตามแนวตัวนำเรียงของสายอากาศโดยสายอากาศสามารถใช้งานได้ทั้งความถี่ 125 kHz และ 134.2 kHz



รูปที่ 5.27 ระยะห่างไกลสุดที่ลูกข่ายใช้งานได้ทุกแนวแกนหลักและทุกลักษณะการจัดวางได้ดี



รูปที่ 5.28 ระยะห่างไกลสุดที่ลูกข่ายวางตัวอย่างเหมาะสม

5.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศทั้ง 4 แบบซึ่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไม่สามารถทดสอบได้จึงแสดงเป็นค่านอร์มัลไรซ์ เมื่อได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม NEC พบว่ามีความสอดคล้องกันจากนั้นได้ทำการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวและเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศทั้งสี่แบบพบว่าสายอากาศประตูดเคลื่อนผ่านแบบบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูกรณี สายอากาศทั้งสองขุดต่างเฟสกัน 180 องศา จะมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm เป็นสายอากาศที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานที่สุดและจะใช้งานกับลูกข่ายทุกลักษณะการจัดวางได้ดีเมื่อจัดให้ระยะห่างของสายอากาศทั้งสองห่างกันไม่เกิน 90 cm และถ้าวางลูกข่ายจัดวางอยู่ในลักษณะที่เหมาะสมจะสามารถขยายระยะห่างระหว่างสายอากาศได้สูงสุดถึง 120 cm จากการทดสอบการใช้งานของสายอากาศต้นแบบพบว่าสายอากาศต้นแบบใช้งานได้ดีตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ย่านความถี่ต่ำ (125 kHz และ 134.2 kHz) โดยจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่สามารถใช้งานกับลูกข่ายได้ทุกลักษณะการจัดวาง ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สร้างง่ายและมีราคาถูก

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ต่ำจากนั้นได้แสดงการวิเคราะห์สายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดต่างๆของสายอากาศบ่วงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยการคำนวณกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม NEC ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ในส่วนของสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูที่นำเสนอ นั้น โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยบ่วงสี่เหลี่ยมคางหมู 2 บ่วงวางต่อกัน ซึ่งกระแสที่ไหลในบ่วงทั้งสองต้องต่างเฟสกัน 180 องศา เพื่อให้กระแสที่ไหลในตัวนำแนวเฉียงทั้งสองมีทิศทางการไหลตรงกัน ในการวิเคราะห์สายอากาศจะใช้กฎของ Biot-Savart วิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศซึ่งการวิเคราะห์ได้แบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศออกเป็น 2 แบบด้วยกันและเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และการใช้โปรแกรม NEC พบว่าผลมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ในการจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบนั้นจะนำแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กมาพิจารณาหา ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงเส้น ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวจากนั้นจะนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร ซึ่งผลที่ได้มี 2 กรณีคือ กรณีที่สายอากาศทั้งสองชุดมีเฟสตรงกันจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรที่ดีที่สุดคือ ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x ประมาณ 48% H_y ประมาณ 65% และ H_z ประมาณ 50% ที่ค่า r ประมาณ 0 cm และ ψ ประมาณ 45 องศา และในอีกกรณี คือ กรณีที่สายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา ซึ่งจุดที่ดีที่สุดจะได้ค่า r ประมาณ 18 cm และ ψ ประมาณ 20 องศา คือ ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x H_y และ H_z มีค่าประมาณ 55% 60% และ 55% ตามลำดับ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูพบว่าผลมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์และการจำลอง ในส่วนของการทดสอบเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นผิวกับเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสายอากาศพบว่า กรณี

สายอากาศทั้งสองชุดเฟสตรงกัน ซึ่งมีมุม ψ เท่ากับ 45 องศา ระยะ r เท่ากับ 0 cm ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x , H_y , และ H_z มีค่าประมาณ 41% 66% และ 45% ในส่วนของกรณีสายอากาศทั้งสองชุดต่างเฟสกัน 180 องศา ซึ่งมีมุม ψ เท่ากับ 20 องศา ระยะ r เท่ากับ 18 cm ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของสนามแม่เหล็ก H_x , H_y , และ H_z มีค่าประมาณ 84% 77% และ 68% ตามลำดับ ซึ่งเป็นกรณีที่ดีที่สุดเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ได้ แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้นั้นเป็นการทดสอบอย่างหยาบ ๆ ผลที่ได้จึงยังไม่เกิดการลู่เข้า

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบจะพบว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถนำไปใช้งานตามช่องทางเดินผ่าน ได้ดี และสามารถใช้งานกับลูกข่ายได้ทุกลักษณะการจัดวาง แต่สิ่งที่ยังขาดไปคือการวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศ เพราะในการสร้างสายอากาศให้เข้ากับเครื่องอ่านนั้นจะต้องสร้างให้สายอากาศมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วงที่เครื่องอ่านต้องการ ซึ่งถ้าหากนำสายอากาศมาต่อแถวลำดับเพื่อเพิ่มระยะการอ่าน สิ่งที่เป็นอย่างยิ่งและขาดไม่ได้คือการวิเคราะห์ค่าความเหนี่ยวนำ ในส่วนของปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการวิจัยคือการปรับแต่งค่าของตัวเก็บประจุภายในเครื่องอ่านเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์กับสายอากาศทำได้ยากเนื่องจากไม่สามารถปรับค่าอย่างละเอียดได้ทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทดสอบและพื้นที่บริเวณที่ทำการทดสอบไม่ควรจะมีจอภาพคอมพิวเตอร์ หรือจอโทรทัศน์อยู่ในบริเวณใกล้เพราะจะส่งผลกระทบต่อระยะการอ่านของเครื่องอ่านได้

การเพิ่มระยะการใช้งานอาจเพิ่มได้โดยวิธีการเพิ่มขนาดของสายอากาศให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและยังสามารถใช้วิธีการ Optimized โครงสร้างและขนาดของสายอากาศอย่างละเอียดโดยวิธี GA (Genetic Algorithm) หรือวิธีการอื่นๆ เพื่อเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานให้ดีขึ้นได้อีกด้วย

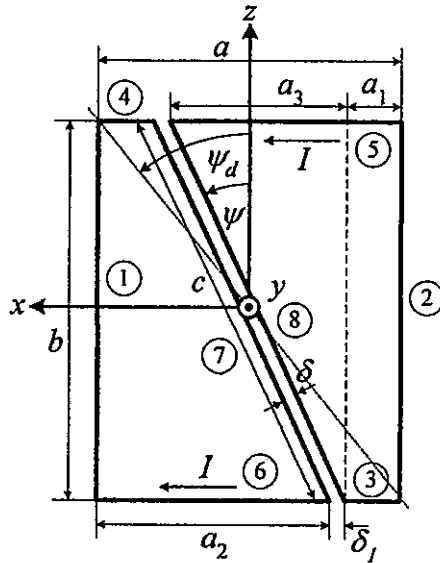
เอกสารอ้างอิง

- [1] Klaus Finkenzeller, RFID Handbook, John Wiley& Sons, 2003.
- [2] Dominique Paret, RFID and Contactless Smart Card Applications, John wiley&Sons, 2005.
- [3] AN678 RFID Coil Design, [Online]. Available: <http://www.microchip.com>
- [4] U2270B Antenna Design Hints, [Online]. Available: <http://ftp.jettedata.cz/pub/ham/sheet/u/u22-70hin.pdf>
- [5] HF Antenna Design Notes Technical Application Report, [Online]. Available: <http://www.ti-rfid.com>
- [6] W. H. Hayt Jr., Engineering Electromagnetics, fifth Edition, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [7] J. D. Kraus, Electromagnetics, Fourth Edition, New York, 1992.
- [8] โมไนย์ ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พิมพ์สวย, กรุงเทพฯ, 2544
- [9] G. J. Burke and A. J. Poggio. Numerical Electromagnetics Code (NEC) Method of Moment, Part I-III. Lawrence LiverMore Nat. Lab., Livermore, CA, 1981.
- [10] IEEE Std C95.1, 1999 Edition , IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz , Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.,USA,1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

การวิเคราะห์กรณีที่มีมุม ψ น้อยกว่ามุมทแยงรูปที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มีมุม ψ น้อยกว่ามุมทแยง

จากรูปจะเห็นว่ามุมทแยงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\psi_d = \tan^{-1} \frac{a}{b} \quad (\text{ก.1})$$

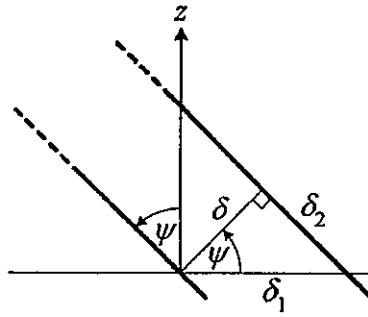
ดังนั้นบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูในกรณีนี้จะได้ว่า $0^\circ \leq \psi < \psi_d$

ความสัมพันธ์ของระยะต่างๆ ของบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากรูปที่ ก.1 คือ

$$a = 2a_1 + a_3 + \delta_1 \quad (\text{ก.2})$$

$$c = \frac{b}{\cos \psi} \quad (\text{ก.3})$$

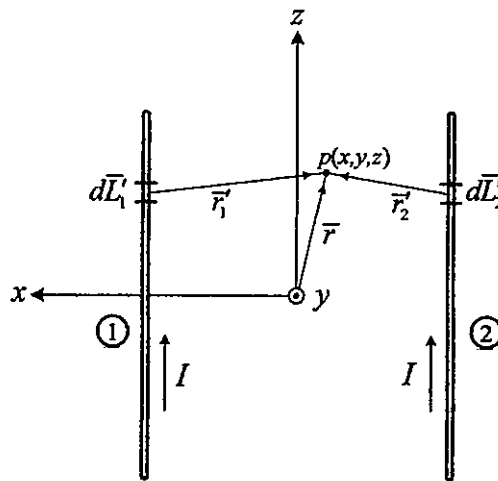
ความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้ง 2 บ่วง δ ที่ตัวนำแนวเฉียง

รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของระยะ δ

จากรูปที่ ก.2 จะได้ว่า

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\cos \psi} \quad \text{และ} \quad \delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 - \delta^2} \quad (\text{ก.4})$$

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ด้านที่ 1 และ 2 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.4 การคำนวณกรณีที่ 1

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 คือ $(x'_1 = \frac{a}{2}, y'_1, z'_1)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_1 = (x - x'_1)\hat{a}_x + (y - y'_1)\hat{a}_y + (z - z'_1)\hat{a}_z \quad (\text{ก.5})$$

$$R_1 = \sqrt{(x - x'_1)^2 + (y - y'_1)^2 + (z - z'_1)^2} \quad (\text{ก.6})$$

$$d\bar{L}_1 = dz'_1 \hat{a}_z \quad (ก.7)$$

จาก

$$\bar{H}_1 = \oint \frac{I d\bar{L}_1 \times \hat{a}_{R_1}}{4\pi R_1^2} \quad (ก.8)$$

จะได้

$$\bar{H}_1 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_1 \hat{a}_z \times ((x-x'_1)\hat{a}_x + (y-y'_1)\hat{a}_y + (z-z'_1)\hat{a}_z)}{[(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2]^{3/2}} \quad (ก.9)$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I((x-x'_1)\hat{a}_y - (y-y'_1)\hat{a}_x)}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_1}{[(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2]^{3/2}} \quad (ก.10)$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I((x-x'_1)\hat{a}_y - (y-y'_1)\hat{a}_x)}{4\pi((x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{4(x-x'_1)^2 + 4(y-y'_1)^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{4(a-2x)^2 + 4(y-y'_1)^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (ก.11)$$

ทำการแทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 $y'_1 = 0$, $x'_1 = \frac{a}{2}$ ลงใน (ก.9) จะได้

$$\bar{H}_1 = \frac{I \left(\left(x - \frac{a}{2} \right) \hat{a}_y - y \hat{a}_x \right)}{4\pi \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{4(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (ก.12)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 คือ $(x'_2 = \frac{-a}{2}, y'_2, z'_2)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_2 = (x-x'_2)\hat{a}_x + (y-y'_2)\hat{a}_y + (z-z'_2)\hat{a}_z \quad (ก.13)$$

$$R_2 = \sqrt{(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2} \quad (ก.14)$$

$$d\bar{L}_2 = dz'_2 \hat{a}_z \quad (\text{ก.15})$$

จาก

$$\bar{H}_2 = \oint \frac{I d\bar{L}_2 \times \hat{a}_{R_2}}{4\pi R_2^2} \quad (\text{ก.16})$$

$$\bar{H}_2 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_2 \hat{a}_z \times ((x-x'_2)\hat{a}_x + (y-y'_2)\hat{a}_y + (z-z'_2)\hat{a}_z)}{[(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{ก.17})$$

$$\bar{H}_2 = \frac{I((x-x'_2)\hat{a}_y - (y-y'_2)\hat{a}_x)}{4\pi} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_2}{[(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{ก.18})$$

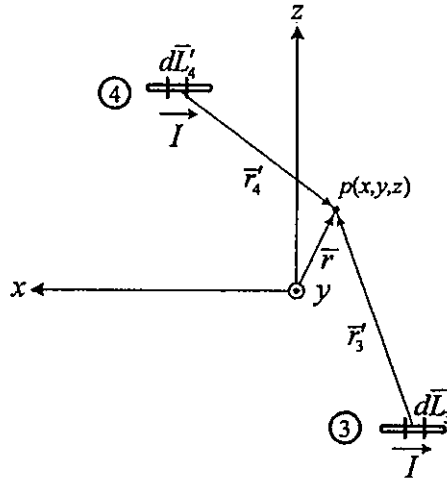
$$\bar{H}_2 = \frac{I((x-x'_1)\hat{a}_y - (y-y'_1)\hat{a}_x)}{4\pi((x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{4(x-x'_1)^2 + 4(y-y'_1)^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{4(x-x'_1)^2 + 4(y-y'_1)^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (\text{ก.19})$$

ทำการแทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 $y'_2 = 0$, $x'_2 = \frac{-a}{2}$ ลงใน (ก.19) จะได้

$$\bar{H}_2 = \frac{I\left(\left(x+\frac{a}{2}\right)\hat{a}_y - y\hat{a}_x\right)}{4\pi\left(\left(x+\frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{b+2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (\text{ก.20})$$

จากสมการ (ก.12) และ (ก.20) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ด้านที่ 3 และ 4 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.5 การคำนวณกรณีที่ 2

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 คือ $(x'_3, y'_3, z'_3 = \frac{-b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆ จะได้

$$\bar{R}_3 = (x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z \quad (\text{ก.21})$$

$$R_3 = \sqrt{(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2} \quad (\text{ก.22})$$

$$d\bar{L}_3 = dx'_3\hat{a}_x \quad (\text{ก.23})$$

จาก

$$\bar{H}_3 = \oint \frac{I d\bar{L}_3 \times \hat{a}_{R_3}}{4\pi R_3^2} \quad (\text{ก.24})$$

จะได้

$$\bar{H}_3 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-a}{2}+a_1}^{\frac{-a}{2}} \frac{dx'_3\hat{a}_x \times ((x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z)}{[(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.25})$$

$$\bar{H}_3 = \frac{I((y - y'_3)\hat{a}_z - (z - z'_3)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-a}{2}+a_1}^{\frac{-a}{2}} \frac{dx'_3}{[(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.26})$$

$$\bar{H}_3 = \frac{I((y-y'_3)\hat{a}_z - (z-z'_3)\hat{a}_y)}{4\pi((y-y'_3)^2 + (z-z'_3)^2)} \left[\frac{a-2(a_1-x)}{\sqrt{(a-2(a_1-x))^2 + 4(y-y'_3)^2 + 4(z-z'_3)^2}} - \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_3)^2 + 4(z-z'_3)^2}} \right] \quad (ก.27)$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 $z'_3 = \frac{-b}{2}$, $y'_3 = 0$ ใน (ก.27) จะได้

$$\bar{H}_3 = \frac{I\left(y\hat{a}_z - \left(z + \frac{b}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{a-2(a_1-x)}{\sqrt{(a-2(a_1-x))^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} - \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (ก.28)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 คือ $(x'_4, y'_4, z'_4 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_4 = (x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z \quad (ก.29)$$

$$R_4 = \sqrt{(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2} \quad (ก.36)$$

$$d\bar{L}_4 = dx'_4\hat{a}_x \quad (ก.37)$$

จาก

$$\bar{H}_4 = \oint \frac{Id\bar{L}_4 \times \hat{a}_{R_4}}{4\pi R_4^2} \quad (ก.38)$$

จะได้

$$\bar{H}_4 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}-a_1} \frac{dx'_4\hat{a}_z \times ((x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z)}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (ก.39)$$

$$\bar{H}_4 = \frac{I((y-y'_4)\hat{a}_z - (z-z'_4)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}-a_1} \frac{dx'_4}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (ก.40)$$

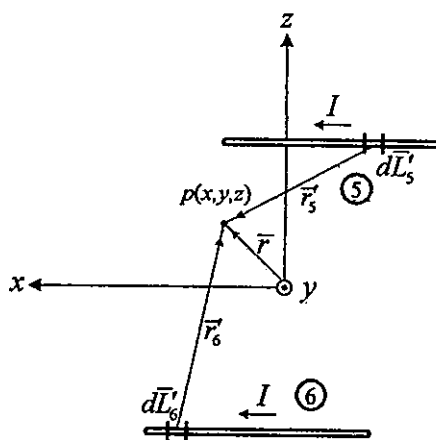
$$\bar{H}_4 = \frac{I((y-y'_4)\hat{a}_z - (z-z'_4)\hat{a}_y)}{4\pi((y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2)} \left[\frac{-a+2(a_1+x)}{\sqrt{(a-2(a_1+x))^2 + 4(y-y'_4)^2 + 4(z-z'_4)^2}} \right. \\ \left. \frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_4)^2 + 4(z-z'_4)^2}} \right] \quad (ก.41)$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 $z'_4 = \frac{b}{2}$, $y'_4 = 0$ ใน (ก.41) จะได้

$$\bar{H}_4 = \frac{I\left(y\hat{a}_z - \left(z - \frac{b}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{-a+2(a_1+x)}{\sqrt{(a-2(a_1+x))^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} \frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} \right] \quad (ก.42)$$

จากสมการ (ก.34) และ (ก.42) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 3 การวิเคราะห์ด้านที่ 5 และ 6 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.6 การคำนวณกรณีที่ 3

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 คือ $(x'_5, y'_5, z'_5 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_5 = (x-x'_5)\hat{a}_x + (y-y'_5)\hat{a}_y + (z-z'_5)\hat{a}_z \quad (ก.43)$$

$$R_5 = \sqrt{(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2} \quad (ก.44)$$

$$d\bar{L}_5 = dx'_5 \hat{a}_x \quad (ก.45)$$

จาก

$$\bar{H}_5 = \oint \frac{I d\bar{L}_5 \times \hat{a}_{R_5}}{4\pi R_5^2} \quad (ก.46)$$

จะได้

$$\bar{H}_5 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{-a}{2}+a_2} \frac{dx'_5 \hat{a}_x \times ((x-x'_5)\hat{a}_x + (y-y'_5)\hat{a}_y + (z-z'_5)\hat{a}_z)}{[(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2]^{3/2}} \quad (ก.47)$$

$$\bar{H}_5 = \frac{I((y-y'_5)\hat{a}_z - (z-z'_5)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{-a}{2}+a_2} \frac{dx'_5}{[(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2]^{3/2}} \quad (ก.48)$$

$$\bar{H}_5 = \frac{I((y-y'_5)\hat{a}_z - (z-z'_5)\hat{a}_y)}{4\pi((y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2)} \left[\frac{\frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_5)^2 + 4(z-z'_5)^2}}}{\frac{a-2(a_2-x)}{\sqrt{(a-2(a_2-x))^2 + 4(y-y'_5)^2 + 4(z-z'_5)^2}}} \right] \quad (ก.49)$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 $z'_5 = \frac{b}{2}$, $y'_5 = 0$ ใน (ก.49) จะได้

$$\bar{H}_5 = \frac{I \left(y\hat{a}_z - \left(z - \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z - \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{\frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}}}{\frac{a-2(a_2-x)}{\sqrt{(a-2(a_2-x))^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}}} \right] \quad (ก.50)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 คือ $(x'_6, y'_6, z'_6 = \frac{-b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_6 = (x-x'_6)\hat{a}_x + (y-y'_6)\hat{a}_y + (z-z'_6)\hat{a}_z \quad (ก.51)$$

$$R_6 = \sqrt{(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2} \quad (ก.52)$$

$$d\bar{L}_6 = dx'_6 \hat{a}_x \quad (ก.53)$$

จาก

$$\bar{H}_6 = \oint \frac{I d\bar{L}_6 \times \hat{a}_{R_6}}{4\pi R_6^2} \quad (\text{ก.54})$$

จะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}-a_2}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_6 \hat{a}_x \times ((x-x'_6)\hat{a}_x + (y-y'_6)\hat{a}_y + (z-z'_6)\hat{a}_z)}{[(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.55})$$

$$\bar{H}_6 = \frac{I((y-y'_6)\hat{a}_z - (z-z'_6)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{a}{2}-a_2}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_6}{[(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.56})$$

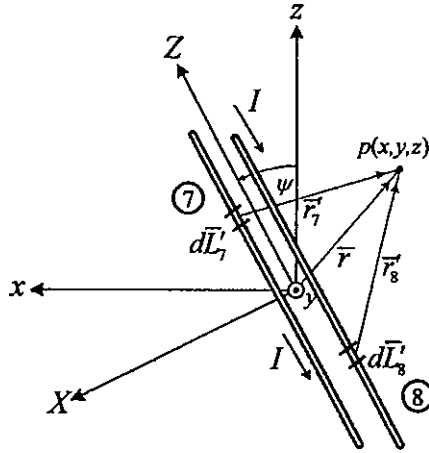
$$\bar{H}_6 = \frac{I((y-y'_6)\hat{a}_z - (z-z'_6)\hat{a}_y)}{4\pi((y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_6)^2 + 4(z-z'_6)^2}} + \frac{-a+2(a_2+x)}{\sqrt{(a-2(a_2+x))^2 + 4(y-y'_6)^2 + 4(z-z'_6)^2}} \right] \quad (\text{ก.57})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 $z'_6 = \frac{-b}{2}$, $y'_6 = 0$ ใน (ก.57) จะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I \left(y\hat{a}_z - \left(z + \frac{b}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(y^2 + \left(z + \frac{b}{2} \right)^2 \right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + 4(b+2z)^2}} + \frac{-a+2(a_2+x)}{\sqrt{(a-2(a_2+x))^2 + 4y^2 + 4(b+2z)^2}} \right] \quad (\text{ก.58})$$

จากสมการ (ก.50) และ (ก.58) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 4 การวิเคราะห์ด้านที่ 7 และ 8 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.7 การคำนวณกรณีที่ 4

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 7 คือ $(X'_7 = \frac{\delta}{2}, y'_7, Z'_7)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ แปลงเป็น $p(X, y, Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{R}_7 = (X - X'_7)\hat{a}_x + (y - y'_7)\hat{a}_y + (Z - Z'_7)\hat{a}_z \quad (\text{ก.59})$$

$$R_7 = \sqrt{(X - X'_7)^2 + (y - y'_7)^2 + (Z - Z'_7)^2} \quad (\text{ก.60})$$

$$d\vec{L}_7 = dZ'_7\hat{a}_z \quad (\text{ก.61})$$

จาก

$$\vec{H}_7 = \oint \frac{I d\vec{L}_7 \times \hat{a}_{R_7}}{4\pi R_7^2} \quad (\text{ก.62})$$

จะได้

$$\vec{H}_7 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-c+\delta_2}{2}}^{\frac{c+\delta_2}{2}} \frac{dZ'_7\hat{a}_z \times ((X - X'_7)\hat{a}_x + (y - y'_7)\hat{a}_y + (Z - Z'_7)\hat{a}_z)}{[(X - X'_7)^2 + (y - y'_7)^2 + (Z - Z'_7)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.63})$$

$$\bar{H}_7 = \frac{I(-(y-y'_7)\hat{a}_z + (x-x'_7)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-c+\delta_2}{2}}^{\frac{c+\delta_2}{2}} \frac{dZ'_7}{[(X-X'_7)^2 + (y-y'_7)^2 + (Z-Z'_7)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.64})$$

$$\bar{H}_7 = \frac{I(-(y-y'_7)\hat{a}_z + (X-X'_7)\hat{a}_y)}{4\pi((X-X'_7)^2 + (y-y'_7)^2)} \left[\frac{c+2z-\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_7)^2 + 4(y-y'_7)^2 + (c+2Z-\delta_2)^2}} - \frac{c-2z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_7)^2 + 4(y-y'_7)^2 + (c-2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.65})$$

แทนค่าจุดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 7 คือ $X'_7 = \frac{\delta}{2}$, $y'_7 = 0$ ลงใน (ก.65) จะได้

$$\bar{H}_7 = \frac{I\left(-y\hat{a}_z + \left(X - \frac{\delta}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left(\left(X - \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{c+2Z-\delta_2}{\sqrt{(\delta-2X)^2 + 4y^2 + (c+2Z-\delta_2)^2}} - \frac{c-2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta-2X)^2 + 4y^2 + (c-2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.66})$$

ทำการคำนวณแหล่งกำเนิดที่ 8 ต่อ

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 8 คือ $(X'_8 = \frac{-\delta}{2}, y'_8, Z'_8)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ แปลงเป็น $p(X,y,Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_8 = (X-X'_8)\hat{a}_x + (y-y'_8)\hat{a}_y + (Z-Z'_8)\hat{a}_z \quad (\text{ก.67})$$

$$R_8 = \sqrt{(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2} \quad (\text{ก.68})$$

$$d\bar{L}_8 = dZ'_8\hat{a}_z \quad (\text{ก.69})$$

จาก

$$\bar{H}_8 = \oint \frac{Id\bar{L}_8 \times \hat{a}_{R_8}}{4\pi R_8^2} \quad (\text{ก.70})$$

จะได้

$$\bar{H}_8 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-c-\delta_2}{2}}^{\frac{c-\delta_2}{2}} \frac{dZ'_8 \hat{a}_z \times ((X-X'_8) \hat{a}_x + (y-y'_8) \hat{a}_y + (Z-Z'_8) \hat{a}_z)}{[(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.71})$$

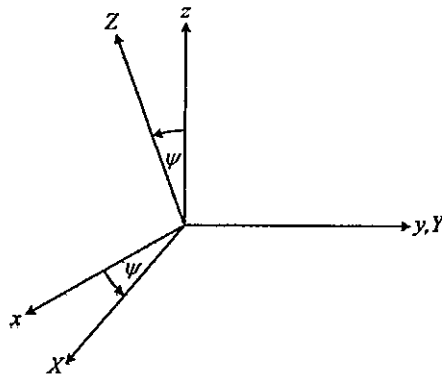
$$\bar{H}_8 = \frac{I(-(y-y'_8) \hat{a}_x + (X-X'_8) \hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-c-\delta_2}{2}}^{\frac{c-\delta_2}{2}} \frac{dZ'_8}{[(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.72})$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I(-(y-y'_8) \hat{a}_x + (X-X'_8) \hat{a}_y)}{4\pi((X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2)} \left[\frac{\frac{-c+2Z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_8)^2 + 4(y-y'_8)^2 + (-c+2Z+\delta_2)^2}}}{\frac{c+2Z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_8)^2 + 4(y-y'_8)^2 + (c+2Z+\delta_2)^2}}} \right] \quad (\text{ก.73})$$

แทนค่าจุดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 8 คือ $X'_8 = \frac{-\delta}{2}$, $y'_8 = 0$ ใน (ก.73) จะได้

$$\bar{H}_8 = \frac{I(-y \hat{a}_x + (X + \frac{\delta}{2}) \hat{a}_y)}{4\pi \left((X + \frac{\delta}{2})^2 + y^2 \right)} \left[\frac{\frac{-c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta+2X)^2 + 4y^2 + (-c+2Z+\delta_2)^2}}}{\frac{c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(\delta+2X)^2 + 4y^2 + (c+2Z+\delta_2)^2}}} \right] \quad (\text{ก.74})$$

จากนั้นหมุนแหล่งกำเนิดที่ 7 และ 8 ไปยังมุม ψ ที่ต้องการคำนวณโดยใช้วิธีแกนหมุน y



รูปที่ ก.8 การหมุนแกน y

สมการการหมุนแกน y ที่อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{ก.75})$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} X &= x \cos\psi - z \sin\psi & \hat{a}_x &= \hat{a}_x \cos\psi - \hat{a}_z \sin\psi \\ Y &= y & \text{และ } \hat{a}_y &= \hat{a}_y \\ Z &= x \sin\psi + z \cos\psi & \hat{a}_z &= \hat{a}_x \sin\psi + \hat{a}_z \cos\psi \end{aligned} \quad (\text{ก.76})$$

ทำการแทนค่าสมการ (ก.76) ลงในสมการ (ก.66), (ก.74) ซึ่งจุดสังเกต $p(x,y,z)$ กับ $p(X,y,Z)$ เป็นจุดเดียวกันจะได้ว่า

$$\bar{H}_7 = \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos\psi - \hat{a}_z \sin\psi) + \left((x \cos\psi - z \sin\psi) - \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left((x \cos\psi - z \sin\psi) - \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \quad (\text{ก.77})$$

$$\left[\frac{c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) - \delta_2}{\sqrt{(\delta - 2(x \cos\psi - z \sin\psi))^2 + 4y^2 + (c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) - \delta_2)^2}} \right. \\ \left. \frac{c - 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta - 2(x \cos\psi - z \sin\psi))^2 + 4y^2 + (c - 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2)^2}} \right]$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I \left(-y(\hat{a}_x \cos\psi - \hat{a}_z \sin\psi) + \left((x \cos\psi - z \sin\psi) + \frac{\delta}{2} \right) \hat{a}_y \right)}{4\pi \left(\left((x \cos\psi - z \sin\psi) + \frac{\delta}{2} \right)^2 + y^2 \right)} \quad (\text{ก.78})$$

$$\left[\frac{-c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta + 2(x \cos\psi - z \sin\psi))^2 + 4y^2 + (-c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2)^2}} \right. \\ \left. \frac{c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2}{\sqrt{(\delta + 2(x \cos\psi - z \sin\psi))^2 + 4y^2 + (c + 2(x \sin\psi + z \cos\psi) + \delta_2)^2}} \right]$$

จากสมการ (ก.77) และ (ก.78) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ

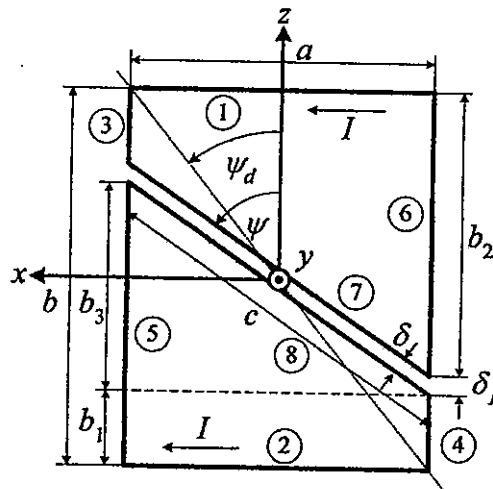
จากสมการสนามทั้ง 4 กรณีได้แก่สมการที่ (ก.12) (ก.20) (ก.28) (ก.42) (ก.50) (ก.58) (ก.77) และสมการที่ (ก.78) นำมารวมเข้าด้วยกันจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3 + \vec{H}_4 + \vec{H}_5 + \vec{H}_6 + \vec{H}_7 + \vec{H}_8 \quad (\text{ก.79})$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมดยุติเป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแตกองค์ประกอบย่อยของสนาม H_x , H_y และ H_z ได้จาก

$$\vec{H} = H_x \hat{a}_x + H_y \hat{a}_y + H_z \hat{a}_z \quad (\text{ก.80})$$

การวิเคราะห์กรณีที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง



รูปที่ ก.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแบบที่มีมุม ψ มากกว่ามุมทแยง

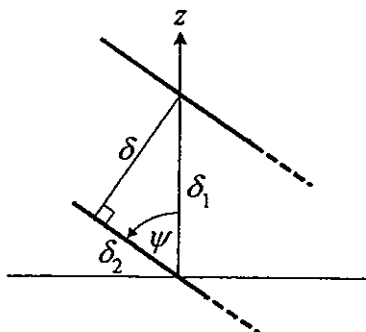
ดังนั้นบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูในกรณีนี้จะได้ว่า $\psi_d < \psi \leq 90^\circ$

ความสัมพันธ์ของระยะต่างๆ ของบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูจากรูปที่ ก.9

$$b = 2b_1 + b_3 + \delta_1 \quad (\text{ก.81})$$

$$c = \frac{a}{\sin \psi} \quad (\text{ก.81})$$

ความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้ง 2 บ่วง δ ที่ตัวนำแนวเฉียง

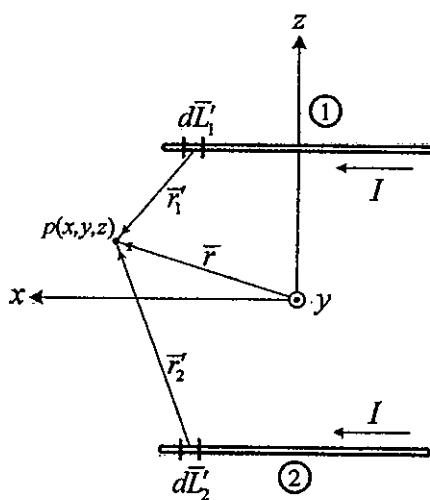


รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ของระยะ δ

จากรูปที่ ก.10 จะได้ว่า

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\sin \psi} \quad \text{และ} \quad \delta_2 = \sqrt{\delta_1^2 - \delta^2} \quad (\text{ก.82})$$

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ด้านที่ 1 และ 2 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.11 การคำนวณในกรณีที่ 1

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 คือ $(x'_1, y'_1, z'_1 = \frac{b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_1 = (x-x'_1)\hat{a}_x + (y-y'_1)\hat{a}_y + (z-z'_1)\hat{a}_z \quad (\text{ก.83})$$

$$R_1 = \sqrt{(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2} \quad (\text{ก.84})$$

$$d\bar{L}_1 = dx'_1\hat{a}_x \quad (\text{ก.85})$$

จาก

$$\bar{H}_1 = \oint \frac{Id\bar{L}_1 \times \hat{a}_{R_1}}{4\pi R_1^2} \quad (\text{ก.86})$$

จะได้

$$\bar{H}_1 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_1 \hat{a}_x \times ((x-x'_1)\hat{a}_x + (y-y'_1)\hat{a}_y + (z-z'_1)\hat{a}_z)}{[(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.87})$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I((y-y'_1)\hat{a}_z - (z-z'_1)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'}{[(x-x'_1)^2 + (y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.88})$$

$$\bar{H}_1 = \frac{I(-(z-z'_1)\hat{a}_y + (y-y'_1)\hat{a}_z)}{4\pi((y-y'_1)^2 + (z-z'_1)^2)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_1)^2 + 4(z-z'_1)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_1)^2 + 4(z-z'_1)^2}} \right] \quad (\text{ก.89})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 1 $y'_1 = 0$, $z'_1 = \frac{b}{2}$ ในสมการที่ (ก.89)

$$\bar{H}_1 = \frac{I\left(-\left(z-\frac{b}{2}\right)\hat{a}_y + y\hat{a}_z\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z-\frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} \right] \quad (\text{ก.90})$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 2 คือ $(x'_2, y'_2, z'_2 = \frac{-b}{2})$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้ว่า

$$\bar{R}_2 = (x-x'_2)\hat{a}_x + (y-y'_2)\hat{a}_y + (z-z'_2)\hat{a}_z \quad (\text{ก.91})$$

$$R_2 = \sqrt{(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2} \quad (\text{ก.92})$$

$$d\vec{L}_2 = dx'_2 \hat{a}_x \quad (\text{ก.93})$$

จาก

$$\vec{H}_2 = \oint \frac{I d\vec{L}_2 \times \hat{a}_{R_2}}{4\pi R_2^2} \quad (\text{ก.94})$$

ทำนองเดียวกับกรณีแหล่งกำเนิดที่ 1 จะได้

$$\vec{H}_2 = \frac{I}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'_2 \hat{a}_x \times ((x-x'_2)\hat{a}_x + (y-y'_2)\hat{a}_y + (z-z'_2)\hat{a}_z)}{[(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.95})$$

$$\vec{H}_2 = \frac{I((y-y'_2)\hat{a}_z - (z-z'_2)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx'}{[(x-x'_2)^2 + (y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.96})$$

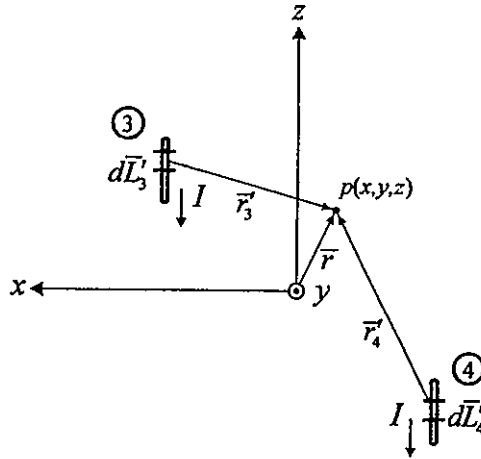
$$\vec{H}_2 = \frac{I(-(z-z'_2)\hat{a}_y + (y-y'_2)\hat{a}_z)}{4\pi((y-y'_2)^2 + (z-z'_2)^2)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4(y-y'_2)^2 + 4(z-z'_2)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4(y-y'_2)^2 + 4(z-z'_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.97})$$

แทนค่า $y'_2 = 0$, $z'_2 = \frac{-b}{2}$ ใน (ก.97) จะได้

$$\vec{H}_2 = \frac{I\left(-\left(z+\frac{b}{2}\right)\hat{a}_y + y\hat{a}_z\right)}{4\pi\left(y^2 + \left(z+\frac{b}{2}\right)^2\right)} \left[\frac{a-2x}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} + \frac{a+2x}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} \right] \quad (\text{ก.98})$$

จากสมการ (ก.90) และ (ก.98) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง y และ z

กรณีที่ 2 การวิเคราะห์ด้านที่ 3 และ 4 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.12 การคำนวณในกรณีที่ 2

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 คือ $(x'_3 = \frac{a}{2}, y'_3, z'_3)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆ ก็ได้

$$\bar{R}_3 = (x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z \quad (\text{ก.99})$$

$$R_3 = \sqrt{(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2} \quad (\text{ก.100})$$

$$d\bar{L}_3 = dz'_3\hat{a}_z \quad (\text{ก.101})$$

จาก

$$\bar{H}_3 = \oint \frac{I d\bar{L}_3 \times \hat{a}_{R_3}}{4\pi R_3^2} \quad (\text{ก.102})$$

จะได้

$$\bar{H}_3 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}+h} \frac{dz'_3\hat{a}_z \times ((x - x'_3)\hat{a}_x + (y - y'_3)\hat{a}_y + (z - z'_3)\hat{a}_z)}{[(x - x'_3)^2 + (y - y'_3)^2 + (z - z'_3)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.103})$$

$$\bar{H}_3 = \frac{I(-(y-y'_3)\hat{a}_x + (x-x'_3)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}+h} \frac{dz'_3}{\left[(x-x'_3)^2 + (y-y'_3)^2 + (z-z'_3)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.104})$$

$$\bar{H}_3 = \frac{I(-(y-y'_3)\hat{a}_x + (x-x'_3)\hat{a}_y)}{4\pi\left[(x-x'_3)^2 + (y-y'_3)^2\right]} \left[\frac{\frac{b-2z}{\sqrt{4(x-x'_3)^2 + 4(y-y'_3)^2 + (b-2z)^2}}}{-b+2(b_1+z)} \right] \quad (\text{ก.105})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 3 $x'_3 = \frac{a}{2}$, $y'_3 = 0$ ใน (ก.105) จะได้

$$\bar{H}_3 = \frac{I\left(-y\hat{a}_x + \left(x - \frac{a}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left[\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} - \frac{-b+2(b_1+z)}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_1+z))^2}} \right] \quad (\text{ก.106})$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 คือ $(x'_4 = \frac{-a}{2}, y'_4, z'_4)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_4 = (x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z \quad (\text{ก.107})$$

$$R_4 = \sqrt{(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2} \quad (\text{ก.108})$$

$$d\bar{L}_4 = dz'_4\hat{a}_z \quad (\text{ก.109})$$

จาก

$$\bar{H}_4 = \oint \frac{Id\bar{L}_4 \times \hat{a}_{R_4}}{4\pi R_4^2} \quad (\text{ก.110})$$

จะได้

$$\bar{H}_4 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-b}{2}+b_1}^{\frac{-b}{2}} \frac{dz'_4\hat{a}_z \times \left[(x-x'_4)\hat{a}_x + (y-y'_4)\hat{a}_y + (z-z'_4)\hat{a}_z\right]}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.111})$$

$$\bar{H}_4 = \frac{I(-(y-y'_4)\hat{a}_x + (x-x'_4)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-b}{2}+b_1}^{\frac{-b}{2}} \frac{dz'_4}{\left[(x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2 + (z-z'_4)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.112})$$

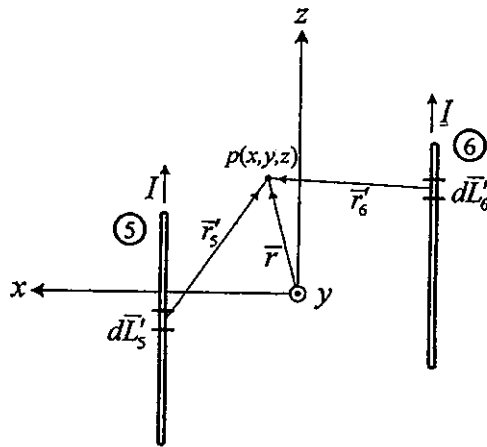
$$\vec{H}_4 = \frac{I(-y-y'_4)\hat{a}_x + (x-x'_4)\hat{a}_y}{4\pi((x-x'_4)^2 + (y-y'_4)^2)} \left[\frac{b+2z}{\sqrt{4(x-x'_4)^2 + 4(y-y'_4)^2 + (b+2z)^2}} + \frac{b-2(b_1-z)}{\sqrt{4(x-x'_4)^2 + 4(y-y'_4)^2 + (b-2(b_1-z))^2}} \right] \quad (\text{ก.113})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 4 $x'_4 = \frac{-a}{2}$, $y'_4 = 0$ ใน (3.113) จะได้

$$\vec{H}_4 = \frac{I\left(-y\hat{a}_x + \left(x + \frac{a}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left(\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{b+2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} + \frac{b-2(b_1-z)}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_1-z))^2}} \right] \quad (\text{ก.114})$$

จากสมการ (ก.106) และ (ก.114) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที่ 3 การวิเคราะห์ด้านที่ 5 และ 6 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.13 การคำนวณในกรณีที่ 3

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 คือ $(x'_5 = \frac{a}{2}, y'_5, z'_5)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\vec{R}_5 = (x-x'_5)\hat{a}_x + (y-y'_5)\hat{a}_y + (z-z'_5)\hat{a}_z \quad (\text{ก.115})$$

$$R_5 = \sqrt{(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2} \quad (\text{ก.116})$$

$$d\bar{L}_5 = dz'_5 \hat{a}_z \quad (\text{ก.117})$$

จาก

$$\bar{H}_5 = \oint \frac{I d\bar{L}_5 \times \hat{a}_{R_5}}{4\pi R_5^2} \quad (\text{ก.118})$$

จะได้

$$\bar{H}_5 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-b}{2}}^{\frac{-b}{2}+b_2} \frac{dz'_5 \hat{a}_z \times ((x-x'_5)\hat{a}_x + (y-y'_5)\hat{a}_y + (z-z'_5)\hat{a}_z)}{[(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.119})$$

$$\bar{H}_5 = \frac{I(-(y-y'_5)\hat{a}_x + (x-x'_5)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-b}{2}}^{\frac{-b}{2}+b_2} \frac{dz'_5}{[(x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2 + (z-z'_5)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.120})$$

$$\bar{H}_5 = \frac{I(-(y-y'_5)\hat{a}_x + (x-x'_5)\hat{a}_y)}{4\pi((x-x'_5)^2 + (y-y'_5)^2)} \left[\frac{\frac{b+2z}{\sqrt{4(x-x'_5)^2 + 4(y-y'_5)^2 + (b+2z)^2}}}{\frac{b-2(b_2-z)}{\sqrt{4(x-x'_5)^2 + 4(y-y'_5)^2 + (b-2(b_2-z))^2}}} \right] \quad (\text{ก.121})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 5 $x'_5 = \frac{a}{2}$, $y'_5 = 0$ ในสมการ (ก.121) จะได้

$$\bar{H}_5 = \frac{I(-y\hat{a}_x + (x-\frac{a}{2})\hat{a}_y)}{4\pi\left(\left(x-\frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right)} \left[\frac{b+2z}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b+2z)^2}} - \frac{b-2(b_2-z)}{\sqrt{(a-2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_2-z))^2}} \right] \quad (\text{ก.122})$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 คือ $(x'_6 = \frac{-a}{2}, y'_6, z'_6)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_6 = (x-x'_6)\hat{a}_x + (y-y'_6)\hat{a}_y + (z-z'_6)\hat{a}_z \quad (\text{ก.123})$$

$$R_6 = \sqrt{(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2} \quad (\text{ก.124})$$

$$d\bar{L}_6 = dz'_6 \hat{a}_z \quad (\text{ก.125})$$

จาก

$$\bar{H}_6 = \oint \frac{Id\bar{L}_6 \times \hat{a}_{R_6}}{4\pi R_6^2} \quad (\text{ก.126})$$

จะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{b}{2}-b_2}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_6 \hat{a}_z \times ((x-x'_6)\hat{a}_x + (y-y'_6)\hat{a}_y + (z-z'_6)\hat{a}_z)}{[(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.127})$$

$$\bar{H}_6 = \frac{I(-(y-y'_6)\hat{a}_x + (x-x'_6)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{b}{2}-b_2}^{\frac{b}{2}} \frac{dz'_6}{[(x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2 + (z-z'_6)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.128})$$

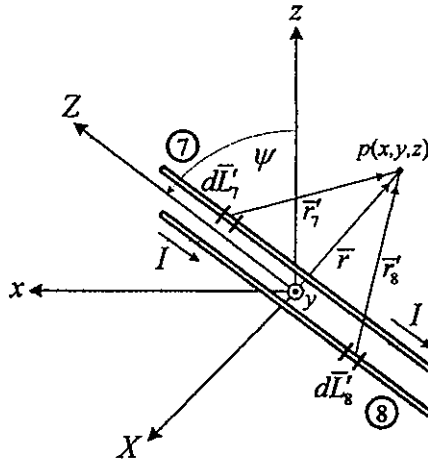
$$\bar{H}_6 = \frac{I(-(y-y'_6)\hat{a}_x + (x-x'_6)\hat{a}_y)}{4\pi((x-x'_6)^2 + (y-y'_6)^2)} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{4(x-x'_6)^2 + 4(y-y'_6)^2 + (b-2z)^2}} + \frac{-b+2(b_2+z)}{\sqrt{4(x-x'_6)^2 + 4(y-y'_6)^2 + (b-2(b_2+z))^2}} \right] \quad (\text{ก.129})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 6 $x'_6 = \frac{-a}{2}$, $y'_6 = 0$ ใน (ก.129) จะได้

$$\bar{H}_6 = \frac{I(-y\hat{a}_x + (x + \frac{a}{2})\hat{a}_y)}{4\pi\left[\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{b-2z}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2z)^2}} + \frac{-b+2(b_2+z)}{\sqrt{(a+2x)^2 + 4y^2 + (b-2(b_2+z))^2}} \right] \quad (\text{ก.130})$$

จากสมการ (ก.122) และ (ก.130) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x และ y

กรณีที 4 การวิเคราะห์ด้านที่ 7 และ 8 ของสายอากาศ



รูปที่ ก.14 การคำนวณในกรณีที 4

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด 7 คือ $(X'_7 = \frac{-\delta}{2}, y'_7, Z'_7)$ และจุดสังเกต $p(x, y, z)$ แปลงเป็น $p(X, y, Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_7 = (X - X'_7)\hat{a}_x + (y - y'_7)\hat{a}_y + (Z - Z'_7)\hat{a}_z \quad (\text{ก.131})$$

$$R_7 = \sqrt{(X - X'_7)^2 + (y - y'_7)^2 + (Z - Z'_7)^2} \quad (\text{ก.132})$$

$$d\bar{L}_7 = dZ'_7\hat{a}_z \quad (\text{ก.133})$$

จาก

$$\bar{H}_7 = \oint \frac{Id\bar{L}_7 \times \hat{a}_{R_7}}{4\pi R_7^2} \quad (\text{ก.134})$$

จะได้

$$\bar{H}_7 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-c+\delta_2}{2}}^{\frac{c+\delta_2}{2}} \frac{dZ'_7\hat{a}_z \times ((X - X'_7)\hat{a}_x + (y - y'_7)\hat{a}_y + (Z - Z'_7)\hat{a}_z)}{[(X - X'_7)^2 + (y - y'_7)^2 + (Z - Z'_7)^2]^{3/2}} \quad (\text{ก.135})$$

$$\bar{H}_7 = \frac{I(-(y-y'_7)\hat{a}_x + (X-X'_7)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-c+\delta_2}{2}}^{\frac{c+\delta_2}{2}} \frac{dZ'_7}{\left[(X-X'_7)^2 + (y-y'_7)^2 + (Z-Z'_7)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.136})$$

$$\bar{H}_7 = \frac{I(-(y-y'_7)\hat{a}_x + (X-X'_7)\hat{a}_y)}{4\pi\left[(X-X'_7)^2 + (y-y'_7)^2\right]} \left[\frac{c+2z-\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_7)^2 + 4(y-y'_7)^2 + (c+2z-\delta_2)^2}} - \frac{c-2z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_7)^2 + 4(y-y'_7)^2 + (c-2z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.137})$$

แทนค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 7 $x'_7 = \frac{-\delta}{2}$, $y'_7 = 0$ ในสมการที่ (ก.137) จะได้

$$\bar{H}_7 = \frac{I\left(-y\hat{a}_x + \left(X + \frac{\delta}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left[\left(X + \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{c+2Z-\delta_2}{\sqrt{(2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c+2Z-\delta_2)^2}} - \frac{c-2Z+\delta_2}{\sqrt{(2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c-2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.138})$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ 8 คือ $(X'_8 = \frac{\delta}{2}, y'_8, Z'_8)$ และจุดสังเกต $p(x,y,z)$ แปลงเป็น $p(X,y,Z)$ อยู่ที่จุดใดๆจะได้

$$\bar{R}_8 = (X-X'_8)\hat{a}_x + (y-y'_8)\hat{a}_y + (Z-Z'_8)\hat{a}_z \quad (\text{ก.139})$$

$$R_8 = \sqrt{(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2} \quad (\text{ก.140})$$

$$d\bar{L}_8 = dZ'_8\hat{a}_z \quad (\text{ก.141})$$

จาก

$$\bar{H}_8 = \oint \frac{Id\bar{L}_8 \times \hat{a}_{R_8}}{4\pi R_8^2} \quad (\text{ก.142})$$

จะได้

$$\bar{H}_8 = \frac{I}{4\pi} \int_{\frac{-c-\delta_2}{2}}^{\frac{c-\delta_2}{2}} \frac{dZ'_8\hat{a}_z \times \left((X-X'_8)\hat{a}_x + (y-y'_8)\hat{a}_y + (Z-Z'_8)\hat{a}_z\right)}{\left[(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.143})$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I(-(y-y'_8)\hat{a}_x + (X-X'_8)\hat{a}_y)}{4\pi} \int_{\frac{-c-\delta_2}{2}}^{\frac{c-\delta_2}{2}} \frac{dZ'_8}{\left[(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2 + (Z-Z'_8)^2\right]^{3/2}} \quad (\text{ก.144})$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I(-(y-y'_8)\hat{a}_x + (X-X'_8)\hat{a}_y)}{4\pi\left[(X-X'_8)^2 + (y-y'_8)^2\right]} \left[\frac{-c+2z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_8)^2 + 4(y-y'_8)^2 + (-c+2z+\delta_2)^2}} - \frac{c+2z+\delta_2}{\sqrt{4(X-X'_8)^2 + 4(y-y'_8)^2 + (c+2z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.145})$$

$$\bar{H}_8 = \frac{I\left(-y\hat{a}_x + \left(X - \frac{\delta}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left[\left(X - \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{-c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(-2X+\delta)^2 + 4y^2 + (-c+2Z+\delta_2)^2}} - \frac{c+2Z+\delta_2}{\sqrt{(-2X+\delta)^2 + 4y^2 + (c+2Z+\delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.146})$$

จากสมการที่ (ก.138) (ก.146) ทำการแปลงพิกัด (X,y,Z) ให้เป็นพิกัด (x,y,z) จะได้

$$\bar{H}_7 = \frac{I\left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left(x \cos \psi - z \sin \psi + \frac{\delta}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left[\left(x \cos \psi - z \sin \psi + \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{c+2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2}{\sqrt{4\left(x \cos \psi - z \sin \psi + \frac{\delta}{2}\right)^2 + 4y^2 + (c+2(x \sin \psi + z \cos \psi) - \delta_2)^2}} - \frac{c-2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2}{\sqrt{4\left(x \cos \psi - z \sin \psi + \frac{\delta}{2}\right)^2 + 4y^2 + (c-2(x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)^2}} \right] \quad (\text{ก.147})$$

$$\bar{H}_8 = \frac{-I\left(-y(\hat{a}_x \cos \psi - \hat{a}_z \sin \psi) + \left(x \cos \psi - z \sin \psi - \frac{\delta}{2}\right)\hat{a}_y\right)}{4\pi\left[\left(x \cos \psi - z \sin \psi - \frac{\delta}{2}\right)^2 + y^2\right]} \left[\frac{c-2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)}{\sqrt{4\left(x \cos \psi - z \sin \psi - \frac{\delta}{2}\right)^2 + 4y^2 + (c-2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2))^2}} + \frac{c+2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2)}{\sqrt{4\left(x \cos \psi - z \sin \psi - \frac{\delta}{2}\right)^2 + 4y^2 + (c+2((x \sin \psi + z \cos \psi) + \delta_2))^2}} \right] \quad (\text{ก.148})$$

จากสมการ (ก.147) และ (ก.148) จะพิจารณาได้ว่ามีองค์ประกอบทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทาง x y และ z ตามลำดับ

จากสมการสนามทั้ง 4 กรณีได้แก่สมการที่ (ก.90) (ก.98) (ก.106) (ก.114) (ก.122) (ก.130) (ก.147) และสมการที่ (ก.148) นำมารวมเข้าด้วยกันจะได้ค่าสนามแม่เหล็กของบ่วงคู่แบบสี่เหลี่ยมคางหมู

$$\bar{H} = \bar{H}_1 + \bar{H}_2 + \bar{H}_3 + \bar{H}_4 + \bar{H}_5 + \bar{H}_6 + \bar{H}_7 + \bar{H}_8 \quad (\text{ก.149})$$

ค่าสนามแม่เหล็ก รวมทั้งหมดที่เป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถแตกองค์ประกอบย่อยของสนาม H_x , H_y และ H_z ได้

$$\bar{H} = H_x \hat{a}_x + H_y \hat{a}_y + H_z \hat{a}_z \quad (\text{ก.150})$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ -- นามสกุล	นายชวาลธวัช หมั่นทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	12 สิงหาคม 2522
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ชวาลธวัช หมั่นทรัพย์, ไพโรจน์ วุ่นชุม, ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ดนัย ต.รุ่งเรือง, “การวิเคราะห์สายอากาศบ่วงคู่ทรงสี่เหลี่ยมคางหมูสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, หน้า 789-792, พฤศจิกายน 2549.
- [2] Chawanthawat Mansap, Phairote Wounchoum, Chuwong Phongcharoenpanich and Danai Torrungrueng, “Trapezoidal Dual Loop Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System at Low Frequency”, Asia Pacific Microwave Conference 2006, vol.3, pp.1478-1481, Dec. 2006.