

ตำราฝึกหัดทฤษฎีกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ
Design of Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System



โดย

นางสาวเจียรนัย กลิ่นเลขา

นายวีระศักดิ์ คณอยู่

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **62844**

วัน,เดือน,ปี.. **2.3. ส.ค. 2549**

๖-11๕๖๖๖๖๐
.....
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของ

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(ลงชื่อ).....ผู้ตรวจ

การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ
Design of Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System



โดย

นางสาวเจียรนัย กลิ่นเลขา 46015006

นายวีระศักดิ์ คนอยู่ 46015028

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

Design of Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System

ผู้จัดทำ

1. นางสาวเจียรนัย กลิ่นเลขา 46015006
2. นายวีระศักดิ์ กนอยู่ 46015028


(ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์) อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ
Design of Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) System

โดย นางสาวเจียรนัย กลิ่นเลขา 46015006
นายวีระศักดิ์ คนอยู่ 46015028

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้จะศึกษาและออกแบบสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ที่ย่านความถี่ต่ำ สายอากาศที่ออกแบบสามารถทำให้ระบบ RFID ที่ย่านความถี่ต่ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และในโครงการนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถใช้งานระบบ RFID Tag ได้ที่ระยะความห่างมากขึ้นกว่าที่มีมาก่อน ซึ่งมีข้อดีคือไม่ต้องใช้ระบบ RFID Tag ที่มีย่านความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำนี้จะใช้พลังงานน้อยซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการระบุคุณลักษณะสัตว์หรือผลไม้

Abstract

This project concerns with the study and design of the antenna for Radio Frequency Identification (RFID) system at the low frequency band. The proposed antenna has better performance than the conventional antenna at the low frequency range. In addition, the suitable parameters will be selected to achieve for further distance. The advantage of this project is to use the low frequency band that the RFID Tag consumes lower energy than that of the high frequency. This system can be further applied to identify the animals and fruits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา คือ อาจารย์ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และอาจารย์คนัย ต.รุ่งเรืองที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับทางคณะผู้จัดทำทั้งในอดีตและปัจจุบัน ทั้งยังขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม คุณสุรสิทธิ์ ละมุลตรี คุณชวลาธวัช หมั่นทรัพย์ บริษัท ไออีเทคโนโลโลยี สำหรับความช่วยเหลือทั้งอุปกรณ์ในการทดลองคำปรึกษาและคำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่ง รวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องของทางคณะผู้จัดทำ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมานะพากเพียรทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

นางสาวเจียรนัย กลิ่นเลขา

นายวีระศักดิ์ กนอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.2 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 4 |
| 2.1 ส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ | 4 |
| 2.1.1 เครื่องลูกข่าย | 4 |
| 2.1.1.1 Passive RFID Tags | 5 |
| 2.1.1.2 Active RFID Tags | 5 |
| 2.1.2 ประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID | 5 |
| 2.1.2.1 เครื่องลูกข่ายแบบงานและเหรียญ (Disk and coin) | 5 |
| 2.1.2.2 เครื่องลูกข่ายแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing) | 5 |
| 2.1.2.3 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก (Plastic housing) | 5 |
| 2.1.2.4 เครื่องลูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ | 6 |
| 2.1.2.5 เครื่องลูกข่ายแบบพวงกุญแจ (Key and Key fob) | 6 |
| 2.1.2.6 เครื่องลูกข่ายแบบนาฬิกา | 6 |
| 2.1.2.7 เครื่องลูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส | 6 |
| 2.1.2.8 เครื่องลูกข่ายแบบ Smart label | 6 |
| 2.1.2.9 เครื่องลูกข่ายแบบขดลวดบนชิป (Coin-on-chip) | 6 |
| 2.1.3 เครื่องอ่าน (Reader) | 7 |
| 2.2 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ | 7 |
| 2.2.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type) | 7 |
| 2.2.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) | 7 |
| 2.2.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX) | 8 |
| 2.2.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity) | 8 |
| 2.2.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable) | 8 |
| 2.2.4 แหล่งพลังงาน (Power supply) | 9 |
| 2.2.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency range) | 9 |
| 2.3 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID | 10 |
| 2.3.1 ความถี่ใช้งาน | 10 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| 2.3.2 ระยะทำการ | 10 |
| 2.3.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย | 10 |
| 2.3.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล | 10 |
| 2.3.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ | 10 |
| 2.3.3.3 มาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็ก | 11 |
| 2.3.4 ขนาดของหน่วยความจำ | 11 |
| 2.4 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive Coupling | 11 |
| 2.4.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย | 11 |
| 2.4.2 การส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมายังเครื่องอ่าน | 13 |
| 2.4.2.1 เทคโนโลยี Load Modulation | 13 |
| 2.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศลวด | 13 |
| 2.5.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศลวด | 16 |
| 2.5.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด | 20 |
| 2.5.2.1 ขนาดและค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสดังตรง | 20 |
| 2.5.2.2 ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสดับของลวด | 20 |
| 2.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศลวด | 21 |
| 2.5.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด | 22 |
| 2.5.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด | 22 |
| 2.5.3.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศลวดแบบลูปวงกลม | 24 |
| 2.5.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดลูปสี่เหลี่ยม | 25 |
| 2.6 โครงสร้างของสายอากาศลวด | 25 |
| 2.6.1 สายอากาศลวดของเครื่องลูกข่าย | 25 |
| 2.6.2 สายอากาศลวดของเครื่องอ่าน | 26 |
| 2.7 วงจรเรโซแนนซ์ ค่าประสิทธิภาพ Q และแบนด์วิดท์ | 27 |
| 2.7.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน | 28 |
| 2.7.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม | 30 |
| 2.7.3 ค่าประสิทธิภาพ (Q) และแบนด์วิดท์ | 31 |
| 2.7.3.1 การกำหนดขอบเขตของค่าประสิทธิภาพ | 32 |
| 2.7.3.2 วิธีการจูน | 33 |
| 2.8 ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ | 34 |
| 2.9 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูปขดลวดคือเป็น 2 เกตประตู่ | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| 2.9.1 สายอากาศแบบลูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ Inphase | 36 |
| 2.9.2 สายอากาศแบบลูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ Out of phase | 36 |
| บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ คำนวณ และการออกแบบ | 38 |
| 3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศแบบลูปขดลวด | 38 |
| 3.1.1 ขนาด โครงสร้างของสายอากาศแบบลูปขดลวดอย่างง่าย | 38 |
| 3.1.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบลูปขดลวดอย่างง่าย | 40 |
| 3.1.3 โครงสร้างของสายอากาศลูปขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตูดอ | 43 |
| 3.2 วิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบเกตประตูดอที่ทำการออกแบบ | 44 |
| 3.2.1 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของโครงสร้างสายอากาศแบบเกตประตูดอ Out of phase ที่ทำในเครื่องลูกข่ายทำงานได้ | 46 |
| 3.2.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของโครงสร้างสายอากาศแบบเกตประตูดอ Inphase ที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ | 48 |
| 3.2.3 วิเคราะห์ระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) ของสายอากาศ | 50 |
| 3.3 โครงสร้างของสายอากาศขดลวดที่ได้จากการวิเคราะห์ | 50 |
| 3.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.5 เมตร | 51 |
| 3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.3 เมตร | 52 |
| 3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.1 เมตร | 54 |
| 3.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0 เมตร | 55 |
| 3.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.1 เมตร | 57 |
| 3.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.3 เมตร | 58 |
| 3.3.7 การวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.5 เมตร | 60 |
| 3.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะลูปของสายอากาศ | 61 |
| 3.5 สรุปผลการวิเคราะห์ | 62 |
| บทที่ 4 การสร้างและผลการทดสอบ | 63 |
| 4.1 การสร้างสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบขดลวด | 63 |
| 4.1.1 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ | 63 |
| 4.1.2 การสร้างสายอากาศความถี่ต่ำแบบขดลวด | 64 |
| 4.2 ผลการทดสอบ | 67 |
| 4.2.1 ผลจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำและอ่านค่าความจุไฟฟ้า | 67 |
| 4.2.2 ผลจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำและวัดค่าความจุไฟฟ้า | 67 |
| 4.2.3 ผลการทดสอบเมื่อต่อสายอากาศกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ | 68 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| 4.2.4 ผลการทดสอบเมื่อต่อสายอากาศกับเครื่องอ่าน | 69 |
| 4.2.4.1 เมื่อป้อนกระแสแบบ Out Of Phase | 69 |
| 4.2.4.2 เมื่อป้อนกระแสแบบ Inphase | 71 |
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป | 73 |
| 5.1 สรุปผลการทดสอบ | 73 |
| กิตติกรรมประกาศ | 74 |
| หนังสืออ้างอิง | 75 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย | 3 |
| รูปที่ 2.1 แสดงความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex | 8 |
| รูปที่ 2.2 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย เป็นการรับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน | 11 |
| รูปที่ 2.3 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) ที่ลวดตัวนำ | 15 |
| รูปที่ 2.4 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) เข้าลูป | 15 |
| รูปที่ 2.5 การลดลงของค่าสนามแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r | 16 |
| รูปที่ 2.6 พื้นฐานโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านและสายอากาศเครื่องลูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ | 17 |
| รูปที่ 2.7 การปรับทิศทางของสายอากาศของเครื่องลูกข่ายให้เหมาะสม | 18 |
| รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน | 19 |
| รูปที่ 2.9 รูปของขดลวด | 24 |
| รูปที่ 2.10 สายอากาศขดลวดลูปวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใดๆ | 24 |
| รูปที่ 2.11 สายอากาศขดลวดแบบลูปสี่เหลี่ยม | 25 |
| รูปที่ 2.12 รัศมีของโครงสร้างของสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย | 26 |
| รูปที่ 2.13 สายอากาศรูปทรงานฟอรัมเมอร์ของเครื่องอ่าน | 27 |
| รูปที่ 2.14 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน | 28 |
| รูปที่ 2.15 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม | 30 |
| รูปที่ 2.16 ค่าประสิทธิภาพกับรูปแบบการมอดูเลต | 32 |
| รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ | 33 |
| รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ | 34 |
| รูปที่ 2.19 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ | 35 |
| รูปที่ 2.20 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล | 35 |
| รูปที่ 2.21 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ inphase | 36 |
| รูปที่ 2.22 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ Out of phase | 37 |
| รูปที่ 3.1 ระยะอ่านและค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่ขนาดของสายอากาศต่างกัน | 40 |
| รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบลูปขดลวดอย่างง่าย | 41 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.3 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร ของลวดเบอร์ 18 | 41 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 3.4 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร ของลวดเบอร์ 22 | 42 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศรูปขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตู่ | 43 |
| รูปที่ 3.6 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กกระยะใกล้แบบเกตประตู่ ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร | 43 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| รูปที่ 3.6 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กกระยะใกล้แบบเกตประตู่ ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร (ต่อ) | 44 |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 3.7 โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบ 3 มิติ | 45 |
| รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบ 2 มิติ ทางระนาบ xz | 45 |
| รูปที่ 3.9 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน x ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 46 |
| รูปที่ 3.10 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน y ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 47 |
| รูปที่ 3.11 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 47 |
| รูปที่ 3.12 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน x ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 48 |
| รูปที่ 3.13 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน y ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 49 |
| รูปที่ 3.14 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ | 49 |
| รูปที่ 3.15 โครงสร้างของสายอากาศขดลวดที่ได้จากการวิเคราะห์ | 50 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่รวมทุกแนวแกน (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | 51 |
| รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร(ต่อ) (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | 52 |
| รูปที่ 3.17 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.3 เมตร (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่รวมทุกแนวแกน (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | 53 |
| รูปที่ 3.18 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.1 เมตร (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่รวมทุกแนวแกน (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | 54 |
| รูปที่ 3.18 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.1 เมตร(ต่อ) (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | 55 |
| รูปที่ 3.19 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่รวมทุกแนวแกน (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | 56 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.20 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.1 เมตร | 57 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| รูปที่ 3.20 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.1 เมตร(ต่อ) | 58 |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 3.21 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.3 เมตร | 59 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 3.22 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.5 เมตร | 60 |
| (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน | |
| (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x | |
| รูปที่ 3.22 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.5 เมตร(ต่อ) | 61 |
| (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y | |
| (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z | |
| รูปที่ 4.1 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม | 63 |
| รูปที่ 4.2 ภาพวงจรจับของเครื่องอ่านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ความถี่ต่ำของบริษัท IE Technology | 64 |
| รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศ | 65 |
| รูปที่ 4.4 รูปด้านซ้ายของสายอากาศ | 65 |
| รูปที่ 4.5 รูปด้านขวาของสายอากาศ | 66 |
| รูปที่ 4.6 รูปโครงสร้างสายอากาศที่ทำการทดลอง | 66 |
| รูปที่ 4.7 เครื่องอ่านและเครื่องถูกขยับที่ใช้ในการทดลอง | 67 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.8 เครื่องวัดค่าความเหนียวนาและค่าความต้านทาน | 68 |
| รูปที่ 4.9 ทิศทางการป้อนกระแสแบบ Out Of Phase | 69 |
| รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ Tag สามารถทำงานได้และระยะแนวแกน Y ของสายอากาศ | 71 |
| รูปที่ 4.11 ทิศทางการป้อนกระแสแบบ Inphase | 71 |
| รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ Tag สามารถทำงานได้และระยะแนวแกน Y ของสายอากาศ | 72 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของลวด | 23 |
| ตารางที่ 4.1 บันทึกผลความถี่เรโซแนนซ์ที่ขนาดของสัญญาณต่างๆ | 68 |
| ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างตารางที่ใช้ในการเก็บผล | 70 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

เทคโนโลยีแสดงตัวตนแบบอัตโนมัติหรือที่เรียกเป็นศัพท์ทางวิชาการว่า Automatic Identification หรือ Auto-ID เป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานาน รวมทั้งยังมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นในแวดวงอุตสาหกรรม 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 ที่ได้รับความนิยมแพร่หลายมากที่สุด

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

เทคโนโลยีระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) มีรูปแบบการทำงานที่คล้ายคลึงกับเทคโนโลยี Smartcard อยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมภายใน ที่มีการจัดเก็บและบันทึกข้อมูลลงบนหน่วยความจำบนแผ่นพลาสติก ซึ่งในกรณีของ RFID แผ่นบันทึกข้อมูลอาจมีรูปแบบแตกต่างกันไปไม่จำเป็นต้องเป็นแบบบัตรเครดิตเสมอไปและเพื่อความสะดวกในการเรียกขาน จึงขอเรียกแผ่นบันทึกข้อมูลในกรณีของ RFID ว่า “เครื่องลูกข่าย” หรือภาษาอังกฤษว่า Transponder เนื่องจากปรัชญาในการออกแบบมาตรฐาน RFID ที่ต้องการให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน (ซึ่งยังคงหมายถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอ่านและเขียนข้อมูล) เป็นแบบไม่สัมผัสกัน (Contactless) ทำให้ต้องมีการหาทางส่งพลังงานไฟฟ้าไปป้อนให้กับเครื่องลูกข่ายในรูปแบบอื่น จึงเกิดแนวคิดในการกำหนดมาตรฐานทางเทคนิคเพื่อส่งทั้งข้อมูลสัญญาณฐานเวลา และพลังงานไฟฟ้าที่จะไปปรากฏเป็นไฟเลี้ยงให้กับวงจรภายในเครื่องลูกข่าย ไปในรูปของคลื่นวิทยุผ่านตัวนำที่เป็นอากาศ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Identification : RFID) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุในการระบุลักษณะของคนหรือวัตถุโดยอัตโนมัติ เป็นวิธีการจำแนกได้ครั้งละจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่โดยทั่วไปเป็นการจัดเก็บตามหมายเลขประจำตัวของวัสดุ บุคคล หรือวัตถุ และในบางครั้งหมายรวมถึงสารสนเทศอื่นๆ ลงไมโครชิปที่ประกอบด้วยสายอากาศ (Antenna หรือ สายสัญญาณสำหรับรับส่งคลื่นจากระยะไกล โดยที่ชิปและสายอากาศ รวมเข้าด้วยกันเรียกว่า RFID Transponder หรือ RFID Tag แต่ในที่นี้จะขอเรียกว่า เครื่องลูกข่าย) สายอากาศทำให้ชิปสามารถส่งข้อมูลเฉพาะไปยังเครื่องอ่านได้ เครื่องอ่านจะแปลงคลื่นความถี่วิทยุที่สะท้อนกลับจากเครื่องลูกข่าย กลายเป็นข้อมูลดิจิทัลผ่านเข้าไปทางคอมพิวเตอร์เพื่อให้นำข้อมูลมาใช้ได้ ข้อมูลทางเทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะประกอบด้วย เครื่องลูกข่ายที่เป็นไมโครชิป (Microchip Tag) ซึ่งมีสายอากาศ และเครื่องอ่านที่มีสายอากาศเช่นกัน เครื่องอ่านจะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาและสายอากาศของเครื่องลูกข่ายจะรับและแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นพลังงาน ส่งผ่านไปทีระบบของเครื่องลูกข่ายเพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับแผงวงจรไมโครชิป เพื่อให้ชิปนั้นแปลงคลื่นความถี่ จากนั้นเครื่องลูกข่ายจะส่งคลื่นความถี่วิทยุกลับไปยังเครื่องอ่าน และเครื่องอ่านจะแปลงคลื่นที่ได้ใหม่ให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัล

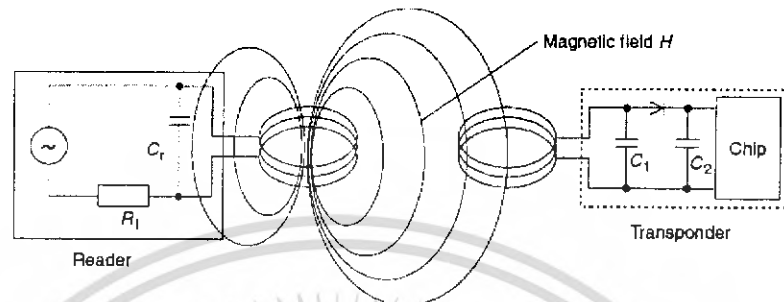
จุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ที่เห็นได้อย่างชัดเจนมีดังนี้

- สามารถอ่านข้อมูลจากป้ายหรือ เครื่องลูกข่ายได้หลายๆ เครื่องลูกข่ายพร้อมๆ กันแบบไร้สัมผัส
- สามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี (มองไม่เห็น)
- สามารถอ่านค่าได้แม้ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง (Non-Line Of Sight) เทียบกับเครื่องอ่าน (RFID Reader)
- ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน และการกระทบกระแทก
- สามารถอ่านข้อมูลได้ระยะไกล
- สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง

ปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะยังไม่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายแต่มีแนวโน้มที่จะขยายมากขึ้นอย่างรวดเร็วในอนาคต เพราะเราสามารถบรรจุสารสนเทศต่างๆ ลงในระบบของเครื่องลูกข่ายได้ตามที่เราต้องการ เนื่องจากระบบของเครื่องลูกข่าย คือไมโครชิปที่มีหน่วยความจำเช่นเดียวกับหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำการประมวลผลการทำงานได้ตามโปรแกรมคำสั่งที่ผู้ใช้งานต้องการได้ การทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นคือ ระบบของเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่านต้องมีการปรับคลื่นความถี่ให้เหมือนกันเพื่อการสื่อสาร เช่นเดียวกับการฟังวิทยุ นั้นเราจำเป็นต้องปรับจูนคลื่นความถี่ให้ตรงกับสถานีที่ต้องการฟัง ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุใช้ได้หลายย่านความถี่ แต่การใช้โดยทั่วไปส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency : LF ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125 kHz) ย่านความถี่สูง (High Frequency : HF ประมาณ 13.56 MHz) ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF ประมาณ 860-960 MHz) และย่านความถี่ไมโครเวฟ (ประมาณ 2.45 GHz) ซึ่งในแต่ละย่านความถี่นั้นก็มีความแตกต่างในเรื่องของความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานแต่ละประเภท [1]



รูปที่ 1.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย

โครงการนี้จะทำการวิเคราะห์สายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ต่ำ (125 kHz) และออกแบบสายอากาศที่สามารถทำให้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ต่ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และในโครงการนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้ที่ระยะความห่าง (ระยะการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของสายอากาศของเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน) มากขึ้นกว่าที่มีมาก่อน ซึ่งมีข้อดีคือสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น ไม่ต้องใช้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ที่สูง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำนี้จะใช้พลังงานน้อยซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้ในการระบุคุณลักษณะคน สัตว์หรือผลไม้

1.2 เนื้อหาของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ต่ำและสายอากาศแบบขดลวด [1-4]

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ คำนวณและการออกแบบสายอากาศ ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 และผลของการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศโดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code : NEC2) และเป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามต้องการ [5]

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ แสดงผลที่ได้จากการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 5 สรุปผลคุณลักษณะทั้งหมดของสายอากาศตลอดจนวิจารณ์ผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

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

2.1 ส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือเครื่องลูกข่าย ที่ใช้ติดกับวัตถุต่างๆ ที่เราต้องการ โดยเครื่องลูกข่ายที่ว่าจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือเครื่องสำหรับอ่านหรือเขียน (Reader) ข้อมูลภายในเครื่องลูกข่าย ด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน เครื่องลูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็คือเครื่องอ่านบาร์โค้ด (Scanner) โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบรหัสแท่งจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้แสงในการอ่านรหัสแท่งซึ่งจะต้องอ่านรหัสแท่งที่ไม่มีอะไรปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ที่ละชั้น ในระยะใกล้ๆ แต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านเครื่องลูกข่ายได้โดยไม่ต้องเห็นเครื่องลูกข่าย หรือเครื่องลูกข่ายนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่น เพียงอยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านเครื่องลูกข่ายในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุยังสามารถอ่านได้หลายๆ เครื่องลูกข่ายในเวลาเดียวกัน

2.1.1 เครื่องลูกข่าย

โครงสร้างภายในของเครื่องลูกข่ายจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ(Antenna)สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้า โดยทั่วไปตัวเครื่องลูกข่ายอาจอยู่ในชนิดทั้งเป็น กระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่างๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำไปใช้ และยังมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่ากับบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งเครื่องลูกข่าย ที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน ซึ่งจะขอกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 Passive RFID Tags

เครื่องลูกข่ายชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ เพราะภายในเครื่องลูกข่ายจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน

2.1.1.2 Active RFID Tags

เครื่องลูกข่ายชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน โดยเครื่องลูกข่ายแบบนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่

2.1.2 ประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID

อุปกรณ์เครื่องลูกข่าย RFID ประเภทต่างๆ ที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่างๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

2.1.2.1 เครื่องลูกข่ายแบบจานและเหรียญ (Disk and coin)

เครื่องลูกข่ายจะถูกบรรจุอยู่ใน โครงสร้างทรงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องลูกข่ายชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตร ไปจนถึง 10 เซนติเมตร

2.1.2.2 เครื่องลูกข่ายแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)

เป็นเครื่องลูกข่ายที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงสัตวศาสตร์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 มิลลิเมตร

2.1.2.3 เครื่องลูกข่ายแบบพลาสติก (Plastic housing)

นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic Package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ เครื่องลูกข่ายแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภทที่พบเห็นทั่วไปก็คือการนำเครื่องลูกข่ายแบบ PP ติดตั้งฝังอยู่กับพวงกุญแจรถยนต์ในลักษณะของพวงกุญแจอัจฉริยะ (Electronic immobilization system)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.4 เครื่องถูกข่ายสำหรับใช้เฉพาะกิจ

เป็นเครื่องถูกข่าย RFID อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุเครื่องถูกข่ายลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ

2.1.2.5 เครื่องถูกข่ายแบบพวงกุญแจ (Key and Key fob)

เครื่องถูกข่าย RFID สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล

2.1.2.6 เครื่องถูกข่ายแบบนาฬิกา

เครื่องถูกข่ายแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2535 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรเลียที่มีชื่อว่า Sky-Data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ลู่วิ่งสำหรับนักศึกษาทั้งหลาย

2.1.2.7 เครื่องถูกข่ายมาตรฐาน ID-1 และ Smartcard แบบไร้การสัมผัส

เครื่องถูกข่ายแบบ ID-1 มีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตรหรือบัตร โทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณ 85.72 คูณ 54.03 มิลลิเมตร ความหนา 0.76 มิลลิเมตร เป็นเครื่องถูกข่ายที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าเครื่องถูกข่ายแบบอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก

2.1.2.8 เครื่องถูกข่ายแบบ Smart label

เป็นเครื่องถูกข่าย RFID บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบางๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบพอลิพลาสติกความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โคนทั่วไปแถบพอลิเหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด

2.1.2.9 เครื่องถูกข่ายแบบขดลวดบนชิป (Coin-on-chip)

เครื่องถูกข่าย RFID ชนิดนี้มีความแตกต่างจากเครื่องถูกข่ายแบบอื่นๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างเครื่องถูกข่ายกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับเครื่องถูกข่ายแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 เครื่องอ่าน (Reader)

โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านก็คือ การเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในเครื่องลูกข่าย ด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ภายในเครื่องอ่านจะประกอบด้วย เสาอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดง เพื่อใช้รับส่งสัญญาณ ภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุ และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์

โดยทั่วไปเครื่องอ่านจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ
- ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ
- วงจรจูนสัญญาณ
- หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านมักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาด และรูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น

2.2 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.2.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type)

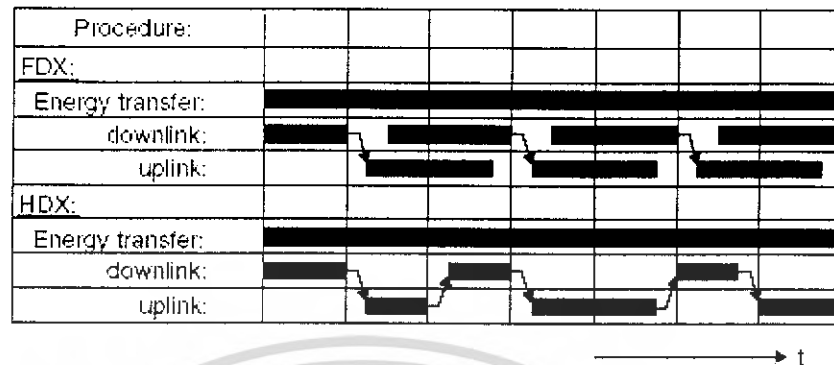
อุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ทั้งเครื่องลูกข่าย (Transponder) หรือเครื่องอ่าน (Reader) จะมีรูปแบบการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) / Half Duplex (HDX)

2.2.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX)

เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับเครื่องลูกข่ายที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่เครื่องลูกข่ายส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่าน ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตนเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่าดังนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้มอดูเลตสัญญาณแบบ Load Modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องลูกข่ายได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย (Downlink) และการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายกับมายังเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex [1]

2.2.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับเครื่องลูกข่ายตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย (Downlink) และการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายกลับมาถึงเครื่องอ่าน (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย ดังรูปที่ 2.1

2.2.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์เครื่องลูกข่าย RFID จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data capacity) ได้ขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลายๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างเครื่องลูกข่าย RFID อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit transponder) ซึ่งเครื่องลูกข่ายแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานะภาพเท่านั้น

2.2.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของเครื่องลูกข่าย RFID ตามขีดความสามารถในการ โปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นเครื่องลูกข่ายที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใดๆ ตามที่ใครรับคำสั่งจ้างทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นเครื่องลูกข่าย RFID ที่สามารถทำการ โปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของเครื่องลูกข่ายที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เล็อกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งในบางกรณีเครื่องลูกข่ายอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากเครื่องลูกข่ายจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งาน สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 3 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

ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (LF ระยะอ่านประมาณ 10-20 เซนติเมตร 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 kHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างเครื่องลูกข่ายและเครื่องอ่านซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ RFID ทำงานที่ความถี่ในย่าน HF น่าจะให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางกว้าง

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์เครื่องลูกข่ายที่ทำงานในย่านไมโครเวฟนั้นต้องการแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายๆ ประการ สิ่งที่ต้องพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ RFID ในย่านความถี่ต่ำก็คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.3.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย RFID สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการคือ ตำแหน่งของเครื่องลูกข่าย, ระยะห่างขั้นต้นระหว่างเครื่องลูกข่ายแต่ละเครื่องกับเครื่องอ่าน 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strength : H) ไม่เกิน $16.3/\sqrt{f}$ A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power Density : S) ไม่เกิน $10,000/f^2$ mW/cm² โดยคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging Time) 6 นาที [5]

2.3.3.3 มาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็ก

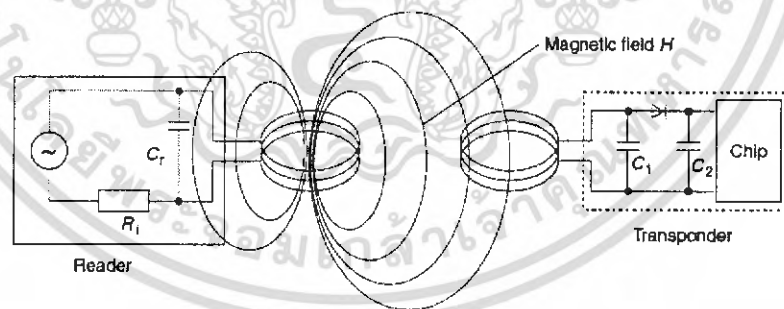
มาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB μ A/m [1]

2.3.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของเครื่องลูกข่าย RFID บ่อยมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้เครื่องลูกข่ายที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้เครื่องลูกข่ายแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือเครื่องลูกข่ายทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบหรืออำนวยความสะดวกในการเดินทางแทนที่จะเก็บข้อมูลไว้ในบัตรก็ได้

2.4 เทคโนโลยี RFID ที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive Coupling

เป็นมาตรฐานที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางคลื่นแม่เหล็ก โครงสร้างของเครื่องลูกข่ายประกอบไปด้วยแผงวงจรหรือชิปที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยมีขดลวดพื้นที่กว้างทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.2 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย เป็นการรับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน [1]

2.4.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังเครื่องลูกข่าย

เนื่องจากการทำงานของเครื่องลูกข่ายนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) คือไม่มีแหล่งพลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับพลังงาน (Energy) มาจากเครื่องอ่านโดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่าน (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและพลังงานไป) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัว) ให้สามารถส่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำลังสูง สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถครอบคลุมที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของเครื่องลูกข่ายได้อย่างเหมาะสม ประกอบทั้งความยาวคลื่นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งกระจายออกมาจากเครื่องอ่านนั้นมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่าน ซึ่งโดยทั่วไปวางห่างกันในหลักไม่มากนัก

เทคโนโลยี RFID แบบ Inductive Coupling ส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำเพียง 125 kHz หรืออาจจะต่ำกว่า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีความยาวคลื่นสูงมากถึง 2,400 เมตร จึงไม่มีปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่นที่สั้นเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนหรือถูกกลทอนจากผนังอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ หากพิจารณาถึงพื้นที่ใช้งานโดยทั่วไปที่มีได้ไกลหรือกว้างมากนัก

สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะตกกระทบขดลวดสายอากาศของเครื่องลูกข่าย ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดอ่อนๆ ขึ้นบนขดลวด ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำไปเข้ากระบวนการเรกติไฟร์ โดยตัวเก็บประจุและไดโอดเพื่อกรองให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนให้กับอุปกรณ์ชิป การออกแบบอยู่ที่การเลือกค่าของตัวเก็บประจุ C1 ซึ่งจะต้องมีค่าสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด L เพื่อให้สามารถกำหนดค่าความถี่กำทอน (Resonant frequency) ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่าน เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องลูกข่าย เปรียบเทียบการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสองในรูปที่ 2.2 จะเทียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวด 2 ชุด แต่ขดลวดทั้งสองมิได้พันอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน กลายเป็นใช้อากาศซึ่งมีคุณสมบัติในการนำพาสัญญาณที่เลวร้ายกว่าแกนแม่เหล็กมากๆ

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 แต่ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้แรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงลดลง เมื่อเทียบกับการใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ทำให้จำกัดระยะทางในการใช้งานมากขึ้น การเลือกใช้อุปกรณ์ Inductive Coupling จึงต้องพิจารณาทั้งขนาดของเครื่องลูกข่ายและระยะทางที่ต้องการใช้งานตรวจจับเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อใช้กำหนดเลือกย่านความถี่ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ใช้งาน

สิ่งที่พึงให้ความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบ RFID แบบ Inductive Coupling ก็คือ พฤติกรรมการกินกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ชิปที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องลูกข่าย เนื่องจากก่อนข้างมีความหลากหลายและสัมพันธ์กับรูปแบบในการนำไปประยุกต์ใช้งาน การเลือกค่าความถี่พื้นฐานในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่ายระยะทางพื้นที่ใช้งาน และขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากจำนวนรอบของขดลวดสายอากาศ 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

พฤติกรรมในการส่งพลังงานและสัญญาณระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านและขดลวดของเครื่องลูกข่ายมีแบบจำลองที่ไม่ต่างจากการทำงานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแต่อย่างใด หากแต่เพียงตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานเป็นอากาศไม่ใช่โลหะหรือแท่งแม่เหล็กดังเช่นที่พบเห็นในหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป แต่การใช้อากาศเป็นตัวกลางถ่ายทอดสัญญาณระหว่างขดลวดทั้งสองนั้น จะทำได้ก็ต่อเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายห่างกันไม่เกิน 0.16 เท่าของค่าความยาวคลื่น (0.16λ) ซึ่งหากคิดกรณีที่ใช้ความถี่ในย่าน 125 kHz ที่มีความยาวคลื่น $2,400$ เมตร ก็จะหมายความว่า จะวางเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่านห่างกันได้ในระยะทางไม่เกิน 0.16 คูณ $2,400 = 384$ เมตร

หากมีการนำเครื่องลูกข่ายซึ่งมีคุณสมบัติของขดลวดและตัวเก็บประจุ (LC) ตรงกันกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องอ่านมาใช้ในพื้นที่ตรวจสอบที่มีการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่าน เครื่องลูกข่ายย่อมจะดึงพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน ซึ่งหากพิจารณาในแง่ของวงจรไฟฟ้าแล้ว เครื่องอ่านจะมองเห็นเครื่องลูกข่ายเป็นโหลดวงจรตัวหนึ่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ ZT ต่อพ่วงอยู่กับขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่าน การเปลี่ยนแปลงใดๆ ไม่ว่าจะเป็นการส่งหรือหยุดส่งพลังงานจากเครื่องอ่านย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ZT ที่เครื่องอ่านอย่างแน่นอน เนื่องจากในแง่ของวงจรเรโซแนนซ์ ที่เกิดจากขดลวด (L) และตัวเก็บประจุ (C) บนเครื่องลูกข่ายย่อมมีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ตกกระทบ และไม่มีภาระจ่ายพลังงานก็เทียบเท่ากับความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์เสมือน ZT นี้ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่านโดยปริยาย ซึ่งเป็นสัญญาณแจ้งให้เครื่องอ่านทราบว่ากำลังจะมีการส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายมา เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Load Modulation ส่วนจะประยุกต์ใช้งานส่งข้อมูลแบบ Half Duplex หรือ Full Duplex นั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบวงจรตรวจจับและถอดรหัสสัญญาณซึ่งเป็นเรื่องที่ยังรายละเอียดไปในการออกแบบ

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศขดลวด

ในการพัฒนาสายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ มีเหตุผลหลักอยู่ 2 ประการคือ

- เพื่อต้องการส่งความถี่วิทยุ (คลื่นพาห้) ให้เป็นกำลังงานของเครื่องลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุ (สัญญาณข้อมูล) จากเครื่องลูกข่าย

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ สามารถที่จะแพร่กระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพในมิติเชิงเส้นของสายอากาศ ซึ่งเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ในการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่ต่ำ (100kHz-500kHz) ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าประมาณ 2-3 กิโลเมตร (สัญญาณความถี่ 125 kHz จะได้ $\lambda = 2.4$ km) เนื่องจากค่าของความยาวคลื่นมีค่ายาวมาก ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะสร้างสายอากาศได้ในระยะที่จำกัดตามจริง แต่มีทางเลือกหนึ่งเป็นสายอากาศขดลวดแบบลูปขนาดเล็ก ซึ่งจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน (125 kHz) สายอากาศชนิดนี้จะใช้สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ (near field magnetic) ในการเชื่อมต่อการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศขดลวดตัวส่งและตัวรับ

การทำให้เกิดสนามโดยสายอากาศแบบลูปไดโพลขนาดเล็กนั้นจะไม่แพร่กระจายคลื่น แต่จะทำให้คลื่นอ่อนกำลังลงมากกว่า ความเข้มสนามถูกลดลงด้วย r^{-3} (เมื่อ r = ระยะห่างจากสายอากาศ) ในสนามระยะใกล้ (r^{-3}) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวจำกัดระยะการอ่านในการใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านขดลวด (สายอากาศ) เป็นการเหนี่ยวนำแรงดันให้ตกคร่อมด้านปลายสุดของขดลวด แรงดันนี้จะใช้เพื่อกระตุ้นเครื่องลูกข่ายแบบพาสซีฟ ดังนั้นสายอากาศขดลวดส่วนมากจะถูกออกแบบให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันได้สูงสุด

กฎของแอมแปร์ ได้กล่าวไว้ว่า การไหลของกระแสในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ ตัวนำ รูปที่ 2.3 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสส่วนหนึ่ง สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในตัวนำ (ลวด) ที่มีความยาวจำกัด คิดได้จากสมการ

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

โดยที่ I = กระแส

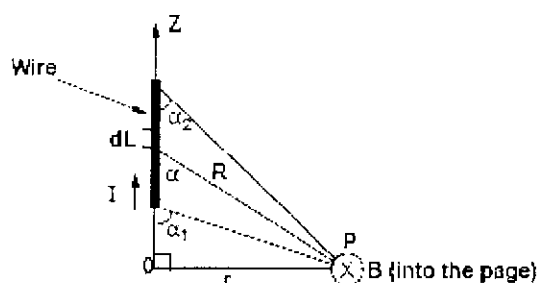
r = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของลวด

μ_0 = ค่าเพอร์มิททีบิลิตีของสายอากาศมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) ที่ลวดตัวนำ [2]

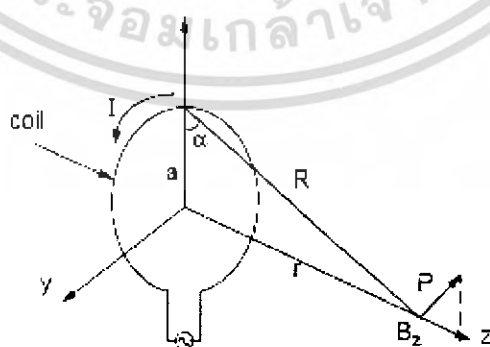
สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศชนิดลวดแบบลูปวงกลม จำนวน N รอบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 จะได้สมการดังนี้

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

$$= \frac{\mu_0 INa^2}{2} \left(\frac{1}{r^3} \right) ; r^2 \gg a^2$$

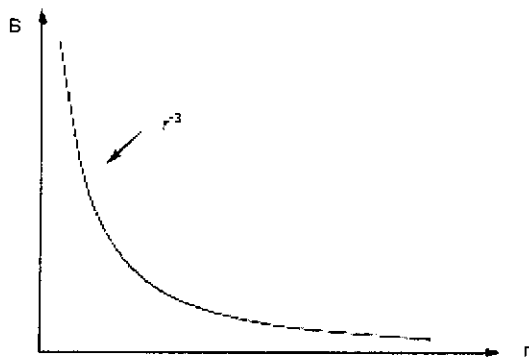
โดยที่ $a =$ รัศมีของลูป

สมการที่ 2.3 นี้แสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศแบบลูป ถูกลดลงด้วย $1/r^3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ความเข้มของสนามที่มากที่สุดในระยะของลูปและทิศทางที่เหมาะสมสัมพันธ์กับค่ากระแส (I), จำนวนรอบ (N) และพื้นที่ผิวของลูป สมการที่ 2.3 ใช้มากสำหรับคำนวณหาค่า กระแส-รอบ ซึ่งจำเป็นสำหรับระยะการอ่าน ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อกำลังงานที่เครื่องลูกข่ายจะได้รับตามสัดส่วน



รูปที่ 2.4 การคำนวณของสนามแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) เข้าลูป [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การลดลงของค่าสนามแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r [2]

2.5.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศขดลวด

จากกฎของฟาราเดย์ กล่าวไว้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านพื้นผิวปิด จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรอบรูป ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ

รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เมื่อสายอากาศของเครื่องลูกข่ายและสายอากาศของเครื่องอ่านอยู่ในระยะที่ใกล้กัน สนามแม่เหล็ก B ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดจากสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านเหนี่ยวนำแรงดัน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) ในสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่เหมาะสมได้เรียกว่ากฎของฟาราเดย์

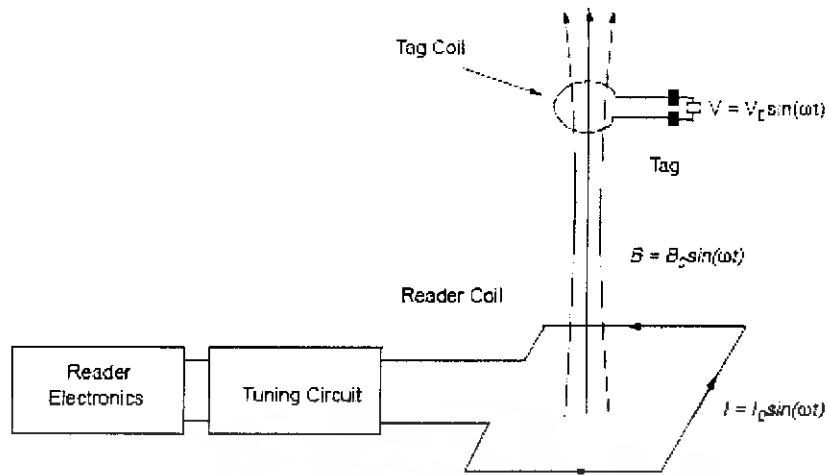
ในการเหนี่ยวนำแรงดันบนสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux : ψ) ต่อเวลา จะได้สมการที่ 2.4

$$V = -N \frac{d\psi}{dt} \quad (2.4)$$

โดยที่ N = จำนวนรอบของสายอากาศขดลวด

ψ = เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านแต่ละรอบ

เครื่องหมายลบในสมการการเหนี่ยวนำแรงดัน แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดกระแสไหลซึ่งมีผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ที่รู้กันในชื่อกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ซึ่งเป็นการเน้นถึงความจริงของทิศทางกระแสไหลของกระแสนวนจร แสดงว่าแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม



รูปที่ 2.6 พื้นฐาน โครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านและสายอากาศเครื่องลูกข่ายใน ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [2]

เส้นแรงแม่เหล็กในสมการที่ 2.4 คือสนามแม่เหล็ก B ทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวทั้งหมดของสายอากาศขดลวดและสามารถหาได้จากสมการ

$$\psi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \tag{2.5}$$

โดยที่ \vec{B} คือ สนามแม่เหล็กที่ได้มาจากสมการที่ 2.3
 \vec{S} คือ พื้นที่ผิวของขดลวด

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

ผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์ในสมการที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวด ซึ่งผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเวกเตอร์ทั้งสองอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่ายจะมีค่ามากที่สุด เมื่อขดลวดทั้งสอง (สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านและสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย) อยู่ในทิศทางที่ขนานกัน

จากสมการที่ 2.3-2.5 จะเป็นการเหนี่ยวนำแรงดัน V_0 สำหรับสายอากาศรูปที่ไม่ได้จูน จะได้สมการที่ 2.6 ดังนี้

$$V_0 = 2\pi fNSB_0 \cos \alpha \tag{2.6}$$

โดยที่ f = ความถี่ของสัญญาณ
 N = จำนวนรอบของขดลวดในลูป
 S = พื้นที่ของลูปในหน่วยเมตรยกกำลังสอง (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารดังกล่าวอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B_0 = ความเข้มของสัญญาณ

α = มุมของสัญญาณ

ถ้าทำการจูนขดลวด (ด้วยตัวเก็บประจุ:C) ที่สัญญาณความถี่ (125kHz) แรงดันเอาต์พุต V_o ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ 2.6 จะคูณด้วยค่าประสิทธิภาพ (Quality Factor) ของวงจรจูน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 50 ที่ความถี่ต่ำของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

$$V_o = 2\pi f_o N Q S B_0 \cos \alpha \quad (2.7)$$

โดยค่าประสิทธิภาพ (Q) เป็นสิ่งบ่งชี้ของการเลือกความถี่ที่เหมาะสม



รูปที่ 2.7 การปรับทิศทางของสายอากาศของเครื่องลูกข่ายให้เหมาะสม [2]

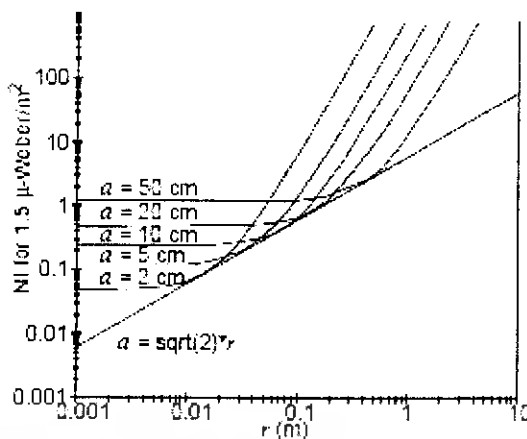
การเห็นยวนำแรงดันข้ามสายอากาศขดลวดแบบรูปเป็นของฟังก์ชันมุมของสัญญาณ แรงดันเห็นยวนำจะมีค่ามากที่สุดเมื่อสายอากาศขดลวดอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับทิศทางของสัญญาณที่ $\alpha = 0$

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก B ที่เครื่องลูกข่ายต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และค่ากระแส-รอบ (Ampere-turns) ของสายอากาศขดลวดเครื่องอ่านที่มีรัศมีใดๆสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$(NI) = \frac{2B_z (a^2 + r^2)^{3/2}}{\mu a^2} \quad (2.8)$$

สำหรับระยะการอ่านที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการบอกถึงการพิจารณา การเพิ่มขึ้นของรัศมีของขดลวด ซึ่งจะได้ผลมากกว่าการเพิ่มกระแสให้กับขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน [2]

หมายเหตุ : จากรูปที่ 2.8 $B_z = 1.5 \mu Wb / m^2$

รัศมีที่เหมาะสมของรูปต้องการค่าของกระแส-รอบที่น้อยที่สุด สำหรับระยะของการอ่านสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 เช่น

$$NI = K \frac{(a^2 + r^2)^{3/2}}{a^2} \tag{2.9}$$

โดยที่ $K = \frac{2B_z}{\mu_0}$

โดยการนำอนุพันธ์มาใช้เพื่อหาค่ารัศมีจะได้

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

จากสมการข้างต้นจะกลายเป็นสมการที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลลัพธ์ข้างต้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่าย
ค่ารัศมีที่เหมาะสมจะหาได้จาก

$$a = \sqrt{2}r$$

โดยที่ a = รัศมีของขดลวด
 r = ระยะการอ่าน

จากผลลัพธ์ข้างต้นบอกให้รู้ว่า ค่ารัศมีที่เหมาะสมที่สุดของลูสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านจะมี
ค่าประมาณ 1.414 หรือ ค่ารากที่สองของระยะการอ่าน

2.5.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด

2.5.2.1 ขนาดและค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรง

เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทางไฟฟ้าจะแสดงตัวเลขตามมาตรฐานอเมริกา (American Wire Gauge : AWG) ค่าตัวเลขจะเป็นสัดส่วนที่ตรงกันข้ามกับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยประมาณจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุกๆขนาดลวดเพิ่มไปหกเบอร์ ลวดที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมี ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงที่สูง ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงของตัวนำที่เป็นแบบเดียวกันตามพื้นที่หน้าตัดหาค่าได้โดย

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma S} \quad (2.10)$$

โดยที่ l = ความยาวทั้งหมดของลวด
 σ = ค่าความนำ
 S = พื้นที่หน้าตัด

ตารางที่ 2.1 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับด้านในและสารเคลือบโลหะของลวด และค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรง

2.5.2.2 ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสสลับของลวด

ที่ทางด้านไฟกระแสตรง ประจุคลื่นพาห้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของลวด ขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่ารีแอกแตนซ์ในลวดก็เพิ่มขึ้นด้วย มีผลให้ขอบเขตความหนาแน่นกระแสในค่าอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นประจุจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของลวดไปยังจุดสิ้นสุดของลวด มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลงในจุดศูนย์กลางของลวดและเพิ่มขึ้นใกล้จุดสิ้นสุดของลวด เรียกปรากฏการณ์ว่าผลกระทบของพื้นผิว (skin effect) ความหนาภายในตัวนำจะมีความหนาแน่นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง $1/e$ หรือ 37% ของค่าความยาวพื้นผิว จะรู้ได้จากค่าความหนาของพื้นผิว (skin depth) , ค่าฟังก์ชันของความถี่ , ค่าเพอร์มีอิตีวี่และค่าความนำของตัวกลาง ค่าความหนาของพื้นผิวสามารถหาได้จากสมการ

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.11)$$

โดยที่ f = ความถี่
 μ = ค่าเพอร์มีอิตีวี่ของวัสดุ
 σ = ค่าความนำของวัสดุ

ค่าความต้านทานของลวดกับความถี่จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานที่เกิดจากความหนาของพื้นผิวเรียกว่า ความต้านทานทางต้านไฟฟ้ากระแสสลับ การประมาณค่าความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับหาได้จากสมการ

$$R_{ac} \approx \frac{1}{2\sigma\pi\delta} = (R_{DC}) \frac{a}{2\delta} \quad (2.12)$$

โดยที่ a = รัศมีของขดลวด

สำหรับลวดทองแดง จะมีค่าความสูญเสียประมาณได้โดยค่าความต้านทานทางต้านไฟฟ้ากระแสตรงของลวด ถ้ารัศมีของเส้นลวดใหญ่กว่า $0.066/\sqrt{f}$ เซนติเมตร ที่ 125 kHz ค่ารัศมีวิกฤตคือ 0.019 เซนติเมตร ในที่นี้จะเท่ากับขนาดลวดเบอร์ 26 เพราะฉะนั้นสำหรับค่าความสูญเสียน้อยๆ ขนาดเบอร์ของลวดต้องใหญ่กว่าเบอร์ 26 ควรจะดูจากค่าประสิทธิภาพ (Q) ของขดลวดที่มีค่าสูงสุด

2.5.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด

กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสผ่านตัวนำอีกตัวหนึ่ง เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะของตัวนำ ขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าเส้นลวดที่เป็นวัสดุที่เหมือนกัน และขดลวดที่มีจำนวนรอบมากก็จะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าขดลวดที่มีจำนวนรอบน้อย ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำมีนิยามคือ อัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

$$L = \frac{N\psi}{I} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $N =$ จำนวนรอบ
 $l =$ กระแส
 $\psi =$ เส้นแรงแม่เหล็ก

สำหรับสายอากาศขดลวดที่ความถี่ 125 kHz ของเครื่องลูกข่ายจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 2-3 (mH) และสายอากาศขดลวดเครื่องอ่านจะเลือกค่าความเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 200-300 ถึง 2,000-3,000 (μ H) จำนวนรอบที่มากขึ้นของสายอากาศขดลวดก็จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่มากขึ้นตามมา ดังนั้นสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่ายที่มีรูปแบบพื้นที่ที่จำกัด มักจะต้องพันจำนวนรอบของขดลวดที่ลดลง

2.5.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด

ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวดที่แสดงในรูปที่ 2.1 สามารถหาได้จากสมการ

$$L = 0.002l \left[\log_e \frac{2l}{a} - \frac{3}{4} \right] \quad (2.14)$$

โดยที่ $L =$ ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี
 l และ $a =$ ความยาวและรัศมีของลวดในหน่วยเซนติเมตร ตามลำดับ

2.5.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2.7 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{(aN)^2}{22.9l + 25.4a} \quad (2.15)$$

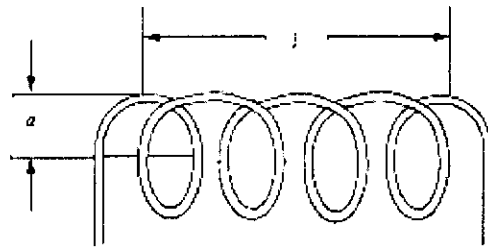
โดยที่ $L =$ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี
 $a =$ รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
 $l =$ ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
 $N =$ จำนวนรอบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 รูปของขดลวด [2]

หมายเหตุ : สำหรับค่าประสิทธิภาพ (Q) ที่ดีที่สุดของขดลวด ควรจะมีความยาวประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

2.5.3.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบรูปวงกลม

จากรูปแบบ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดขนาดใหญ่ในขอบเขตที่จำกัด จะมีประสิทธิภาพมากเมื่อพันขดลวดหลายๆ รอบ เป็นเหตุผลของรูปแบบในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศขดลวดของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 2.10 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบรูปวงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L = \frac{0.31(aN)^2}{6a + 9h + 10b} \quad (2.16)$$

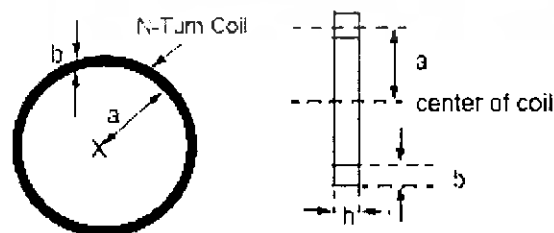
โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบรูปวงกลม มีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี

a = รัศมีเฉลี่ยของขดลวด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

N = จำนวนรอบ

b = ความหนาในการขด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

h = ความสูงในการขด มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 2.10 สายอากาศขดลวดรูปวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใดๆ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

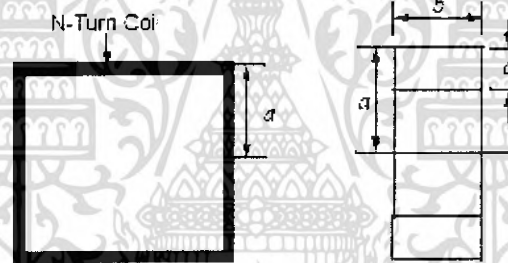
จำนวนรอบที่ต้องการสำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่แน่นอน สามารถคำนวณได้จากการประยุกต์สมการที่ 2.16 ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$N = \sqrt{\frac{L_{\mu H} (6a + 9h + 10b)}{(0.31)a^2}} \quad (2.17)$$

2.5.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดรูปสี่เหลี่ยม

ถ้า N คือจำนวนรอบและ a เป็นความยาวที่วัดจากจุดศูนย์กลางของสี่เหลี่ยมถึงขอบด้านนอกของลวด ส่วนด้านข้างของลวดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว b และความหนา c ดังแสดงในรูปที่ 2.11

$$L = 0.008aN^2 \left(2.303 \log_{10} \left(\frac{a}{b+c} \right) + 0.2235 \frac{b+c}{a} + 0.726 \right) \quad (2.18)$$



(a) รูปด้านหน้า

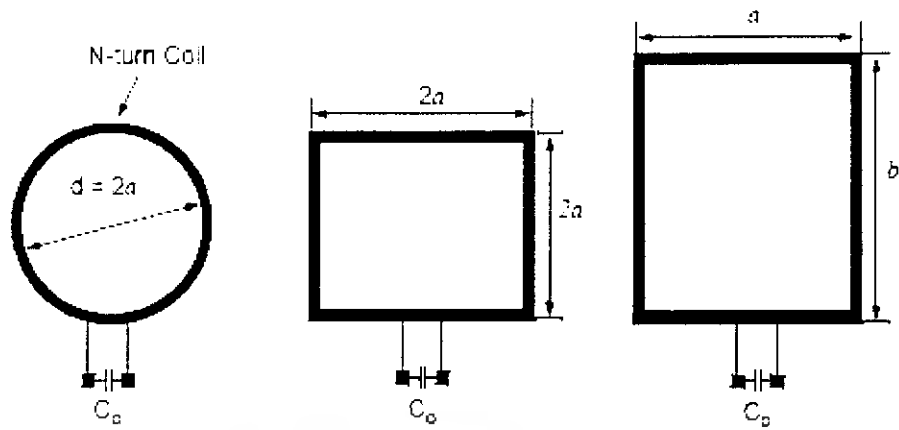
(b) รูปด้านข้าง

รูปที่ 2.11 สายอากาศขดลวดแบบรูปสี่เหลี่ยม [2]

2.6 โครงสร้างของสายอากาศขดลวด

2.6.1 สายอากาศขดลวดของเครื่องถูกขยับ

สายอากาศขดลวดสำหรับเครื่องถูกขยับของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถทำได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์การใช้งาน ตัวอย่างหนึ่งของค่าความเหนี่ยวนำสำหรับสายอากาศขดลวดของเครื่องถูกขยับจะมีค่าประมาณ 2-3 (mH) ที่ความถี่ 125 kHz รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเครื่องถูกขยับ สายอากาศขดลวดโดยทั่วไปมักทำด้วยลวดเส้นเล็กๆ ค่าความเหนี่ยวนำและจะนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.12 รัศมีของโครงสร้างของสายอากาศขดลวดของเครื่องลูกข่าย [2]

2.6.2 สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน

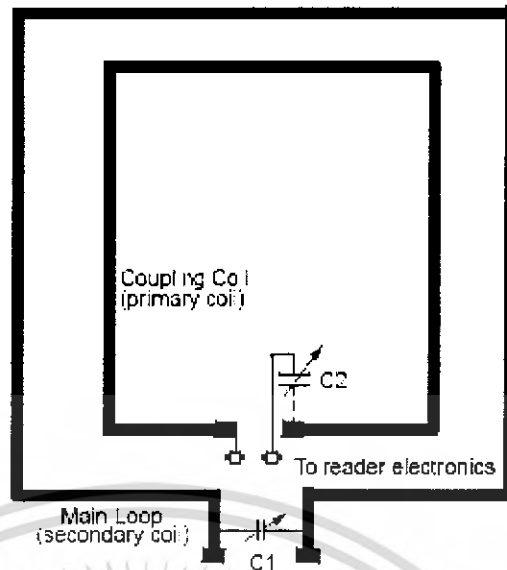
ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดเครื่องอ่าน โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 200-300 ถึง 2,000-3,000 ไมโครเฮนรี ที่ความถี่ต่ำ สายอากาศขดลวดเครื่องอ่านสามารถที่จะทำเป็นรูปเดียวตามรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม หรือ ดับเบิ้ลคูป (transformer) ตามรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ในรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมผลที่ได้จะให้ค่าความต้านทานที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่ามาก ส่วนในวงจรเรโซแนนซ์ขนานจะให้ผลของค่าความต้านทานสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่าน้อย เนื่องจากแรงดันสามารถเพิ่มระดับขึ้นได้โดยการใช้รูปแบบดับเบิ้ลคูป (parallel) วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมักจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการสัญญาณที่มีแรงดันสูง

รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสายอากาศคู่ทรานส์ฟอร์มเมอร์ ที่คูปลหลัก (secondary) เป็นรูปแบบของรอบโครงสร้างขนาดใหญ่ของขดลวด โดยจูนค่าที่ตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้กับความถี่เรโซแนนซ์ (125 kHz) คูปอื่นจะเรียกว่าคูปเชื่อมต่อ (primary) และจะมีรูปแบบที่เล็กกว่า 2-3 รอบของขดลวด ตำแหน่งของคูปเชื่อมต่อ (primary) จะวางอยู่ภายในคูปลหลัก

คูปเชื่อมต่อ (primary) จะทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุต/เอาต์พุตของเครื่องอ่าน การเชื่อมต่อขดลวดที่จูดอินพุต/เอาต์พุตในตัวอ่าน ที่คูปลหลัก (secondary) จะต้องทำการจูนให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์และไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน

คูปเชื่อมต่อโดยทั่วไปจะไม่ได้ทำการจูน แต่ในการออกแบบจะทำการจูนที่ตัวเก็บประจุ C_2 ที่ต่ออนุกรมอยู่กับคูปเชื่อมต่อ เพราะว่าจำนวนรอบที่คูปลหลัก (secondary) มากกว่าคูปเชื่อมต่อ (primary) 2-3 รอบ ทำให้ที่คูปเชื่อมต่อมีค่าความเหนี่ยวนำน้อย เป็นผลให้ต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามาก



รูปที่ 2.13 สายอากาศคู่ทรานส์ฟอร์เมอร์ของเครื่องอ่าน [2]

2.7 วงจรเรโซแนนซ์ ค่าประสิทธิภาพ Q และแบนด์วิดท์

ในการประยุกต์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สายอากาศขนาดเล็กเป็นส่วนสำคัญของวงจรเรโซแนนซ์และระยะในการอ่านของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อย่างมาก

รูปที่ 2.14 และ 2.15 แสดงตัวอย่างรูปแบบของวงจรเรโซแนนซ์ ของสายอากาศขนาดเล็กและการจูนตัวเก็บประจุ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) สามารถคำนวณได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.19)$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขนาดเล็ก

C = ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้จูน

วงจรเรโซแนนซ์สามารถที่จะมีรูปแบบเป็นแบบอนุกรม หรือ แบบขนาน วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ ผลลัพธ์คือจะมีกระแสที่ใช้ในวงจรมาก โดยทั่วไปจะใช้วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสำหรับสายอากาศของเครื่องอ่าน

ส่วนวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งค่ากระแสที่ได้จะมีค่าต่ำและแรงดันจะมีค่าสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับสายอากาศของเครื่องลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรสามารถหาได้จากสมการ

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega L}{(1 - \omega^2 LC) + j\frac{\omega L}{R}} \quad (2.20)$$

โดยที่ ω = ความถี่เชิงมุม = $2\pi f$

R = ความต้านทานโหลด

ในที่นี้ไม่สนใจค่าความต้านทาน (r) ของขดลวด ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อตัวส่วนในสมการข้างต้นมีค่ามาก และค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยเมื่อ

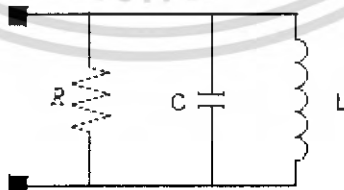
$$\omega^2 LC = 1 \quad (2.21)$$

เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์และความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.22)$$

ทำการแทนสมการที่ 2.21 ลงในสมการที่ 2.20 ค่าความต้านทานที่ความถี่เรโซแนนซ์จะกลายเป็น

$$Z = R \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [2]

ค่า R และ C ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน สามารถนำมาคำนวณแบนด์วิดท์ B ของวงจรได้

ตั้งสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.24)$$

ค่าประสิทธิภาพ Q สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (2.25)$$

โดยที่ $f_0 =$ ความถี่เรโซแนนซ์

$B =$ แบนด์วิธ

แทนสมการที่ 2.22 และ สมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.25 ค่าประสิทธิภาพ Q ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะได้ดังสมการ

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.26)$$

ค่าประสิทธิภาพในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน และค่ารากที่สองอัตราส่วนระหว่างค่าความจุกับค่าความเหนี่ยวนำในวงจร ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับวงจรสายอากาศของเครื่องลูกข่าย แรงดันที่ตกคร่อมในวงจรสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ สมการที่ 2.26

$$V_0 = 2\pi f_0 N Q S B_0 \cos \alpha \quad (2.27)$$

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

สมการข้างต้นแสดงถึงการเหนี่ยวนำแรงดันในขดลวดเครื่องลูกข่ายเป็นส่วนกลับของรากที่สองของค่าความเหนี่ยวนำ และเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนรอบและพื้นที่ผิวของขดลวด

วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถใช้ในสายอากาศแบบลูปทรานฟอร์มเมอร์ สำหรับเครื่องอ่านที่ระยะทางไกลๆ อธิบายได้ในสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน (รูปที่ 2.13) แรงดันในลูปทุติยภูมิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนของจำนวนรอบ (n_2/n_1) ของลูปทรานฟอร์มเมอร์ แม้ว่าสัญญาณมีแรงดันสูงก็ตามไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้ สาเหตุที่แยกสายอากาศเพื่อต้องการสำหรับการรับสัญญาณ วงจรสายอากาศรับควรจะจูนสัญญาณที่ทำการมอดูเลทของเครื่องลูกข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมอย่างง่ายแสดงดังในรูปที่ 2.15 สมการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ

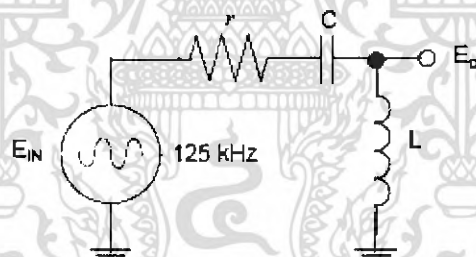
$$Z(j\omega) = r + j(X_L - X_C) \quad (2.28)$$

โดยที่ r = ความต้านทานของวงจร

$$X_L = 2\pi f_0 L \quad (2.29)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (2.30)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.28 จะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบค่ารีแอกแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ($X_L = X_C$) เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์ ความถี่เรโซแนนซ์จะเหมือนกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรขนานตามสมการที่ 2.22



รูปที่ 2.15 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม [2]

กำลังครึ่งของความถี่แบนด์วิดท์จะถูกกำหนดโดยค่า r และ L ดังสมการ

$$B = \frac{r}{2\pi L} \quad (2.31)$$

ค่าประสิทธิภาพ Q ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{f_0}{B} = \begin{cases} \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C r} \\ \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases} \quad (2.32)$$

วงจรรอนุกรมเป็นรูปแบบการแบ่งแรงดัน เพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมในขดลวดจะคำนวณได้จากสมการ

$$V_0 = \frac{jX_L}{r + jX_L - jX_C} V_{in} \quad (2.33)$$

หรือ

$$\left| \frac{V_0}{V_{in}} \right| = \frac{X_L}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{X_L}{r \sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r} \right)^2}} = \frac{Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r} \right)^2}} \quad (2.34)$$

2.7.3 ค่าประสิทธิภาพ (Q) และแบนด์วิดท์

รูปที่ 2.16 แสดงการประมาณช่วงความถี่สำหรับรูปแบบรวมๆ ของการมอดูเลตแบบแอมพลิจูดชีพต์คีย์อิง (ASK), เฟรควเอนซีชีพต์คีย์อิง (FSK) และเฟสชีพต์คีย์อิง (PSK) สำหรับการกู่ของสัญญาณข้อมูลจากเครื่องลูกข่าย วงจรของเครื่องอ่านต้องการแบนด์วิดท์ที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นสองเท่าของอัตราส่วนข้อมูล ดังนั้นถ้าอัตราส่วนของข้อมูลคือ 8 kHz สำหรับสัญญาณแบบแอมพลิจูดชีพต์คีย์อิง แบนด์วิดท์จะต้องมีค่าน้อยที่สุดที่ 16 kHz สำหรับการกู่ของข้อมูลที่ได้รับจากเครื่องลูกข่าย

อัตราข้อมูลสำหรับสัญญาณเฟรควเอนซีชีพต์คีย์อิง ($\div 10$) คือ 12.5 kHz ดังนั้นแบนด์วิดท์ที่ต้องการสำหรับการกู่ข้อมูลคือ 25 kHz

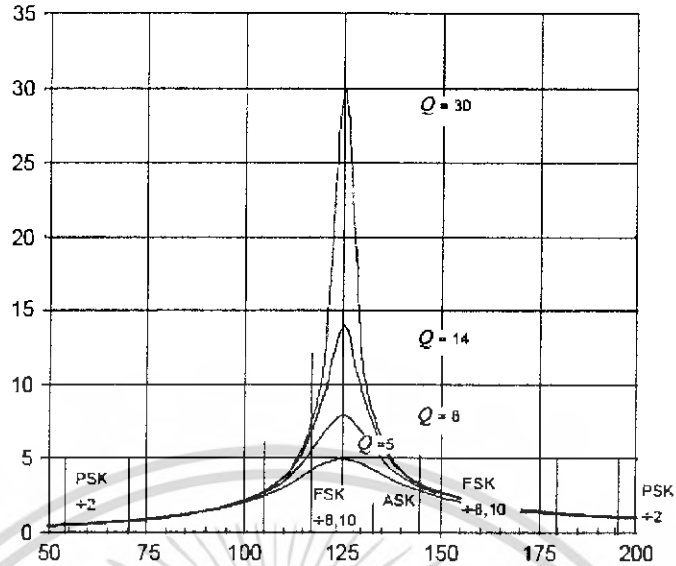
ค่าประสิทธิภาพสำหรับสัญญาณเฟรควเอนซีชีพต์คีย์อิง ($\div 10$) สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.33 ตัวอย่างเช่น

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{125\text{kHz}}{25\text{kHz}} = 5$$

สำหรับสัญญาณเฟสชีพต์คีย์อิง ($\div 2$) อัตราข้อมูลคือ 62.5 kHz (ถ้าความถี่คลื่นพาหาคือ 125 kHz) ดังนั้นวงจรเครื่องอ่านต้องการแบนด์วิดท์ 125 kHz ค่าประสิทธิภาพในกรณีนี้จะเท่ากับ 1

ปัญหาในที่นี้แก้ไขโดยการแยกขดลวดส่งและขดลวดรับซึ่งขดลวดส่งสามารถออกแบบให้มีค่าประสิทธิภาพสูงและขดลวดรับสามารถออกแบบให้มีค่าประสิทธิภาพต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ค่าประสิทธิภาพกับรูปแบบการมอดูเลต [2]

2.7.3.1 การกำหนดขอบเขตของค่าประสิทธิภาพ

เมื่อทำการออกแบบวงจรสายอากาศของเครื่องอ่าน อาจะหลงคิดว่าการออกแบบขดลวดจะต้องมีค่าประสิทธิภาพสูง ในที่นี้มีสามประการที่สำคัญที่เป็นข้อกำหนดขอบเขตในการพิจารณา

- ก) แรงดันที่สูงมากเกิดจากค่าเบรคควานอิน โคลูชัน ในขดลวดหรือค่าความจุที่เรโซแนนซ์ สำหรับตัวอย่าง กระแส 1 แอมป์แปรที่ไหลในขดลวด 2 mH จะทำให้เกิดแรงดันคคร่อมขดลวด 1500 Vpp ข้อเพิ่มเติม ในกรณีของการออกแบบขดลวดเพียงลูปเดียวของตัวอ่าน การกู้สัญญาณที่ได้รับจากเครื่องลูกข่ายจะต้องกระทำที่เปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่มีค่าสูง
- ข) การจูนที่เหมาะสมในช่วงวิกฤต อุปกรณ์ที่ใช้วัดวงจรสายอากาศที่มีค่าประสิทธิภาพสูง, แรงดันสูงจะมีส่วนประกอบของค่าความคลาดเคลื่อนที่ขินยอมได้และ มีความเสถียรภาพสูงน่าจะมีใช้ แต่โดยทั่วไปจะมีราคาแพงและยากที่จะมีใช้โดยทั่วไป
- ค) ค่าประสิทธิภาพของวงจรที่ได้รับมีค่าสูง ค่าแอมปลิจูดของสัญญาณที่ข้อนกลับมาจะสัมพันธ์กับกำลังของคลื่นพาห้ที่ได้รับ ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องลูกข่ายจะมีค่าน้อย วงจรของเครื่องอ่านอาจเกิดความสับสนได้ในการกู้สัญญาณ

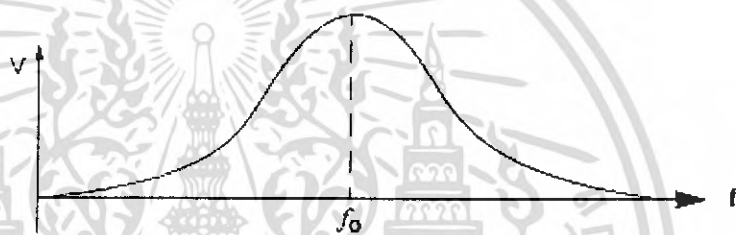
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3.2 วิธีการงู

วงจรถองจูงที่ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับค่ามากที่สุดที่แสดง (ระยะการอ่าน) ของอุปกรณ์ มีอยู่สองตัวอย่างของการงูของวงจรมีดังนี้

1. วิธีการวัดค่าแรงดัน

- ก) ทำการปรับค่าแรงดันที่ต้นกำเนิดของสัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์ (125 kHz)
- ข) คอแรงดันที่ได้จากต้นกำเนิดของสัญญาณคร่อมวงจรรเรโซแนนซ์
- ค) คออสซิลโลสโคปคร่อมวงจรรเรโซแนนซ์
- ง) จูงตัวเก็บประจุหรือขดลวดขณะที่ยังเกิดแอมพลิจูดของสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป
- จ) หยุดการจูงเมื่อได้ค่าแรงดันสูงสุด

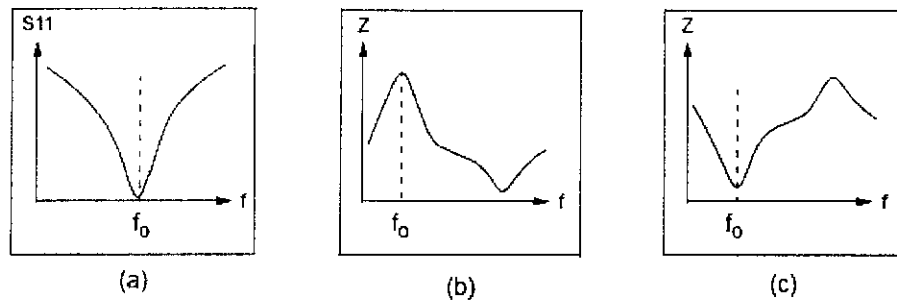


รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรรเรโซแนนซ์[2]

2. เอส-พารามิเตอร์หรือวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

- ก) ทำการปรับค่าเอส-พารามิเตอร์ ทดสอบการปรับค่า (Network Analyzer) สำหรับการวัด S11 และปรับให้อยู่ในตำแหน่งมาตรฐาน
- ข) วัดค่า S11 สำหรับวงจรรเรโซแนนซ์
- ค) อิมพีแดนซ์ที่สะท้อนหรือแอดมิทแตนซ์ที่สะท้อนสามารถวัดแทนค่า S11 ได้
- ง) จูงตัวเก็บประจุหรือขดลวดจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุด หรือมีค่าเป็นศูนย์ (S11) ที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_0 สำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ค่าพิกที่มีค่ามากที่สุดจะเกิดขึ้นสำหรับวงจรรเรโซแนนซ์แบบขนานและค่าพิกน้อยที่สุดสำหรับวงจรรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [2]

หมายเหตุ 1 : (a) ผลตอบสนองของ S_{11} (b) ผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน และ (c) ผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

2 : ในรูป (a) จะไม่มีค่าที่ความถี่เรโซแนนซ์แสดงถึงการส่งกลับอินพุตที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ วิธีนี้วงจรจะคุกกลืนสัญญาณที่ความถี่ขณะที่ความถี่อื่นๆสะท้อนกลับมา ในรูป (b) ความถี่ที่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีพีคที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในที่นี้เพราะว่าวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ (c) แสดงผลตอบสนองสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ตั้งแต่วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และพีคที่มีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์

2.8 ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระยะเวลาอ่านเป็นค่าจำกัดความของค่าที่มากที่สุด ในระยะที่ใช้สื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและเครื่องถูกถ่าย ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดแพสซีฟจะอยู่ในช่วง 1 นิ้วถึง 1 เมตร จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุโดยทั่วไปจะมีผลกระทบมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

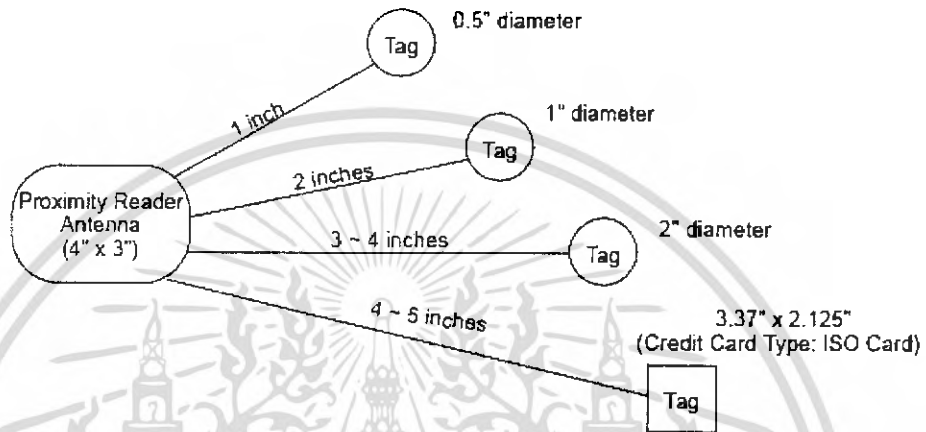
- ก) ความถี่ที่ใช้และการทำงานของขดลวดสายอากาศ
- ข) ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศการจูนวงจร
- ค) การปรับทิศทางของสายอากาศ
- ง) ค่ากระแสและแรงดัน
- จ) ความไวของการรับสัญญาณ
- ฉ) การเข้ารหัส (หรือการมอดูเลต) และการถอดรหัส (หรือการดีมอดูเลต)
- ช) จำนวนของบิตข้อมูล
- ซ) สภาพของสิ่งแวดล้อม (โลหะ, สัญญาณรบกวนจากเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์)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

ความถี่ที่ใช้จะเป็นข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้ว (ก-ค) จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศ และการจูนวงจร ข้อจำกัด (ง-จ) จะกำหนดโดยเทคโนโลยีของวงจรของเครื่องอ่านข้อจำกัด (ฉ) คือ

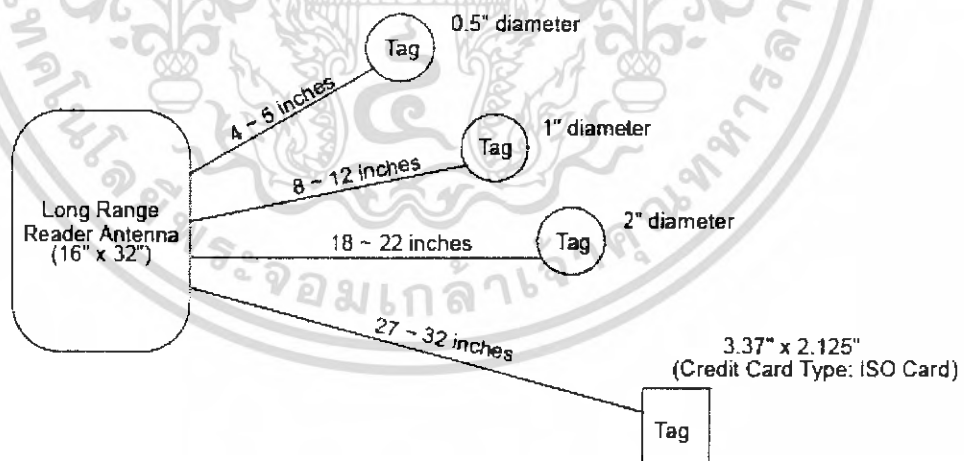
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของอุปกรณ์ และ (ซ) แสดงความสัมพันธ์ของโปรแกรม Firm Ware สำหรับการแปลความหมายของข้อมูล

สันนิษฐานว่าอุปกรณ์ที่ใช้ภายใต้ข้อจำกัด ระยะการอ่านของอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะมีผลกระทบโดยการทำงานของขดลวดสายอากาศ มันเป็นเรื่องจริงทุกครั้งที่ระยะการอ่านที่ไกลมากเป็นการคาดเดาเกี่ยวกับขนาดที่ใหญ่ของสายอากาศ รูปที่ 2.19 และ 2.20 แสดงตัวอย่างของระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดพาสซีฟแบบต่างๆ



รูปที่ 2.19 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ [2]



รูปที่ 2.20 ระยะการอ่านกับขนาดของเครื่องลูกข่ายสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล [2]

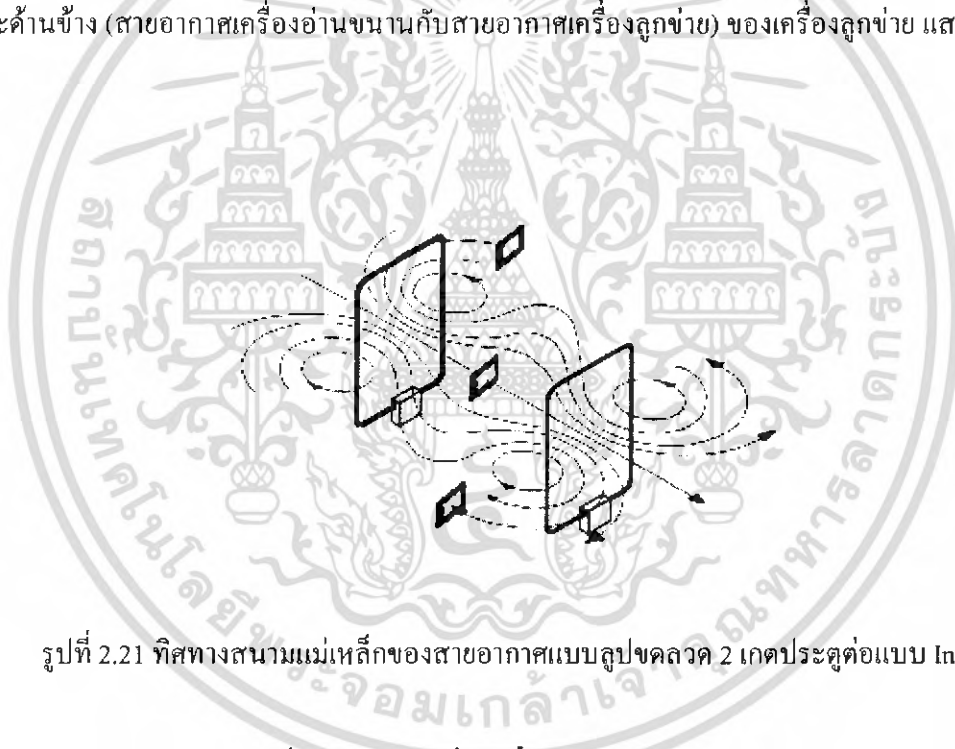
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวดต่อเป็น 2 เกตประตู่

สายอากาศของเครื่องอ่านนั้นสามารถต่อสายอากาศได้มากกว่า 1 เกตโดยใช้วิธีการแยก แม้ว่าตัวแยกที่นำมาใช้อาจทำให้เกิดการสูญเสียอยู่บ้าง แต่เมื่อต่อสายอากาศ 2 เกตจะทำให้ได้ระยะของการอ่านเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากการต่อสายอากาศเกตเดียว และทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวดนั้น จะขึ้นอยู่กับทิศทางของการป้อนกระแสให้กับสายอากาศแบบรูปขดลวด ดังนั้นลักษณะการต่อสายอากาศเป็นแบบเกตประตู่จึงมีการป้อนกระแสได้ 2 แบบดังนี้

2.9.1 สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตู่ต่อแบบ Inphase

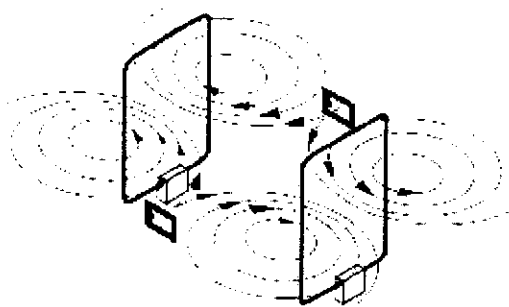
จากสายอากาศแบบรูปขดลวดเกตเดียวจะได้ค่าสนามแม่เหล็กที่ลดลงตามระยะทางที่มากขึ้น แต่เมื่อทำการต่อสายอากาศแบบ 2 เกต โดยทำการป้อนทิศทางของกระแสเหมือนกันทั้ง 2 เกต จะทำให้เครื่องอ่านอ่านได้ระยะไกลกว่าเดิม ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีสำหรับเพื่อใช้ในการตรวจสอบเครื่องลูกข่ายที่มีการขนส่งบนเครื่องขนส่งลำเลียง เนื่องจากเมื่อทำการต่อสายอากาศกับเครื่องอ่าน เครื่องอ่านจะสามารถอ่านได้ดีเฉพาะด้านข้าง (สายอากาศเครื่องอ่านขนานกับสายอากาศเครื่องลูกข่าย) ของเครื่องลูกข่าย แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตู่ต่อแบบ Inphase [4]

2.9.2 สายอากาศแบบรูปขดลวด 2 เกตประตู่ต่อแบบ Out of phase

เมื่อทำการต่อสายอากาศ 2 เกตแบบ Out of phase จะได้รูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป และเมื่อเครื่องลูกข่ายอยู่ในแนวขนานกับสายอากาศจะไม่สามารถอ่านได้ที่จุดกึ่งกลางระหว่างสายอากาศ แต่เมื่อเครื่องลูกข่ายทำมุม 90 องศา กับสายอากาศของเครื่องอ่าน ก็จะสามารถอ่านได้ทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศเครื่องอ่าน แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ทิศทางสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบลูปขดลวด 2 เกตประตูดอแบบ Out of phase [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ คำนวณ และการออกแบบ

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศแบบรูปขดลวด

การออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำ 125 kHz จะใช้วิธีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้ ลักษณะโดยทั่วไปสำหรับการออกแบบสายอากาศในย่านความถี่ต่ำจะมีรูปร่างเป็นขดลวดแบบง่าย (Loop) และการวิเคราะห์จะไม่สามารถคำนวณการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุกทิศทาง เนื่องจากโครงสร้างแบบง่ายทำให้การติดต่อระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องอ่านมีระยะใกล้ ดังนั้นการออกแบบสายอากาศ สำหรับเครื่องอ่านจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้การติดต่อที่ระยะใกล้มากขึ้น สำหรับการออกแบบนั้นจะต้องอยู่ภายใต้มาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร ซึ่งมีค่า 72 dB μ A/m

การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบรูปขดลวดของเครื่องอ่านที่ความถี่ต่ำจะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code) หรือ NEC2 ช่วยในการวิเคราะห์หาโครงสร้างของสายอากาศที่ทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ดีที่สุด เช่น คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้วิธีวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดของสายอากาศที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของขดลวด มุมทแยง (α) เส้นผ่านศูนย์กลางของลวด ระยะห่าง (d/λ) ระหว่างแกนกลางของขดลวดทั้งสองเขต (มองระนาบ xz) ข้อดีของ โปรแกรมนี้ก็สามารถจำลองโครงสร้างของสายอากาศได้หลากหลายรูปทรงและสามารถคำนวณการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุกทิศทาง

เนื่องจากสายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ใช้ช่วงความถี่ LF ที่ความถี่ 125 kHz ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบสายอากาศ เพื่อให้ได้ระยะการอ่านที่มากขึ้นที่ความถี่นี้ โดยในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศจะทำการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้นตอน ที่จะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของสายอากาศที่เปลี่ยนไป เมื่อได้ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศไปลำดับขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ขนาดโครงสร้างของสายอากาศแบบรูปขดลวดอย่างง่าย

การหาขนาดของสายอากาศแบบรูปขดลวดอย่างง่าย โดยพิจารณาที่ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อให้มีขนาดครอบคลุมและเหมาะสมกับพื้นที่การใช้งาน โดยจะกำหนดขนาดของรูปให้มีขนาดดังนี้

ความกว้าง (a) เท่ากับ 56 เซนติเมตร

ความยาว (b) เท่ากับ 89 เซนติเมตร

จากการทำงานที่จะต้องมีความสัมพันธ์กันระหว่างเครื่องอ่านกับเครื่องลูกข่าย ดังนั้นจะนำค่าความกว้าง ค่าความยาวของรูปของสายอากาศเครื่องอ่านและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องลูกข่ายมาพิจารณาลงตามมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

72 dB μ A/m โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องลูกข่ายแบบมาตรฐาน ID-1 (แบบบัตร) รุ่น T5557 ของ ATMEL มีดังนี้

| | | |
|----------------------------------|------|--------------------------|
| ค่าพื้นที่ของขดลวดเครื่องลูกข่าย | 25.6 | ตารางเซนติเมตร |
| จำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ | 155 | รอบ |
| ความถี่ที่ใช้เท่ากับ | 125 | kHz |
| ค่าประสิทธิภาพ (Q) เท่ากับ | 13 | |
| แรงดันกระแสสลับของขดลวดเท่ากับ | 6 | โวลต์ |
| ค่า $\cos \alpha$ เท่ากับ | 1 | (เส้นปกติ $\alpha = 0$) |

โดยทำการพิจารณาหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากสมการ 3.1

$$H = \frac{B_o}{\mu_o} \quad (3.1)$$

เมื่อกำหนดค่าสนามแม่เหล็ก B_o ตามทฤษฎีบทที่ 2 จะได้ตามสมการ 3.2

$$B_o = \frac{V_o}{2\pi f_o N Q S \cos \alpha} \quad (3.2)$$

$$B_o = \frac{6}{2\pi \times 125 \times 10^3 \times 155 \times 13 \times 25.6 \times 10^{-4} \times 1}$$

$$B_o = 1.481 \mu Wb / m^2$$

จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก $H=1.178$ A/m ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องลูกข่ายต้องการเหนี่ยวนำกับสายอากาศของเครื่องอ่าน เพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้

นำค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เครื่องลูกข่ายต้องการมาคำนวณค่ากระแส-รอบ (NI) ที่ระยะ 1.4 เมตร จากสมการความเข้มสนามแม่เหล็กคู่ขั้วที่เหลี่ยม

$$H = \frac{N.I.ab}{4\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2}} \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2} \right] \quad (3.3)$$

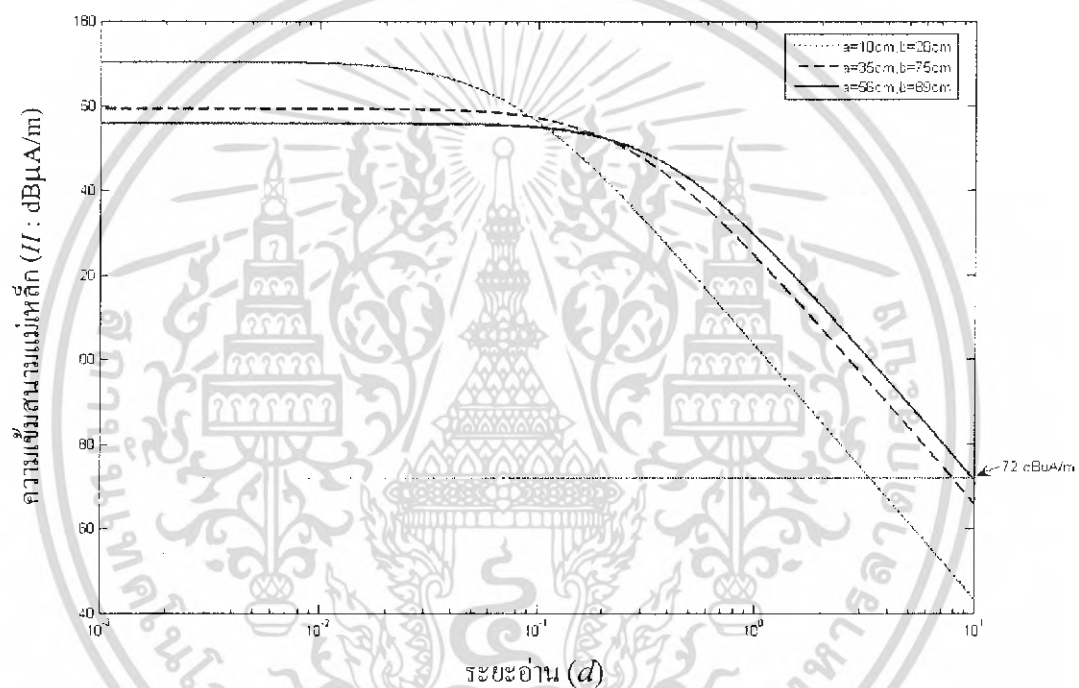
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปของสายอากาศรูปร่าง $a = 56$ เซนติเมตร

$$b = 89 \text{ เซนติเมตร}$$

จะได้ค่า กระแส-รอบ (NI) เท่ากับ 46.581 กระแส-รอบ

จากนั้นนำค่าขนาดของรูปสายอากาศต่างๆ และค่ากระแส-รอบที่ได้ มาวาดกราฟที่ระยะต่างๆ เพื่อดูค่าการลดทอนความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจากขนาดของสายอากาศที่ $a = 56$ เซนติเมตรและ $b = 89$ เซนติเมตรนั้นที่ 10 เมตรจะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ไม่เกินค่ามาตรฐาน 72 dB μ A/m ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดของสายอากาศนี้มาทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างลักษณะที่เหมาะสม

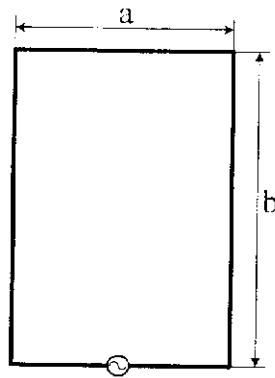


รูปที่ 3.1 ระยะอ่านและค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ที่ขนาดของสายอากาศต่างกัน

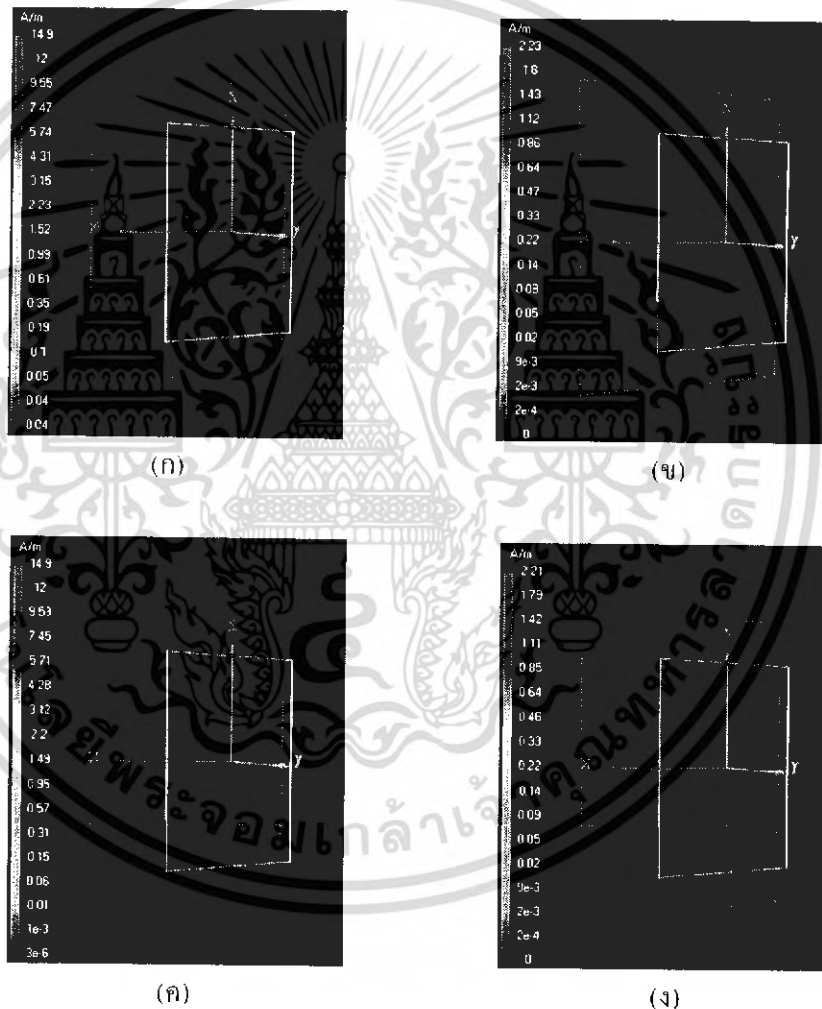
3.1.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบรูปขดลวดอย่างง่าย

โครงสร้างของสายอากาศแบบรูปขดลวดอย่างง่ายจะมีลักษณะการพันขดลวดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 56 เซนติเมตร ความยาว (b) เท่ากับ 89 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.2 ทำการพิจารณาเพื่อดูค่าการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่แพร่กระจายที่ระยะ -0.5 เมตร ทั้งขนาดเส้นลวดเบอร์ 18 (รัศมีเท่ากับ 0.51 มิลลิเมตร) จะได้ดังรูปที่ 3.3 และขนาดเส้นลวดเบอร์ 22 (รัศมีเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร) จะได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบรูปขดลวดอย่างง่าย



รูปที่ 3.3 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตรของลวดเบอร์ 18

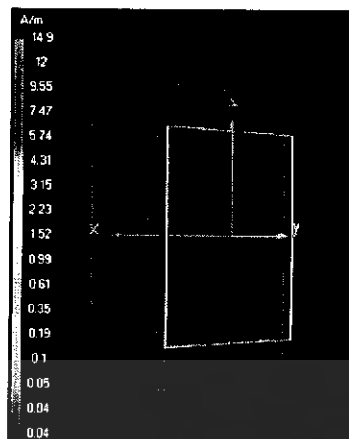
(ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน

(ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x

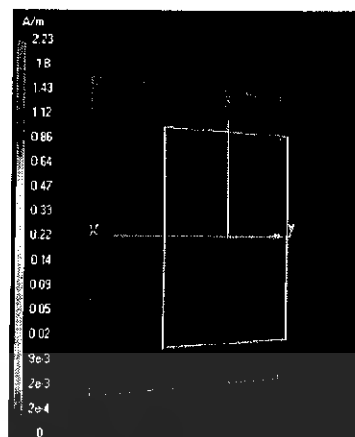
(ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

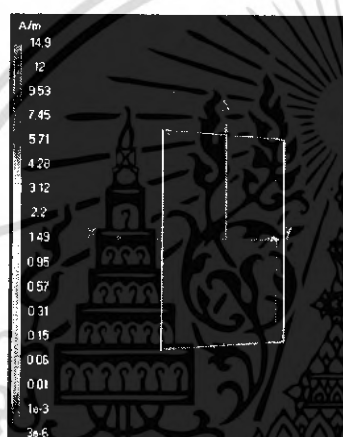
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



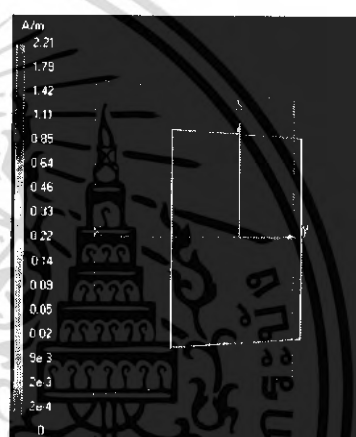
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.4 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร ของลวดเบอร์ 22

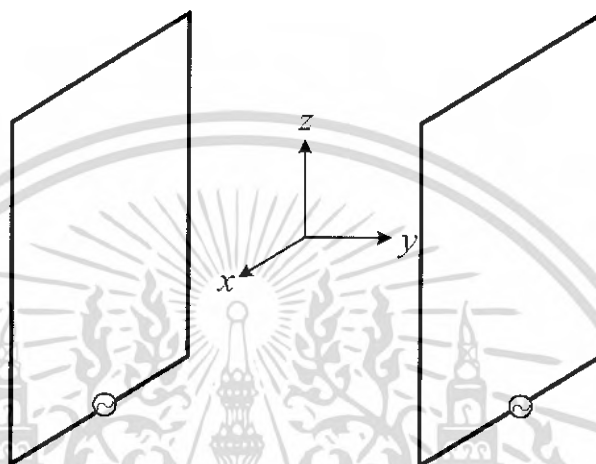
- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x
- (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y
- (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

จากการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ ที่แพร่กระจายที่ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร ทั้งขนาดเส้นลวดเบอร์ 18 (รัศมีเท่ากับ 0.51 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 3.3 (ก - ง) และขนาดเส้นลวดเบอร์ 22 (รัศมีเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 3.4 (ก - ง) แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่แพร่กระจาย ของขนาดเส้นลวดทั้ง 2 เบอร์นั้นมีค่าไม่ต่างกันเลย ดังนั้นจึงเลือกที่จะวิเคราะห์ขนาดเส้นลวดเบอร์ 22

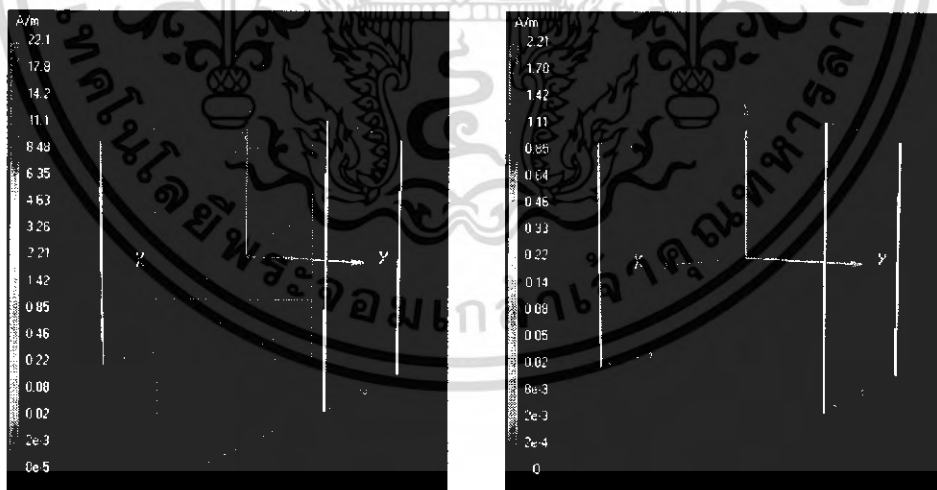
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 โครงสร้างของสายอากาศคู่ขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตูด

โครงสร้างของสายอากาศคู่ขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตูดจะมีลักษณะการพันขดลวดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 56 เซนติเมตร ความยาว (b) เท่ากับ 89 เซนติเมตรตั้งรูปที่ 3.5 ใช้ขนาดเส้นลวดเบอร์ 22 พิจารณาคุณค่าการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่แพร่กระจายที่ระยะจุดศูนย์กลางระหว่างสายอากาศ 2 เกต



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศคู่ขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตูด



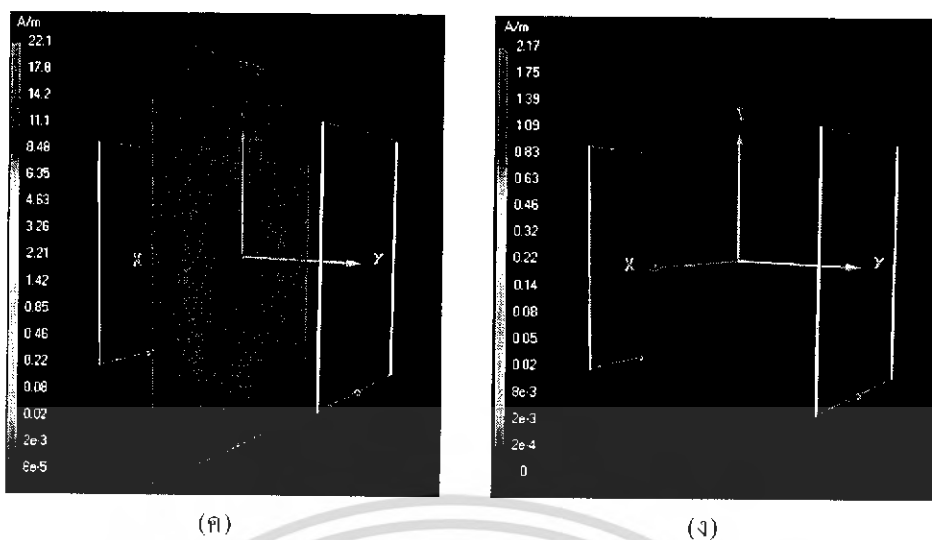
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.6 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบเกตประตูด ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร

- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบเกตประตู่ ระนาบ xz ที่ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร (ต่อ)

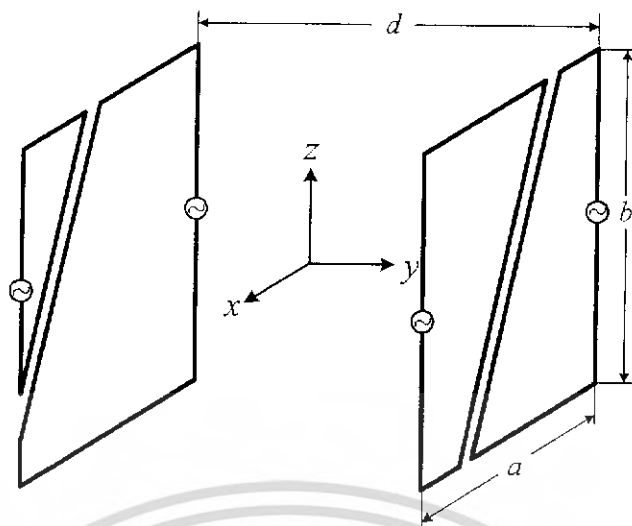
(ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

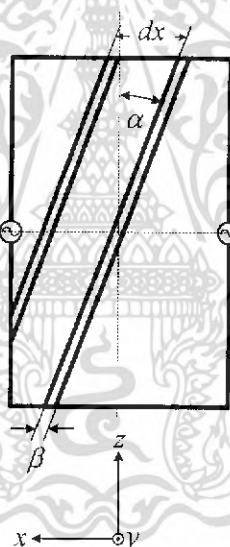
จากการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้แบบเกตประตู่ที่ระยะ 0 เมตร ของขนาดเส้นลวดเบอร์ 22 (รัศมีเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 3.6(ก - ง) แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศลูปขดลวดอย่างง่ายแบบเกตประตู่ทั้ง 2 เกต ทำให้ได้สนามแม่เหล็กรวม และสนามแม่เหล็กที่ด้าน y เท่านั้น ซึ่งจะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ไม่ดีพอที่จะทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้ในระนาบ xy และ ระนาบ yz ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ให้สายอากาศขดลวดแบบเกตประตู่มีรูปร่างที่ซับซ้อนขึ้น เพื่อที่จะทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้ในทุกระนาบ

3.2 วิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบเกตประตู่ที่ทำการออกแบบ

วิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศขดลวดแบบเกตประตู่เพื่อใช้สำหรับเป็นสายอากาศเครื่องอ่านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ความถี่ต่ำ โดยจะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 หรือ NEC2 ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งลักษณะโครงสร้างของขดลวดจะมี มุมทแยง (α) ระยะห่าง (dx) ของแกนกลาง(แกนทแยง)ของขดลวดทั้งสองเกต (มองระนาบ xz) ระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) และกำหนดระยะระหว่างเกต (d) ไว้ที่ 1 เมตร นำค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างของสายอากาศแบบลูปขดลวดอย่างง่ายที่ได้ ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่ดีพอที่จะทำให้เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้ในทุกระนาบ



รูปที่ 3.7 โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.8 โครงสร้างสายอากาศขดลวดแบบ 2 มิติ ทางระนาบ xz

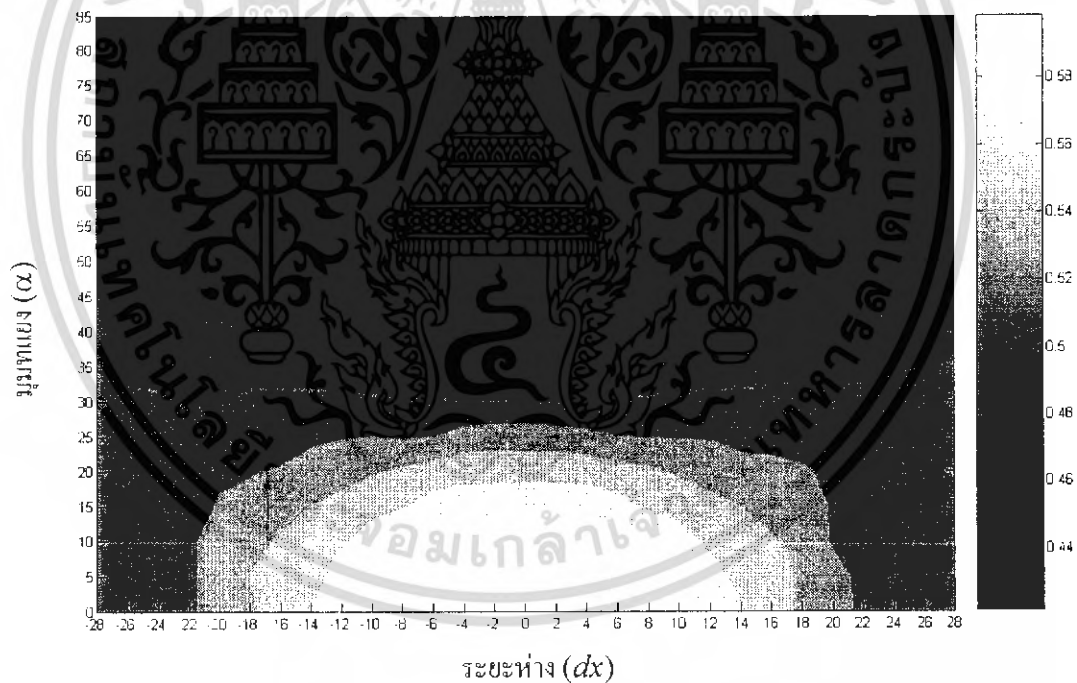
ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาค่าการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่ดี โดยทำการปรับเปลี่ยนมุมทแยง (α) ของแกนสายอากาศขดลวดค่าต่างๆ และทำการปรับระยะห่าง (dx) ระหว่างแกนที่เอียงสองแกนให้มีค่าระยะต่างกันดังรูปที่ 3.8 ในการวิเคราะห์จะทำการปรับมุมทแยง (α) ครั้งละ 5 องศา เริ่มจาก 0 ถึง 85 องศา และทำการปรับระยะห่าง (dx) ระหว่างแกนที่เอียงสองแกนครั้งละ 2 เซนติเมตร เริ่มจาก -28 ถึง 28 แล้วทำการพิจารณาที่การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กของแนวแกน x (ระนาบ yz) แนวแกน y (ระนาบ xz) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน z (ระนาบ xy) ตามลักษณะ โครงสร้างรูปต่างๆ ของสายอากาศขดลวด จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้

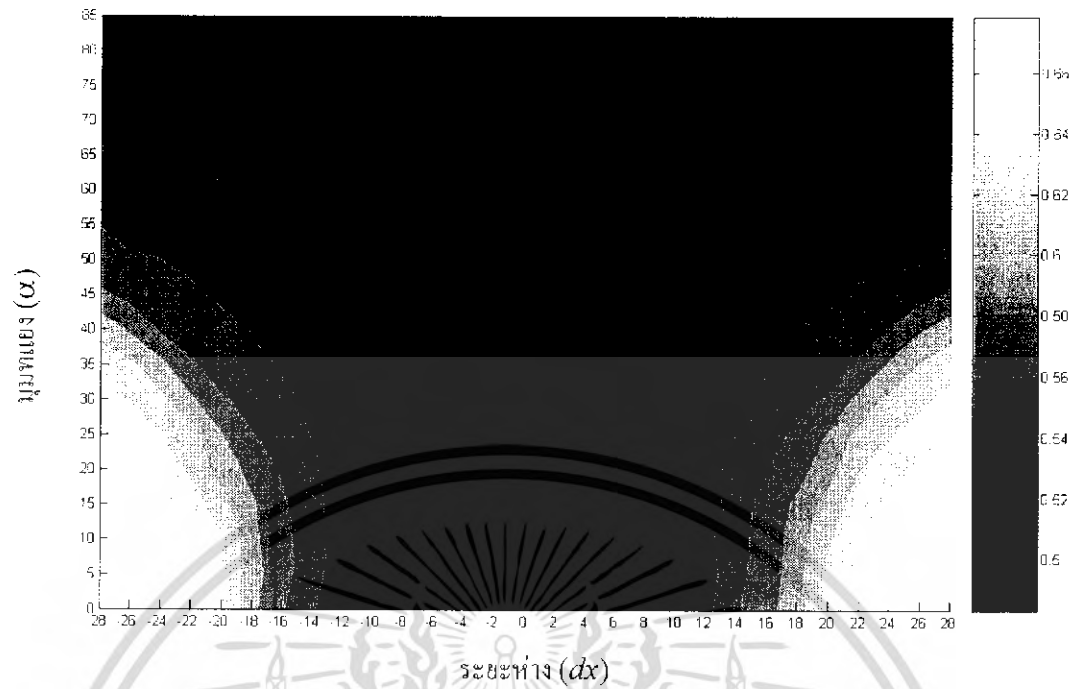
3.2.1 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของโครงสร้างสายอากาศแบบเกตประตูดอ Out of phase ที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้

ทำการพิจารณาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลักษณะ โครงสร้างรูปต่างๆ ของสายอากาศขดลวดซึ่งจะทำการต่อแบบ Out of phase จะได้ค่าการแพร่กระจายคลื่นของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ในบริเวณพื้นที่ทำการหาค่า จากนั้นใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) ดึงข้อมูลจากโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เพื่อจะทำตรวจสอบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ แสดงผลโดยให้แสดงเลข 1 ในตำแหน่งที่ผ่านเกณฑ์ และแสดงเลข 0 ในตำแหน่งที่ไม่ผ่านเกณฑ์ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่ ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งจะได้ค่าไม่เกินหนึ่ง ทำให้ได้ค่าของความน่าจะเป็นที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ ของแต่ละ โครงสร้างสายอากาศขดลวดต่างๆ มาวาดกราฟดังรูปที่ 3.9 - 3.11

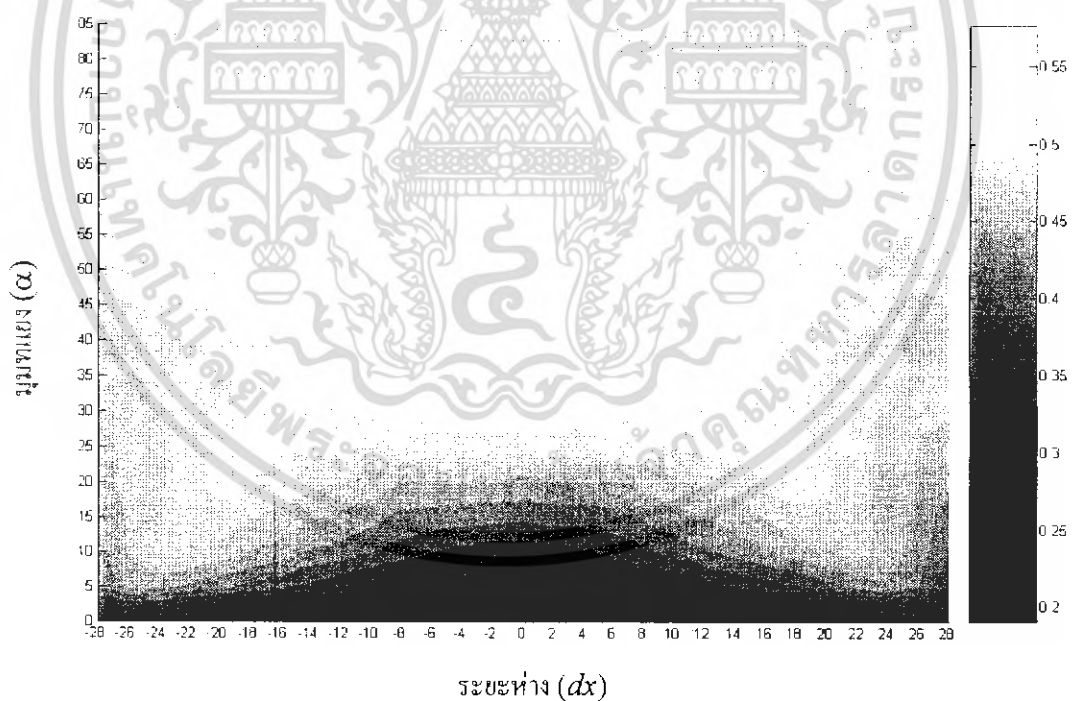


รูปที่ 3.9 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน x ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน y ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



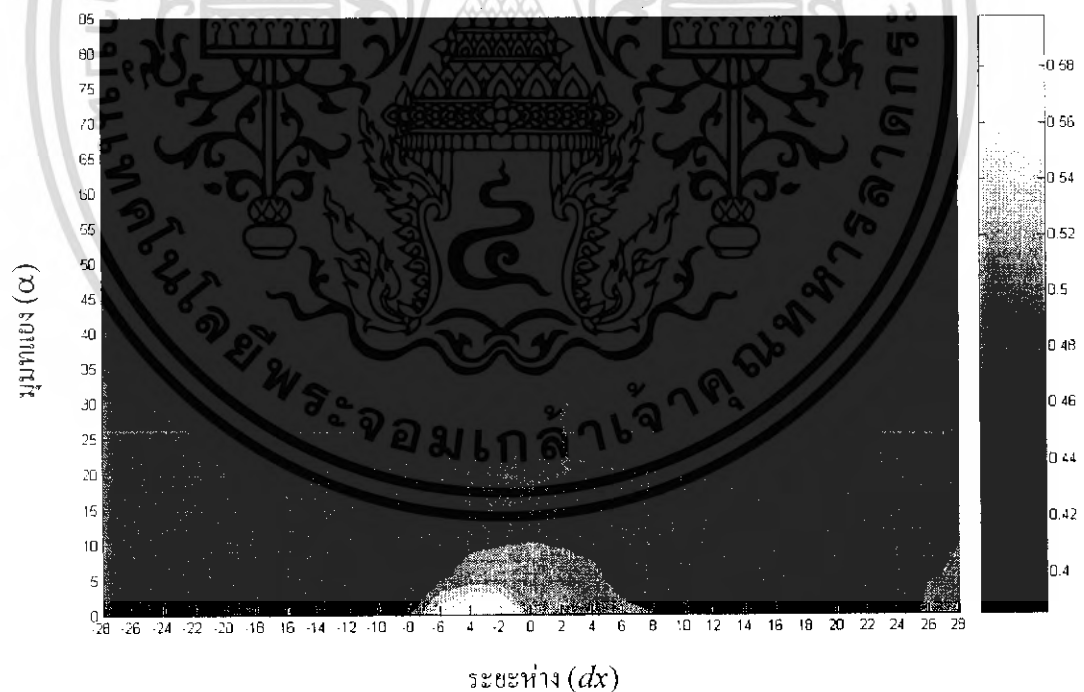
รูปที่ 3.11 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

จากกราฟดังรูปที่ 3.9 - 3.11 พิจารณาที่ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลักษณะโครงสร้างของสายอากาศขดลวด จะได้ค่าความเข้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ในบริเวณพื้นที่ทำการหาค่า เมื่อสังเกตจากเส้นกราฟที่ค่ามุมทแยง และระยะห่างของสายอากาศทั้งสองด้าน ตามลักษณะโครงสร้างต่างๆ เมื่อดูจากกราฟแล้วค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่ามุมทแยง (α) มีค่าประมาณ 20 องศา และระยะห่าง (dx) ของสายอากาศมีค่าประมาณ 18 เซนติเมตร ซึ่งการแพร่กระจายคลื่นความถี่สนามแม่เหล็กนั้นทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ดีในลักษณะที่อยู่ในแนวแกน x และแนวแกน z

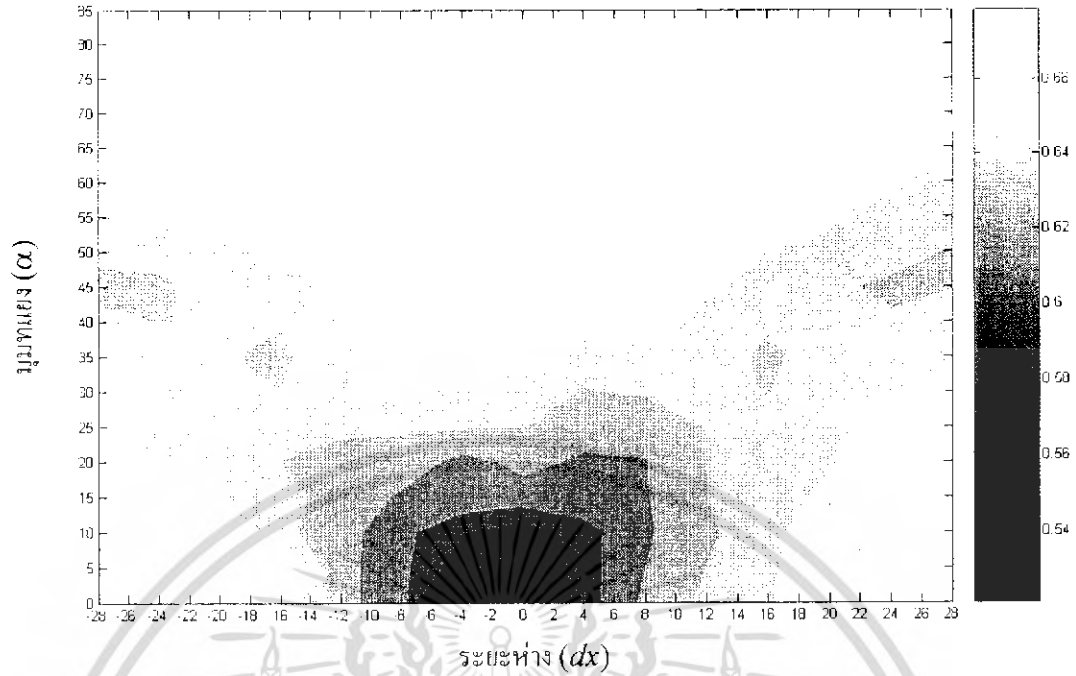
3.2.2 วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของโครงสร้างสายอากาศแบบเกดประตูดั Inphase ที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้

พิจารณาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลักษณะโครงสร้างรูปต่างๆ ของสายอากาศชนิดขดลวดซึ่งจะทำการต่อแบบ Inphase จะได้ค่าการแพร่กระจายคลื่นของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ในบริเวณพื้นที่ทำการหาค่า จากนั้นใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) ดึงข้อมูลจากโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เพื่อจะทำตรวจสอบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ แสดงผลโดยให้แสดงผล 1 ในตำแหน่งที่ผ่านเกณฑ์ และแสดงผล 0 ในตำแหน่งที่ไม่ผ่านเกณฑ์ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่ ที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งจะได้ค่าไม่เกินหนึ่ง ทำให้ได้ค่าของความน่าจะเป็นที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ ของแต่ละโครงสร้างสายอากาศชนิดขดลวดต่างๆ มาวาดกราฟดังรูปที่ 3.12 - 3.14

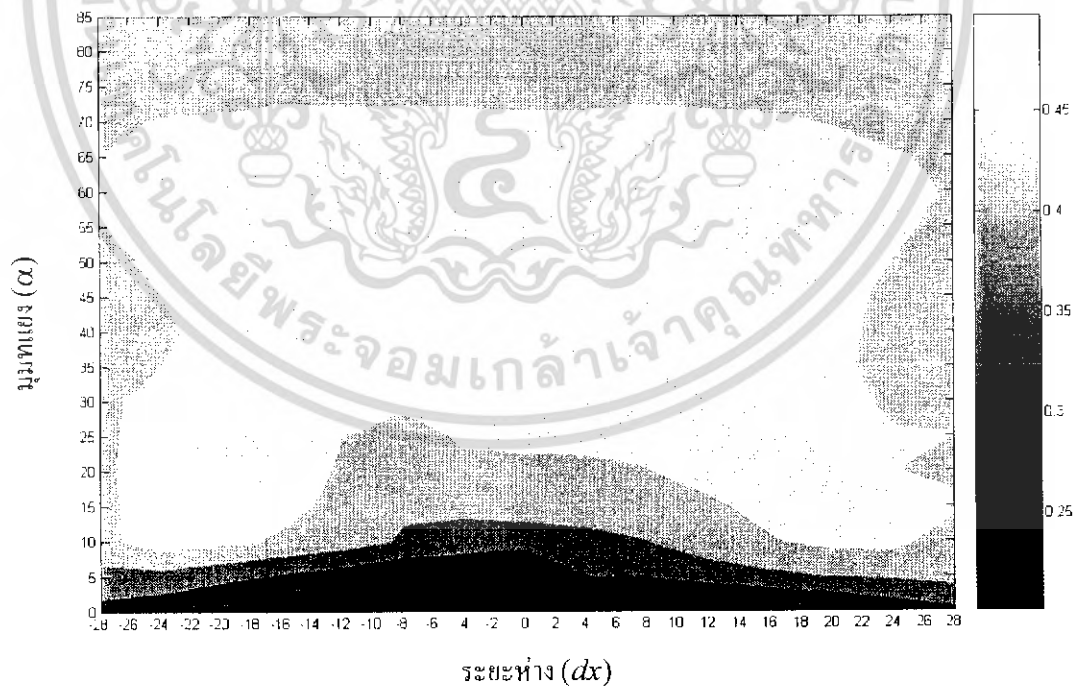


รูปที่ 3.12 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน x ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน y ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 3.14 ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

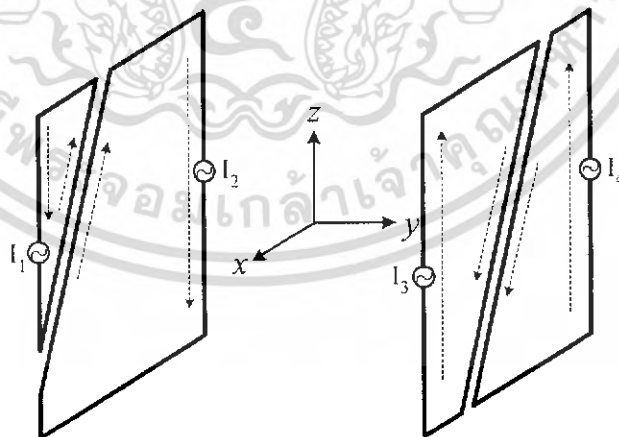
จากกราฟดังรูปที่ 3.12 - 3.14 พิจารณาที่ความน่าจะเป็นของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลักษณะโครงสร้างของสายอากาศขดลวด จะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ในบริเวณพื้นที่ทำการหาค่า เมื่อสังเกตจากเส้นกราฟที่ค่ามุมทแยง และระยะห่างของสายอากาศทั้งสองด้าน ตามลักษณะโครงสร้างต่างๆ เมื่อดูจากกราฟแล้วค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่ามุมทแยง (α) และระยะห่าง (d) ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับของ Out of phase แต่การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ดีในลักษณะที่อยู่ในแนวแกน y

3.2.3 วิเคราะห์ระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) ของสายอากาศ

สายอากาศที่วิเคราะห์ได้มีค่ามุมทแยง (α) ประมาณ 20 องศา และระยะห่าง (d) ของมุมทแยงสายอากาศประมาณ 18 เซนติเมตร ซึ่งการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กนั้นทำให้เครื่องลูกข่ายทำงานได้ดีในลักษณะที่อยู่ในแนวแกน x และแนวแกน z จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) ของสายอากาศ จะได้ระยะที่ดีมีค่าประมาณ 3 เซนติเมตร

3.3 โครงสร้างของสายอากาศขดลวดที่ได้จากการวิเคราะห์

สายอากาศขดลวดที่ได้จากการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.15 โดยที่สายอากาศลูปที่ 1 และ 2 อยู่ที่ตำแหน่งแกน y เท่ากับ -0.5 เมตร สายอากาศลูปที่ 3 และ 4 อยู่ที่ตำแหน่งแกน y เท่ากับ 0.5 เมตร วางห่างกันระยะ 1 เมตร (ระยะ d) ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 22 (รัศมี 0.32 มิลลิเมตร) โดยทำการป้อนกระแสลูปที่ 1 (I_1) มีค่าเท่ากับ -1 แอมแปร์ ลูปที่ 2 (I_2) มีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์ ลูปที่ 3 (I_3) มีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์และลูปที่ 4 (I_4) มีค่าเท่ากับ -1 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



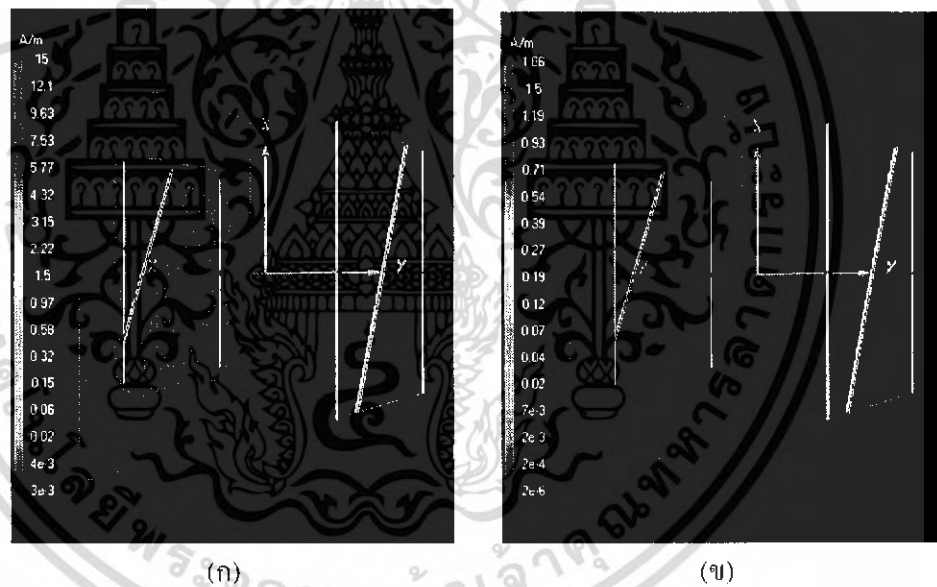
รูปที่ 3.15 โครงสร้างของสายอากาศขดลวดที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การวิเคราะห์หัตถลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.5 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ -0.5 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

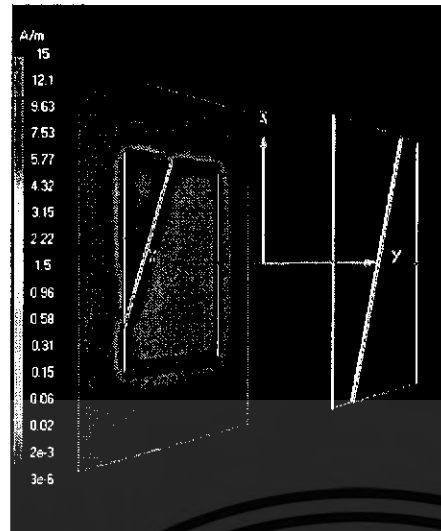
เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ -0.5 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.16 (ก-ง) ซึ่งจะเห็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ โดยจะมีอยู่หลายระดับด้วยกัน มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุดจะอยู่ในแนวแกน y โดยที่แนวแกน x และแนวแกน z มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กพอสมควร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ลดลงในแต่ละแถบสี แต่ก็ยังมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพียงพออยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถเหนี่ยวนำกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้



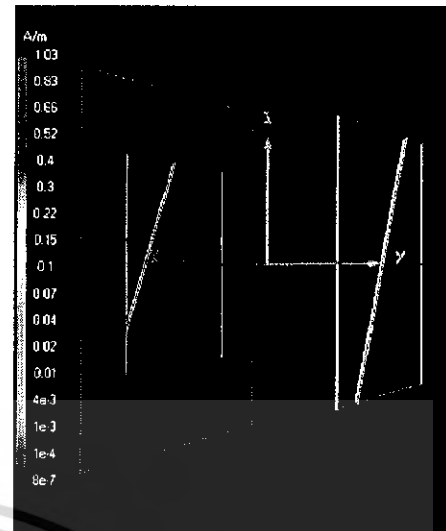
รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร

(ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน

(ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.16 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.5 เมตร (ต่อ)

(ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

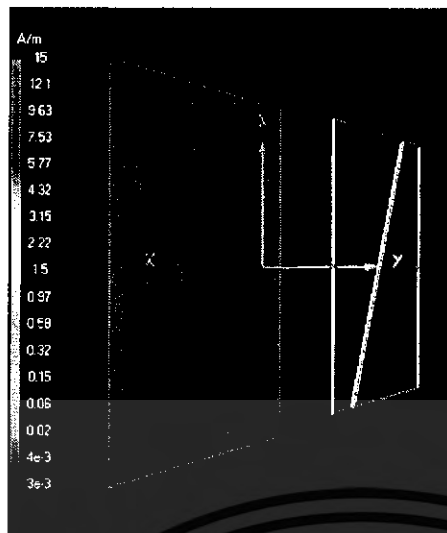
(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.3 เมตร

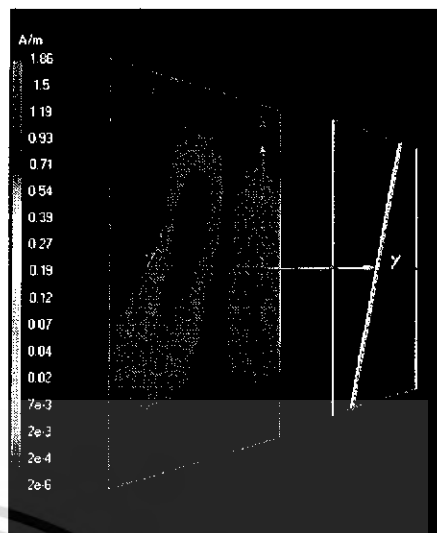
พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ -0.3 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ -0.3 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.17 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ โดยจะมีอยู่หลายระดับด้วยกัน มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุดจะอยู่ในแนวแกน x และแนวแกน y โดยที่แนวแกน z มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ลดลงในแต่ละแถบสี แต่ก็ยังมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพียงพออยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถเห็นร่วมกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้

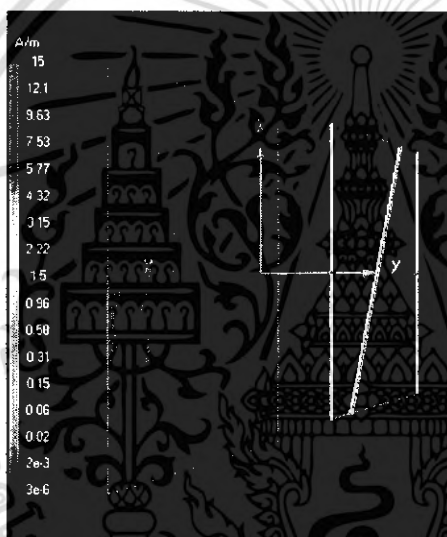
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



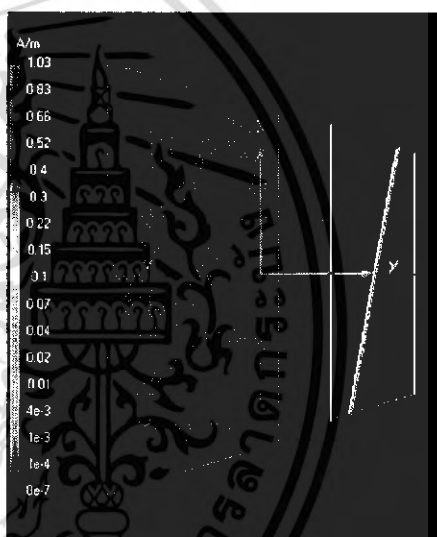
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.17 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.3 เมตร

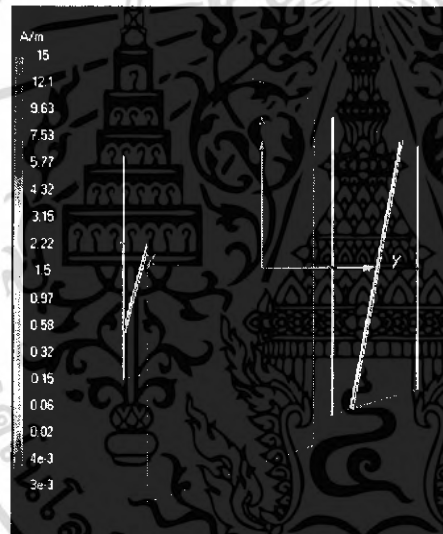
- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x
- (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y
- (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

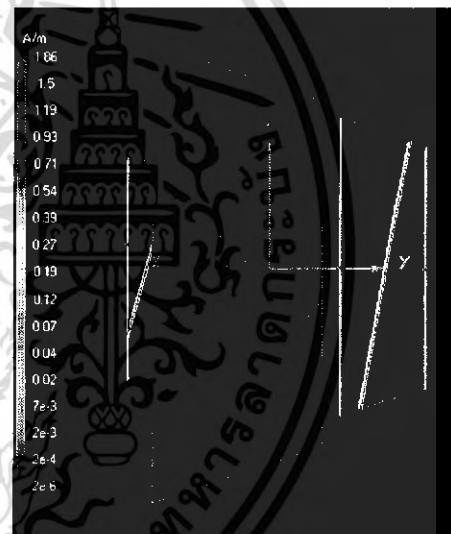
3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ -0.1 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะไกลี่ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ -0.1 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ -0.1 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะไกลี่ดังรูปที่ 3.18 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ โดยจะมีอยู่หลายระดับด้วยกัน มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z จะมีค่าพอๆ กัน แต่จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าที่ระยะ -0.5 เมตรและ -0.3 เมตร แต่ก็ยังมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในพื้นที่ ที่เพียงพออยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถเห็นยว่นำกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสนอนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้บ้างในบางบริเวณ



(ก)

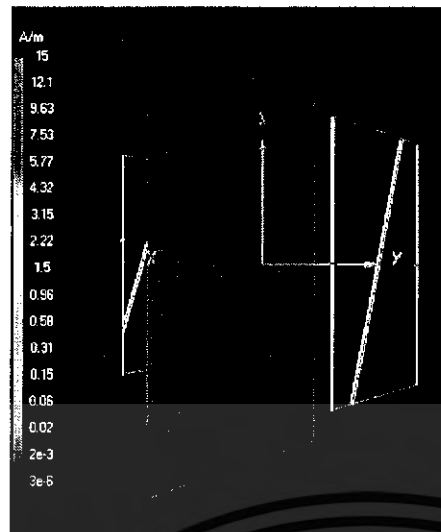


(ข)

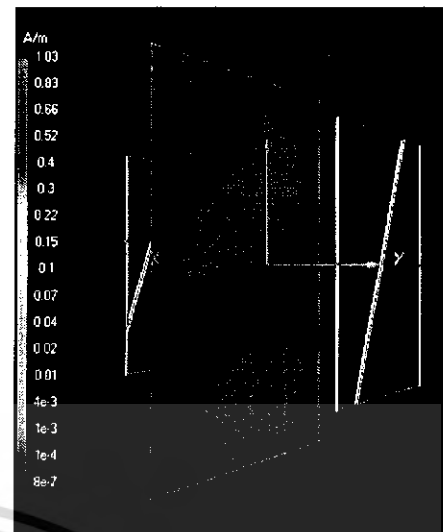
รูปที่ 3.18 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะไกลี่ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ -0.1 เมตร

(ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน

(ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.18 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz

ระยะ y เท่ากับ -0.1 เมตร (ต่อ)

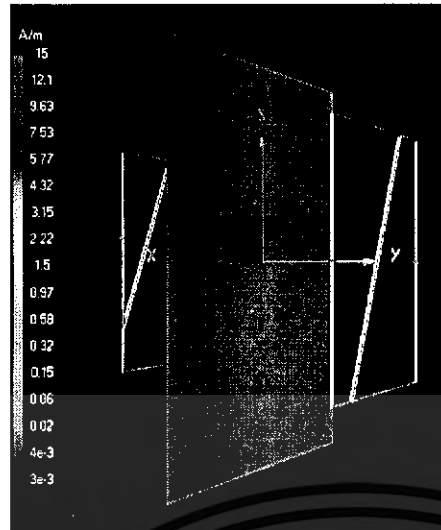
(ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

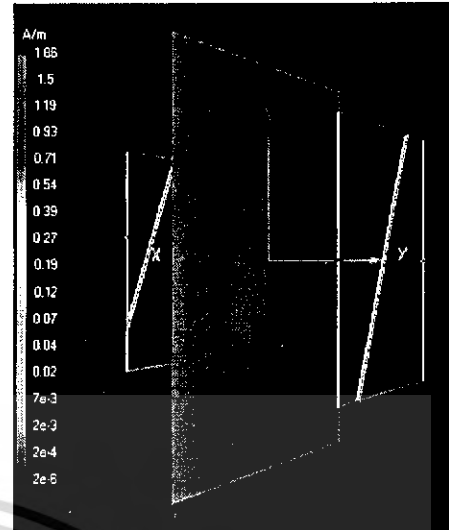
3.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ 0 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

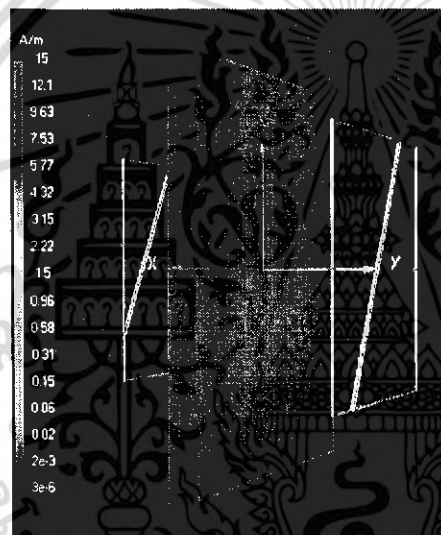
เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ 0 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.19 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ต่ำกว่า แนวแกน y และแนวแกน z แต่จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าที่ระยะ -0.5 เมตร -0.3 เมตร และ -0.1 เมตร แต่ก็ยังมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในพื้นที่เพียงพอบริเวณที่จะสามารถเห็นร่วมกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้ในบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.19 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0 เมตร

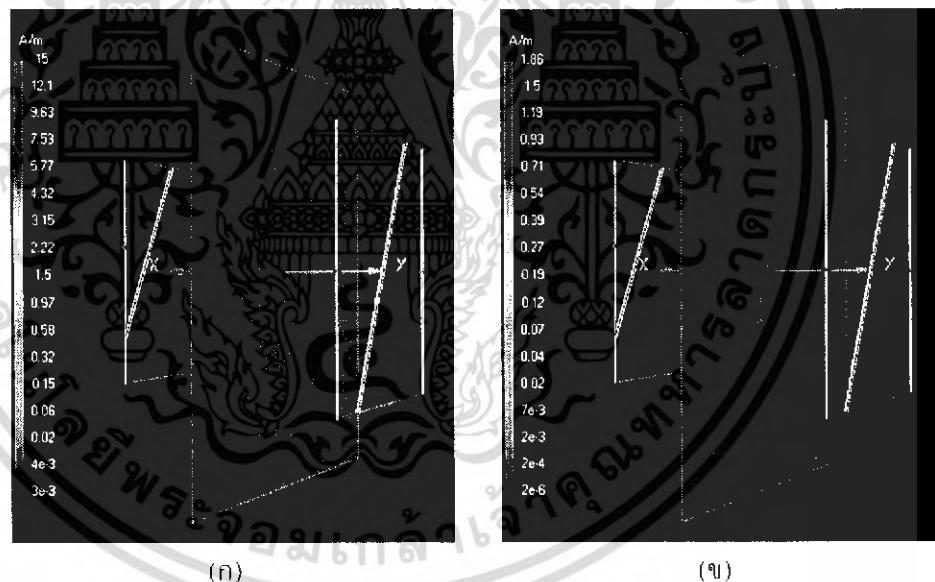
- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งหมดทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x
- (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y
- (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.1 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ 0.1 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

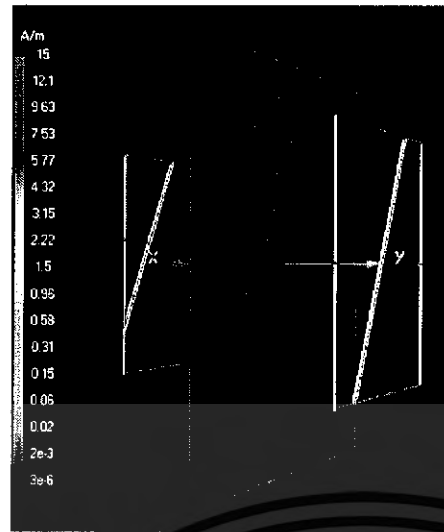
เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ 0.1 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.20 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าที่ระยะ -0.5 เมตร -0.3 เมตร แต่ก็ยังมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในพื้นที่เพียงพอบริเวณที่จะสามารถเห็นชวากับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้ในบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z



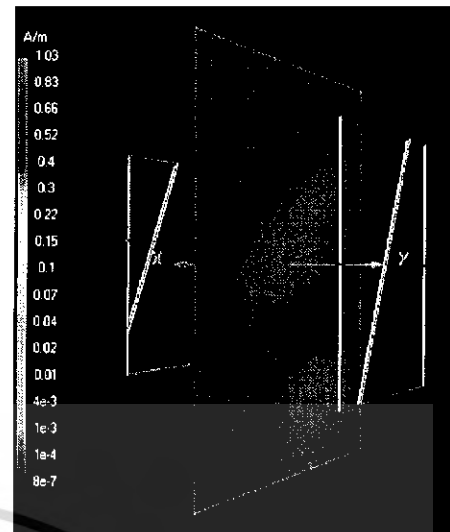
รูปที่ 3.20 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.1 เมตร

- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.20 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.1 เมตร (ต่อ)

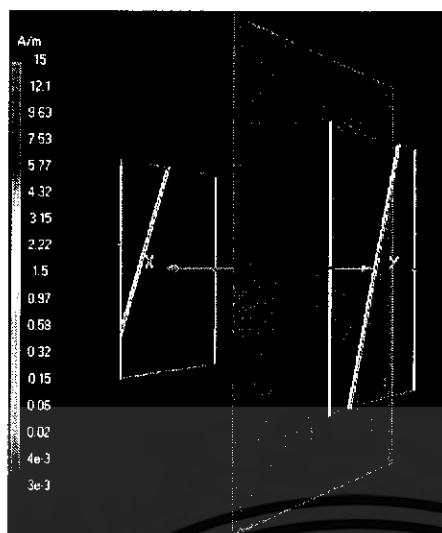
(ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

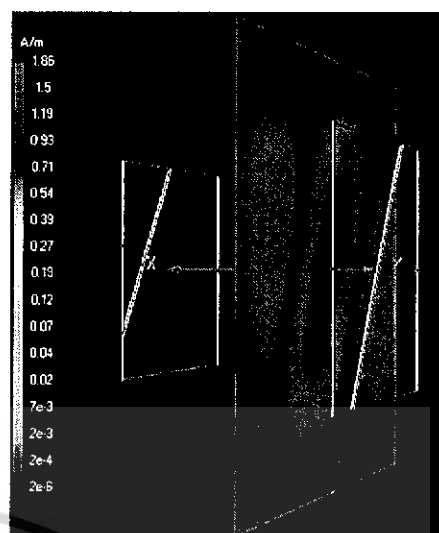
3.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.3 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

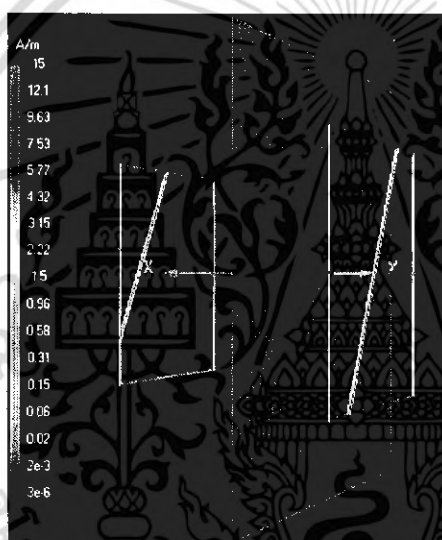
เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.21 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x จะมีค่ามากกว่า แต่แนวแกน y แนวแกน z มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าที่ระยะ -0.5 เมตร และมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าที่ระยะ -0.1 เมตร 0 เมตร และ 0.1 เมตร มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในพื้นที่เพียงพอยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถเห็นร่วมกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้ในบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z



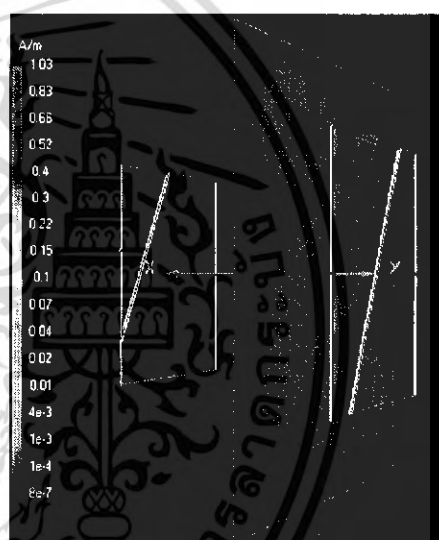
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.21 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.3 เมตร

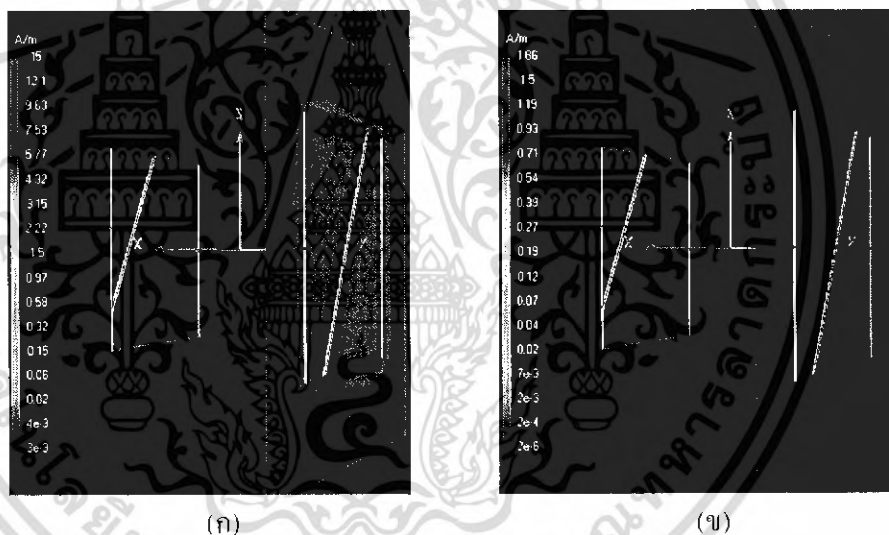
- (ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กทั้งหมดทุกแนวแกน
- (ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x
- (ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y
- (ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 การวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศที่ระยะของแกน y เท่ากับ 0.5 เมตร

พิจารณาผลรวมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่ระนาบ xz ที่แกน x มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 เมตร ที่แกน y มีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร และที่แกน z มีค่าตั้งแต่ -0.75 ถึง 0.75 เมตร

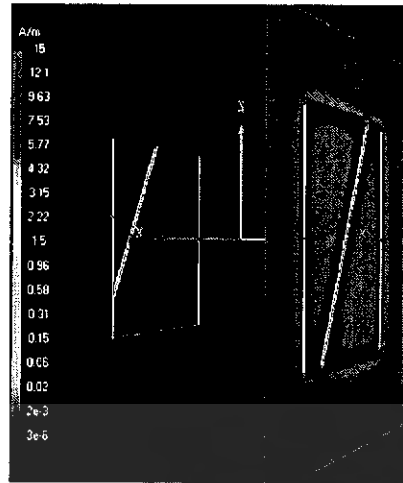
เมื่อพิจารณาที่ระยะของแกน y มีค่าเท่ากับ 0.5 เมตร จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ดังรูปที่ 3.22 (ก-ง) ซึ่งจะเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กรวมของทุกแนวแกน โดยที่พื้นที่ที่เป็นความเข้มที่สูงอยู่ด้านบนสเกลจะเป็นพื้นที่ที่มีค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด และความเข้มที่สูงอยู่ด้านล่างสเกลจะมีค่าสนามแม่เหล็กลดลงมาเรื่อยๆ โดยจะมีอยู่หลายระดับด้วยกัน มีหน่วยของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมป์ต่อเมตร (A/m) สามารถดูได้จากสเกลด้านซ้ายมือของรูป เมื่อสังเกตจากรูปแล้วจะพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุดจะอยู่ในแนวแกน y สามารถเห็นเหมือนกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้ดี โดยที่แนวแกน x และแนวแกน y มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ลดลงในแต่ละแถบสี มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพียงพอยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถเห็นเหมือนกับสายอากาศของเครื่องลูกข่ายเพื่อเป็นกระแสป้อนให้กับวงจรเครื่องลูกข่ายได้บางส่วนเท่านั้น



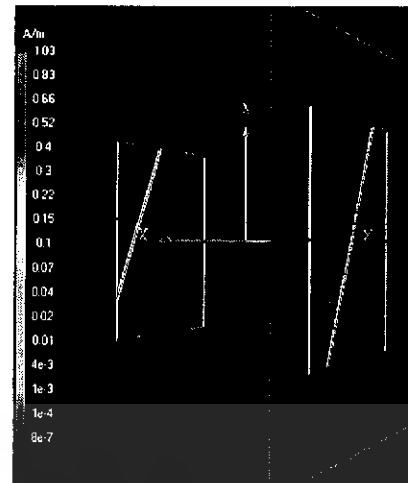
รูปที่ 3.22 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.5 เมตร

(ก) ความเข้มสนามแม่เหล็กรวมทุกแนวแกน

(ข) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน x



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.22 การแพร่กระจายคลื่นความเข้มสนามแม่เหล็กระยะใกล้ของสายอากาศที่ระนาบ xz ระยะ y เท่ากับ 0.5 เมตร (ต่อ)

(ค) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน y

(ง) ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แนวแกน z

3.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปของสายอากาศ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศที่ผ่านมา ทำให้สามารถเลือกค่าสนามแม่เหล็กที่ดีที่สุดทุกแนวแกน สำหรับลวดเบอร์ 22 โดยมีค่ามุมทแยง (α) อยู่ที่ 20 องศา และค่าระยะห่าง (dx) อยู่ที่ 18 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) อยู่ที่ 3 เซนติเมตร และกำหนดระยะระหว่างเกด (d) ไว้ที่ 1 เมตร จะได้ลักษณะของสายอากาศดังรูปที่ 3.7 - 3.8

โดยที่สายอากาศรูปที่ 1 และ 2 อยู่ที่ตำแหน่งแกน y เท่ากับ -0.5 เมตร สายอากาศรูปที่ 3 และ 4 อยู่ที่ตำแหน่งแกน y เท่ากับ 0.5 เมตร วางห่างกันระยะ 1 เมตร (ระยะ d) ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 22 (รัศมี 0.32 มิลลิเมตร) โดยทำการป้อนกระแสลูปที่ 1 (I_1) มีค่าเท่ากับ -1 แอมแปร์ ลูปที่ 2 (I_2) มีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์ ลูปที่ 3 (I_3) มีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์ และลูปที่ 4 (I_4) มีค่าเท่ากับ -1 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุปผลการวิเคราะห์

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี โปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2 จึงทำให้ได้ โครงสร้างของสายอากาศสำหรับระบบระบุระยะใน ช่วงความถี่ 125 kHz นั้นจะมีคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยน โครงสร้างต่างๆ ในลักษณะที่สอดคล้องกัน ส่วนของการ วิเคราะห์ในขั้นสุดท้ายสรุปได้เป็นดังนี้

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง | เท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร |
| มุมทแยงของลูปสายอากาศ (α) | เท่ากับ 20 องศา |
| ค่าระยะห่าง (d_c) ของสายอากาศ | เท่ากับ 18 เซนติเมตร |
| ระยะห่างระหว่างมุมทแยง (β) | เท่ากับ 3 เซนติเมตร |
| ระยะ (d) วางห่างกัน 2 เกต | เท่ากับ 1 เมตร |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างและผลการทดสอบ

4.1 การสร้างสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบขดลวด

อาศัยผลการวิเคราะห์โครงสร้างต่างๆ ของสายอากาศทำให้ได้โครงสร้างของสายอากาศที่มีคุณลักษณะของสายอากาศที่ดี การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศแบบขดลวดในทางปฏิบัติจะต้องออกแบบที่ความถี่ต่ำของช่วงความถี่ที่นำไปใช้งาน และจากการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีต้องออกแบบโครงสร้างที่มีขนาดของขดลวดที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ได้ระยะการอ่านของเครื่องถูกขยายไกลมากขึ้น จึงจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโครงการนี้วิเคราะห์สายอากาศที่นำไปใช้กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ความถี่ต่ำ โดยจะได้โครงสร้างของสายอากาศแบบขดลวดจากการคำนวณและการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมอย่างง่ายแสดงดังในรูปที่ 4.1 สมการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ

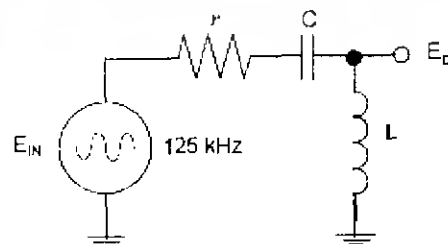
$$Z(j\omega) = r + j(X_L - X_C) \quad (4.1)$$

โดยที่ r = ความต้านทานของวงจร

$$X_L = 2\pi f_0 L \quad (4.2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (4.3)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 4.1 จะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบค่ารีแอกแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ($X_L = X_C$) เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์



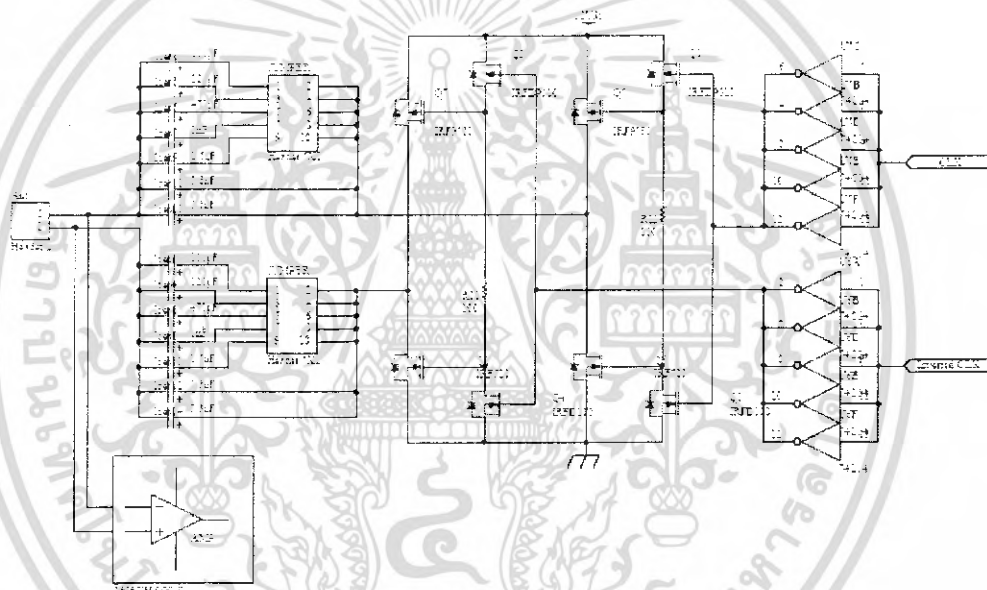
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเรโซแนนซ์และความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

จากภาพวงจรขั้วของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ความถี่ต่ำของบริษัท IE Technology ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองข้างต่ออนุกรมกับสายอากาศ ตัวเก็บประจุไฟฟ้านี้มีไว้สำหรับปรับให้วงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งตัวเก็บประจุไฟฟ้าแต่ละข้างมีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 6.6 - 9.89 nF ดังนั้นเมื่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองข้างต่ออนุกรมกันจะเหลือค่าความจุไฟฟ้า 3.3 - 4.945 nF จากสมการที่ 4.4 สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับวงจรเรโซแนนซ์ ได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 327.83 - 491.25 μH

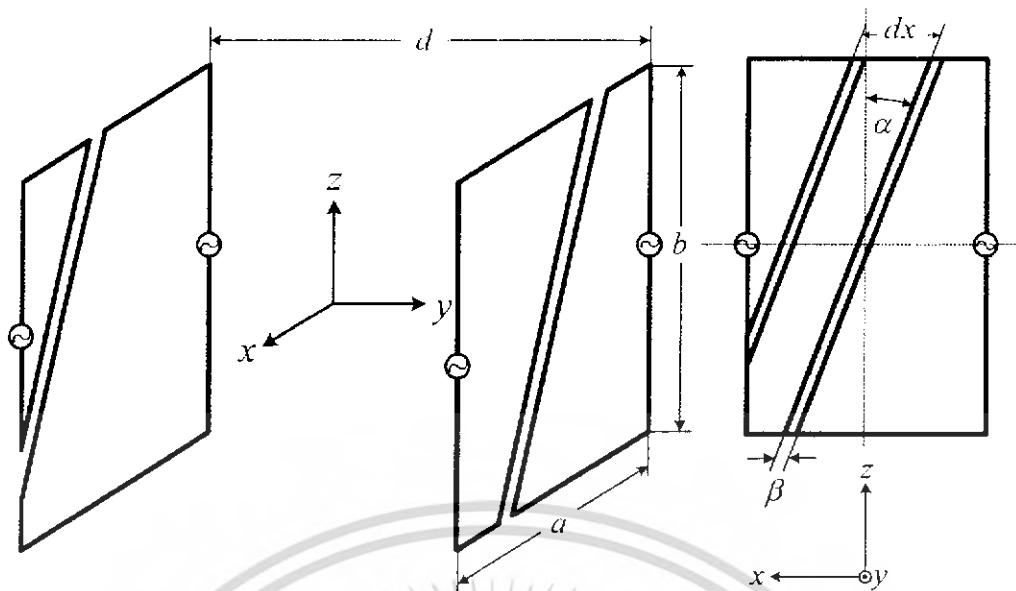


รูปที่ 4.2 ภาพวงจรขั้วของเครื่องอ่านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ความถี่ต่ำของบริษัท IE Technology

4.1.2 การสร้างสายอากาศความถี่ต่ำแบบขดลวด

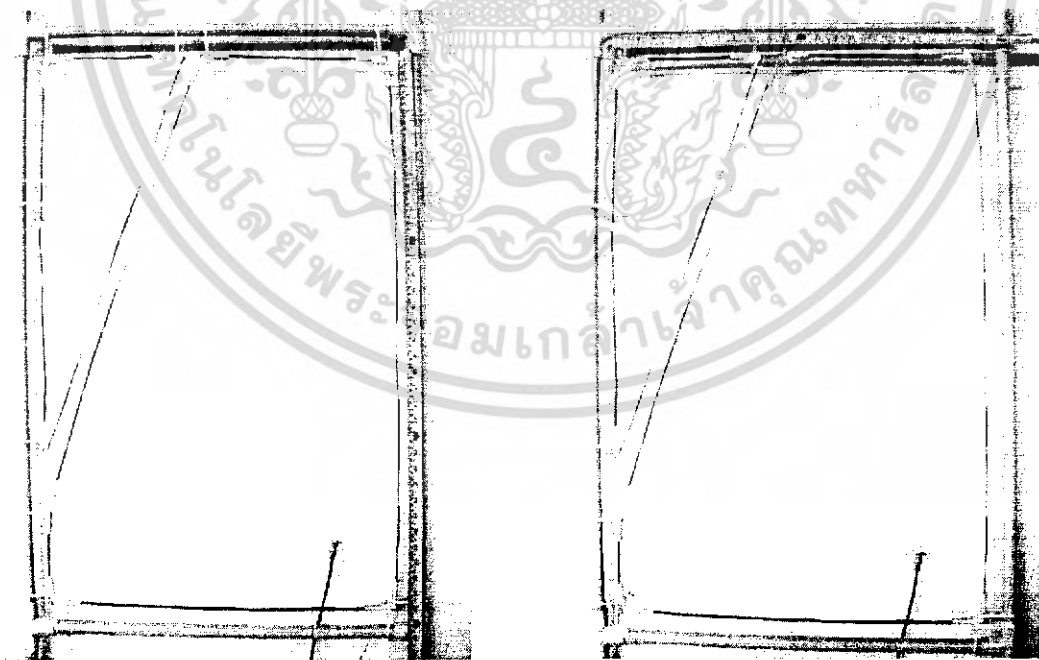
เมื่อคำนวณค่าความเหนี่ยวนำได้แล้ว ก็ทำการสร้างสายอากาศขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำในช่วงที่คำนวณได้ โดยการพันลวดทองแดงเบอร์ 22 เป็นจำนวนสี่ขดดังรูปที่ 4.3 โครงสร้างและขนาดต่างๆ ของสายอากาศ ให้แต่ละขดลวดมีจำนวนรอบที่เท่ากันและมีค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วงที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายอากาศ

นำค่าโครงสร้างต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบมาสร้างสายอากาศที่ความถี่ 125 kHz ดังรูปที่ 4.4 รูปด้านซ้ายของสายอากาศ รูปที่ 4.5 รูปด้านขวาของสายอากาศ และรูปที่ 4.6 รูปโครงสร้างสายอากาศที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.4 รูปด้านซ้ายของสายอากาศ

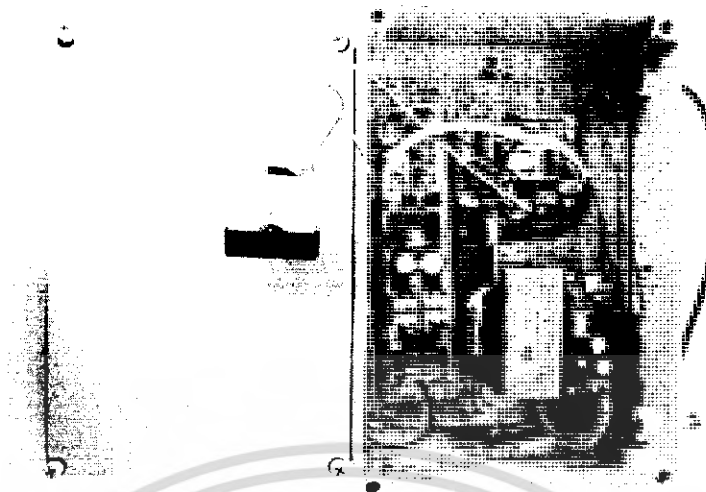
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปค้ำของสายอากาศ

รูปที่ 4.6 รูปโครงสร้างสายอากาศที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เครื่องอ่านและเครื่องลูกข่ายที่ใช้ในการทดลอง

จากรูปที่ 4.6 รูปโครงสร้างสายอากาศที่ทำการทดลอง ซึ่งนำมาต่อเข้ากับเครื่องอ่านในรูปที่ 4.7 จึงจะทำให้สามารถใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้

4.2 ผลการทดสอบ

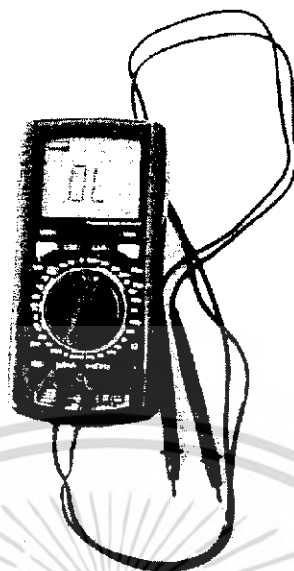
4.2.1 ผลจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำและอ่านค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อต่อขดลวดของสายอากาศทั้งสองเกิดเข้าด้วยกันและทำการต่อเข้ากับเครื่องอ่าน ทำการปรับจูนค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้เกิดเรโซแนนซ์ วัดค่าความเหนี่ยวนำจะได้ค่าเท่ากับ $403 \mu\text{H}$ อ่านค่าความจุไฟฟ้าได้เท่ากับ 4.41 nF และวัดค่าความต้านทานเท่ากับ 2.6 โอห์ม จากค่าที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ตามสมการที่ 4.4 จะได้ค่าเท่ากับ 119.38 kHz ดังนั้นถ้ากำหนดค่าความถี่ของเครื่องอ่านที่ 125 kHz และกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่ 4.41 nF เมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ 4.4 จะได้ค่าเท่ากับ $367.60 \mu\text{H}$

4.2.2 ผลจากการวัดค่าความเหนี่ยวนำและวัดค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อต่อขดลวดของสายอากาศทั้งสองเกิดเข้าด้วยกันและทำการต่อเข้ากับเครื่องอ่าน ทำการปรับจูนค่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้เกิดเรโซแนนซ์ วัดค่าความเหนี่ยวนำจะได้ค่าเท่ากับ $403 \mu\text{H}$ วัดค่าความจุไฟฟ้าได้เท่ากับ 4.20 nF ซึ่งต่างจากค่าความจุไฟฟ้าที่อ่านได้และวัดค่าความต้านทานเท่ากับ 2.6 โอห์ม จากค่าที่วัดได้นำมาคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ตามสมการที่ 4.4 จะได้ค่าเท่ากับ 122.33 kHz ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับความถี่ที่ 125 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทาน

4.2.3 ผลการทดสอบเมื่อต่อสายอากาศกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ

เมื่อทำการต่อสายอากาศแบบขดลวดดังรูปที่ 4.4 อนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าและต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณ จากนั้นนำออสซิลโลสโคปมาทำการวัดค่าขนาดของสัญญาณที่ดักคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้าและตัวเหนี่ยวนำเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ โดยทำการป้อนที่ความถี่ต่างๆ และทำการป้อนขนาดของสัญญาณไซน์เพิ่มค่าขึ้น จะทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ดังตารางที่ 4.1 บันทึกผลความถี่เรโซแนนซ์ที่ขนาดของสัญญาณต่างๆ

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลความถี่เรโซแนนซ์ที่ขนาดของสัญญาณต่างๆ

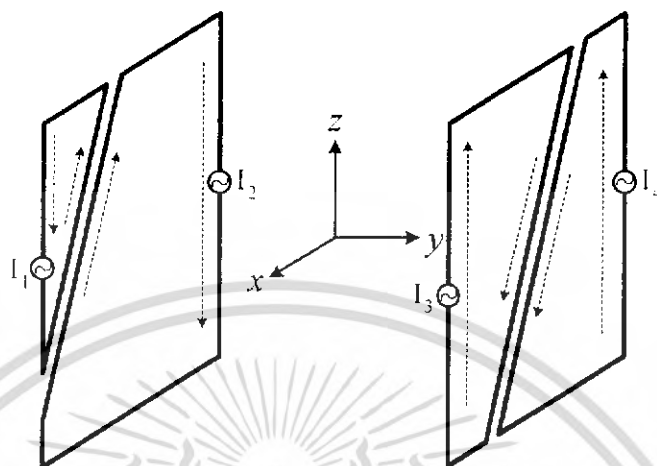
| ขนาดของสัญญาณไซน์ (โวลต์) | ความถี่เรโซแนนซ์ (MHz) |
|---------------------------|------------------------|
| 1 | 122.89 |
| 3 | 122.69 |
| 5 | 122.43 |
| 10 | 122.10 |
| 15 | 122.40 |
| 20 | 122.48 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการทดสอบเมื่อต่อสายอากาศกับเครื่องอ่าน

4.2.4.1 เมื่อป้อนกระแสแบบ Out Of Phase

เมื่อป้อนกระแสใส่ให้กับสายอากาศแบบ Out Of Phase จะเป็นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 ทิศทางการป้อนกระแสแบบ Out Of Phase

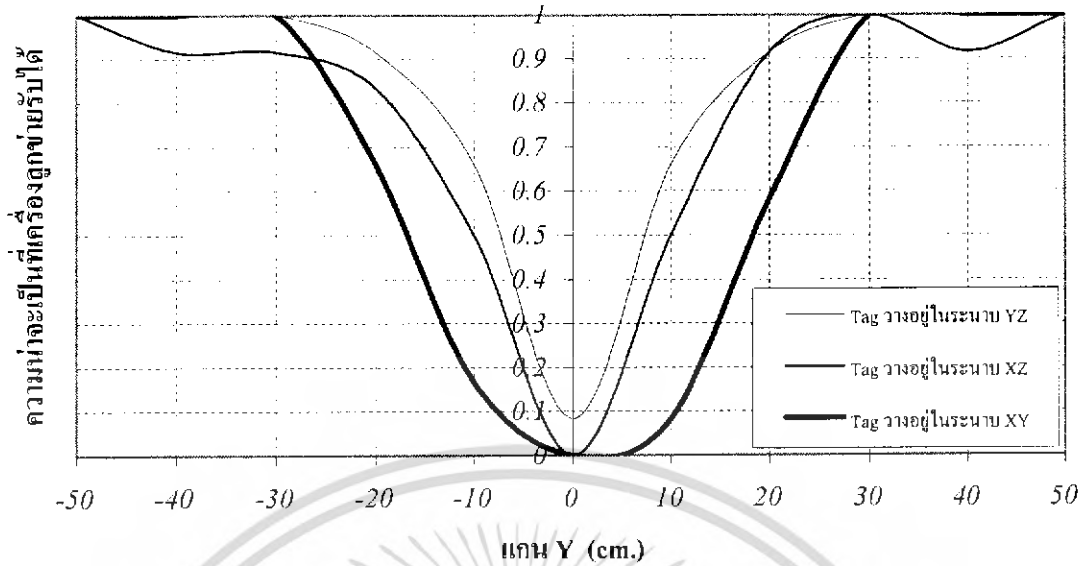
ทำการเก็บผลการทดลอง โดยนำแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมาวางในแนวระนาบขนานกับสายอากาศที่ตำแหน่งของระยะแกน Y ต่างๆ กัน ตั้งแต่ -50 เซนติเมตร ถึง 50 เซนติเมตร โดยเว้นช่วงที่ละ 10 เซนติเมตร และที่แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดจะทำตารางขนาดเท่าเครื่องลูกข่ายเป็นจำนวน 130 ช่อง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่สายอากาศ แล้วทำการเก็บผล โดยเก็บค่าตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้ที่เครื่องลูกข่ายอยู่ในแนวระนาบต่างๆ ดังตัวอย่างตารางที่ 4.1 เป็นตารางที่ใช้ในการเก็บผล แล้วทำการเก็บค่าที่ระยะต่างๆ ของแกน Y จนครบตามที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างตารางที่ใช้ในการเก็บผล

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
| 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 |
| 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 90 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 |
| 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 |

เมื่อเก็บค่าที่เครื่องลูกข่ายสามารถรับได้จนครบแล้ว ทำการหาค่าความน่าจะเป็นจากค่าตารางที่ได้ เพื่อนำมาสรุปก็จะได้ดังกราฟรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

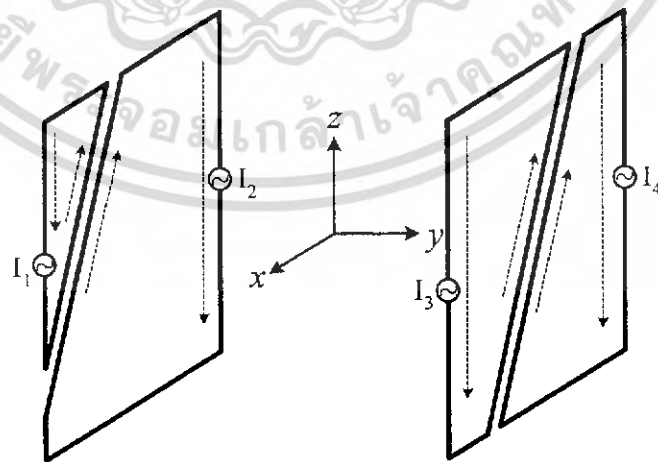


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ Tag สามารถทำงานได้และระยะแนวแกน Y ของสายอากาศ

เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้สายอากาศทั้งสองเกิดเป็นแบบ Out Of Phase กัน จะทำให้ได้ระยะการอ่านของเครื่องลูกข่ายที่ดีที่สุดตอนนี้อยู่ที่ประมาณ 1 เมตร และอ่านเครื่องลูกข่ายได้ในทิศทางที่เครื่องลูกข่ายอยู่ในระนาบ YZ และสามารถอ่านเครื่องลูกข่ายได้ทุกทิศทางในระยะที่ใกล้สายอากาศมากขึ้นดังรูปที่ 4.10

4.2.4.2 เมื่อป้อนกระแสแบบ Inphase

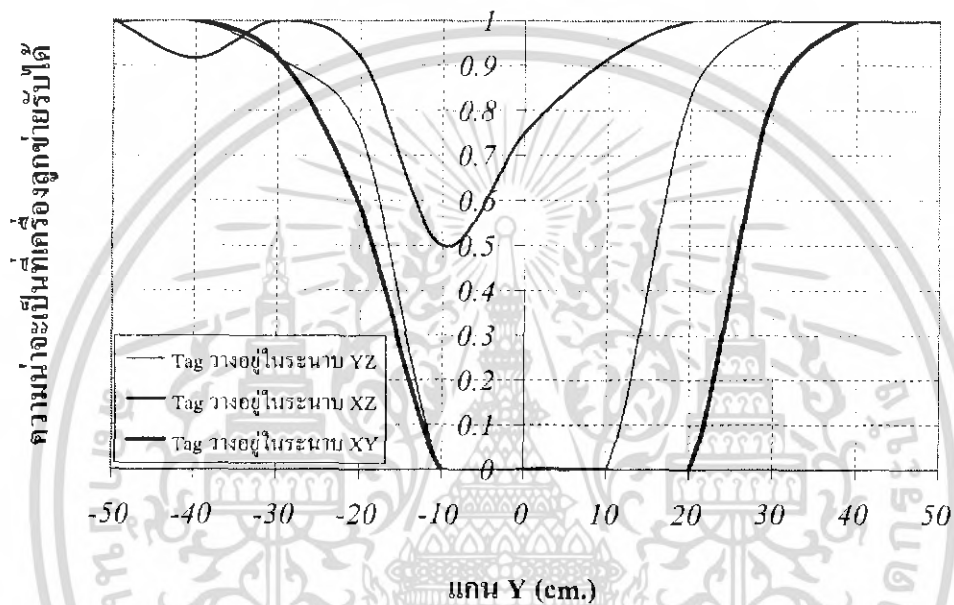
เมื่อป้อนกระแสให้กับสายอากาศแบบ Inphase จะเป็นดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ทิศทางการป้อนกระแสแบบ Inphase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเก็บผลการทดลองโดยนำแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมาวางในแนวระนาบขนานกับสายอากาศที่ตำแหน่งของระยะแกน Y ต่างๆ กัน ตั้งแต่ -50 เซนติเมตร ถึง 50 เซนติเมตร โดยเว้นช่วงที่ละ 10 เซนติเมตร และที่แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดจะทำตารางขนาดเท่าเครื่องลูกข่ายเป็นจำนวน 130 ช่อง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่สายอากาศ แล้วทำการเก็บผลโดยเก็บค่าตำแหน่งที่เครื่องลูกข่ายสามารถทำงานได้ที่เครื่องลูกข่ายอยู่ในแนวระนาบต่างๆ ดังตัวอย่างตารางที่ 4.1 เป็นตารางที่ใช้ในการเก็บผล แล้วทำการเก็บค่าที่ระยะต่างๆ ของแกน Y จนครบตามที่กำหนด โดยทำเหมือนหัวข้อที่ 4.2.4.1 แต่เปลี่ยนการป้อนกระแสเป็นแบบ Inphase จะสรุปได้ดังกราฟรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ Tag สามารถทำงานได้และระยะแนวแกน Y ของสายอากาศ

เมื่อทำการป้อนกระแสไฟให้สายอากาศทั้งสองเกิดเป็นแบบ Inphase กัน จะทำให้ได้ระยะการอ่านของเครื่องลูกข่ายที่ดีที่สุดตอนนี้อยู่ที่ประมาณ 1 เมตร และอ่านเครื่องลูกข่ายได้ในทิศทางที่เครื่องลูกข่ายอยู่ในระนาบ XZ และสามารถอ่านเครื่องลูกข่ายได้ทุกทิศทางในระยะที่ใกล้สายอากาศมากขึ้นดังรูปที่ 4.12

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป

ปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบขดลวด ซึ่งเป็นสายอากาศที่สามารถที่จะนำไปใช้ในช่วงความถี่ต่ำได้ดี และเมื่อนำสายอากาศแบบขดลวดไปประยุกต์ใช้กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จึงได้พิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแบบขดลวด เช่น ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ค่าความต้านทานของขดลวด และการแพร่กระจายความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนต่างๆ ในช่วงความถี่ต่ำที่นำไปใช้งาน คุณลักษณะการแพร่กระจายความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นลวด โครงสร้างโดยรวมของสายอากาศต้องมีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบริเวณพื้นที่ที่ใช้งานและลักษณะของงาน ในการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศได้ใช้เส้นลวดทองแดงพันเป็นขดลวดตามลักษณะที่ออกแบบไว้ ซึ่งสายอากาศที่ได้จะมีขนาดของความสูงเท่ากับ 89 เซนติเมตร ความกว้างเท่ากับ 56 เซนติเมตร ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า NEC2 วิเคราะห์หาโครงสร้างที่ทำให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศดังกล่าว

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบจะพบว่าสายอากาศแบบขดลวด ที่ความถี่ 125 kHz มีคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศสอดคล้องกันดังที่จะได้สรุปไว้ดังนี้

1) สายอากาศแบบขดลวดนี้จะมีค่าความเหนี่ยวนำเมกซ์ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 327.83 μH ถึง 491.25 μH และจากการทดลองจะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 403 μH และค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 4.20 nF ที่ทำให้ได้ระยะการอ่านไกลขึ้น

2) ค่าสนามแม่เหล็กที่ระนาบแนวแกนต่างๆ และการแพร่กระจายความเข้มสนามแม่เหล็ก ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการป้อนกระแสให้กับขดลวด และเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับเส้นลวด โดยที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงที่ระยะไกลจากสายอากาศมากขึ้น

3) ระยะการอ่านของสายอากาศเครื่องอ่านและเครื่องลูกข่าย อยู่ที่ประมาณ 1 เมตร ที่ความถี่ 125 kHz

หนังสืออ้างอิง

- [1] Klaus Finkenzeller. *RFID Handbook*. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] AN678 RFID Coil Design, [Online]. Available: <http://www.microchip.com>
- [3] U2270B Antenna Design Hints, [Online]. Available: <http://ftp.jetedata.cz/pub/ham/sheet/u/u2270hin.pdf>
- [4] HF Antenna Design Notes Technical Application Report, [Online]. Available: <http://www.ti-rfid.com>
- [5] 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.
- [6] G. J. Burke and A. J. Poggio. Numerical Electromagnetics Code (NEC) Method of Moment, Part I-III. Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, CA, 1981.
- [7] ATMEL "Multifunctional 330-bit Read/Write RF-Identification IC", [Online]. Available: http://www.atmel.com/dyn/resources/pord_documents/doc4612.pdf



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้