บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วย ประเภทของแท็กแบบต่าง ๆ หลักการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ กับแท็ก หลักการสื่อสารแบบ Inductive coupling การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และการออกแบบสายอากาศแบบขดลวดที่ใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง

2.2 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID) ย่อมาจาก Radio frequency identification เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุอยู่ที่สามารถ อ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลาย ๆ แท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือนการกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ในแท็ก

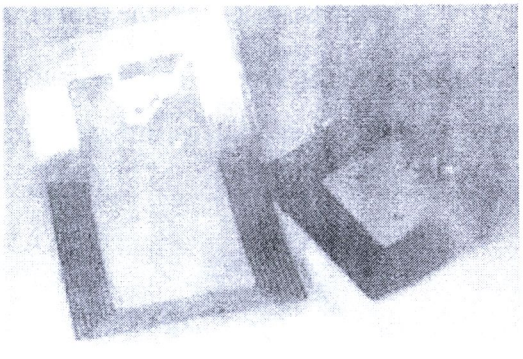
ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีองค์ประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือแท็ก ที่ใช้ติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่เราต้องการโดยแท็กที่ว่าจะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ เอาไว้ ส่วนที่สองก็คือเครื่องสำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในแท็กด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ด เพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็คือ ตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ก็คือเครื่องอ่านข้อมูลบาร์โค้ด โดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบคือ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียน ส่วนระบบบรหัสแท่งจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านเป็นการใช้แสงในการอ่านรหัสแท่งซึ่งจะต้องอ่านรหัสแท่งที่ไม่มีอะไรปกปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกน และอ่านวัตถุได้ทีละชิ้น ในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะแตกต่าง โดยสามารถอ่านแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่นเพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้และการอ่านแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุยังสามารถอ่านได้หลาย ๆ แท็กในเวลาเดียวกัน

2.2.1 แท็ก

โครงสร้างภายในของแท็กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้า โดยทั่วไปแท็กอาจอยู่ในชนิดทั้งเป็นกระดาษ แผ่นฟิลม์ พลาสติก มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำเอาไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น แต่โดยหลักการอาจแบ่งแท็กที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดใหญ่ ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้างและหลักการทำงาน ซึ่งจะขอกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

2.2.1.1 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบบพาสซีฟ

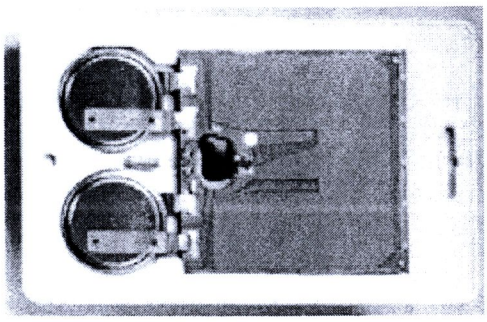
แท็กชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใด ๆ แสดงตามรูปที่ 2.1 เพราะภายในแท็กจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ
ที่มา : http://glossary.ippaper.com

2.2.1.2 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ

แท็กชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท็ก ซึ่งแท็กชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกล มีอายุการใช้งานสั้นและมีราคาแพง มักนิยมใช้กับเครื่องอ่านย่านความถี่ UHF หรือ ไมโครเวฟ



รูปที่ 2.6 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ

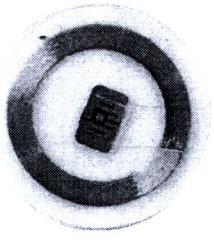
ที่มา : http://www.acentech.net

2.2.2 ประเภทของแท็กในระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

อุปกรณ์แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ประเภทต่าง ๆ ที่มีการผลิตใช้งานในกิจการต่าง ๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

2.2.2.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and Coin)

แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างทรงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท็กชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึง 10 cm

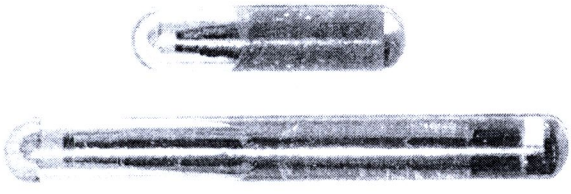


รูปที่ 2.7 แท็กแบบจานและเหรียญ

ที่มา : http://www.diytrade.com

2.2.2.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)

เป็นแท็กที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณะสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 mm



รูปที่ 2.8 **แท็กแบบกระเปาะแก้ว** ที่มา : http://www.alibaba.com

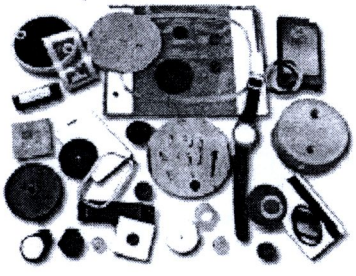
2.2.2.3 แท็กแบบพลาสติก (Plastic housing)

นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ แท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลาย ๆ ประเภท

รูปที่ 2.9 แท็กแบบพลาสติก ที่มา : http://www.alibaba.com

2.2.2.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุแท็กลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ



รูปที่ 2.10 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ ที่มา : http://www.alibaba.com

2.2.2.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and Key fob)

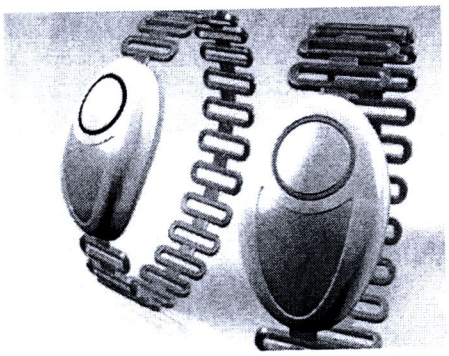
แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคล

รูปที่ 2.11 แท็กแบบพวงกุญแจ ที่มา : http://www.ankaka.com

2.2.2.6 แท็กแบบนาฬิกา

แท็กแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2535 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรียที่มีชื่อว่า Sky-data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ลู่เล่นสกีสำหรับนักสกีทั้งหลาย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 2.12 แท็กแบบนาฬิกา ที่มา : http://web.tradecorea.com

2.2.2.7 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส

แท็กแบบ ID-1 มีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณ 85.72 คูณ 54.03 mm ความหนา 0.76 mm เป็นแท็กที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าแท็กแบบอื่น ๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก

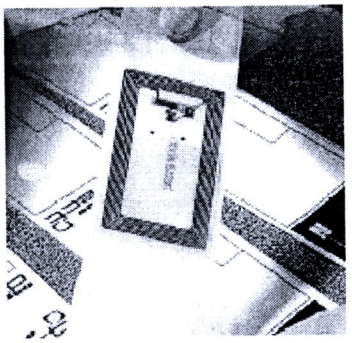
รูปที่ 2.13 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส
ที่มา : http://www.alibaba.com

2.2.2.8 แท็กแบบ Smart Label

เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบาง ๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบฟอยล์พลาสติกความหนา

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 2 6 ม.ค. 2555
เลขทะเบียน 250488
เลขเรียกหนังสือ

เพียง 0.1 mm โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบฟอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด



รูปที่ 2.14 แท็กแบบ Smart Label
ที่มา : http://www.alibaba.com

2.2.2.9 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-Chip)

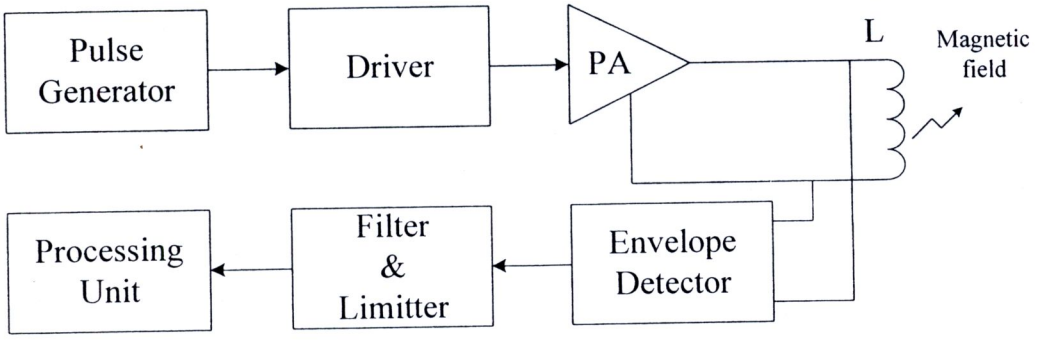
แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ชนิดนี้มีความแตกต่างจากแท็กแบบอื่น ๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างแท็กกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)

โดยหน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูลก็คือ การเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ภายในเครื่องอ่านข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วย สายอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดงเพื่อใช้รับส่งสัญญาณ ภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้ [1]-[2]

- ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ
- ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ
- วงจรจูนสัญญาณ
- หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

โดยทั่วไปหน่วยประมวลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม จะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนไปถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate Size) เป็นต้น



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล [1]

2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type)

อุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทั้งแท็กและเครื่องอ่านขจะมีรูปแบบมูลบนการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX) / Half duplex (HDX)

2.3.1.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX)

เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับแท็กที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่แท็กส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรืออาจส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตนเองทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่าดังนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจากแท็กแต่ละเครื่อง ให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง โดยใช้มอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ซึ่งการสื่อสารแบบ Full duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและ

แปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับแท็กได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กกับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถกระทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.12

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 2.16 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex [1]

2.3.1.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half duplex เครื่องอ่านข้อมูลจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับแท็กตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยังแท็ก (Downlink) และการส่งข้อมูลจากแท็กกับมายังเครื่องอ่านข้อมูล (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก ดังรูปที่ 2.12

2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็กในระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data capacity) ไล่ขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลาย ๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit Transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ตามขีดความสามารถในการโปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจ

เป็นรหัสเลขหมายใด ๆ ตามที่ได้รับคำสั่งจ้างทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านข้อมูลได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power supply)

เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟ (Passive transponder) ซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอ็กทีฟ (Active transponder) ซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีแท็กอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากแท็กจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งาน สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 4 ย่าน หลักได้แก่

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

ในการใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (LF ระยะอ่านประมาณ 1 cm จนถึง 1 m และ HF ระยะอ่านประมาณ 1 m) เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้า

ออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่าน UHF จะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (UHF ระยะอ่านประมาณ 1-10 m) เช่น ระบบเก็บค่าบริการทางด่วน และในปัจจุบันระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 m เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด และมีราคาแพงที่สุดด้วยเช่นกัน ส่วนระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

2.4.1 ความถี่ใช้งาน

หลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz จะใช้รูปแบบส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่อุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่มีการสื่อสารโดยใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.45-5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz ถึง 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างแท็กและเครื่องอ่านซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ทำงานที่ความถี่ในย่าน HF น่าจะให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางกว้าง

ส่วนการเลือกใช้ย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์แท็กที่ทำงานในย่านไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟสำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลาย ๆ ประการ สิ่งที่ควรพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่สูงก็คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากเป็นการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการคือ ตำแหน่งของแท็กหรือระยะห่างขั้นต่ำระหว่างแท็กแต่ละตัวกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่ประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็ก และความเร็วในการอ่าน/เขียนข้อมูลของแท็ก

2.4.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

2.4.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้น ๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใดเพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

2.4.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

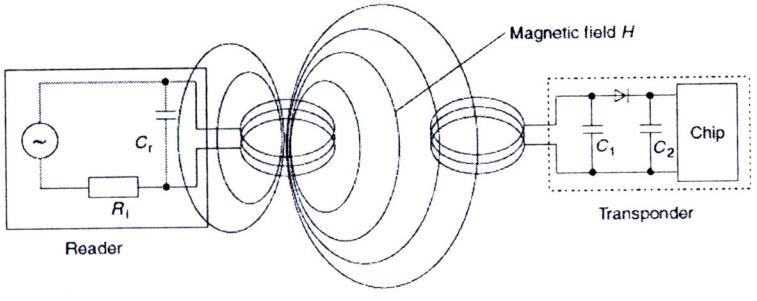
การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1-3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field strength : E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength : H) ไม่เกิน $16.3/f$ A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power density : S) ไม่เกิน $10,000/f^2$ mW/cm^2 โดยคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging time) 6 นาที ซึ่ง f มีหน่วยเป็น MHz [2] และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 m จะต้องมีค่าไม่เกิน72 dBμA/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300 [2]

2.4.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้แท็กแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือแท็กทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

2.5 เทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive coupling

เป็นมาตรฐานที่ใช้หลักการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของแท็กประกอบไปด้วยแผงวงจรหรือชิปที่เก็บบันทึกข้อมูลต่าง ๆ โดยมีขดลวดพื้นที่กว้างทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.17 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กเป็นการรับพลังงานไฟฟ้า จากเครื่องอ่าน [1]

2.5.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) คือไม่มีแหล่งพลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นจะต้องรับพลังงาน (Energy) มาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและพลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งพลังงานสนามแม่เหล็กที่กำลังสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถเหนี่ยวนำขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศของแท็กได้อย่างเหมาะสม ประกอบทั้งความยาวคลื่นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งกระจายออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูลนั้นมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งโดยทั่วไปวางห่างกันไม่มากนัก

เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบ Inductive coupling ส่วนใหญ่ใช้ความถี่ต่ำเพียง 125-134.2 kHz หรือ 13.56 MHz ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีความยาวคลื่นยาวมากถึง 2,400 m ที่ความถี่125-134.2 kHz และ 22.12 m ที่ความถี่ 13.56 MHz จึงไม่มีปัญหาในเรื่องของความยาวคลื่นที่สั้นเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนหรือถูกลดทอนจากผนังอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ หากพิจารณาถึงพื้นที่ใช้งานโดยทั่วไปที่ไม่ได้ไกลหรือกว้างมากนัก

สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะตกกระทบขดลวดสายอากาศของแท็ก ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดอ่อน ๆ ขึ้นบนขดลวด ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกนำไปเข้ากระบวนการกรองสัญญาณ โดยตัวเก็บประจุและไดโอดเพื่อกรองให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนให้กับอุปกรณ์ชิป การออกแบบอยู่ที่การเลือกค่าของตัวเก็บประจุ (C_1) ซึ่งจะต้องมีค่าสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสายอากาศ เพื่อให้สามารถกำหนดค่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่แท็ก เปรียบเทียบการถ่ายทอดพลังงานไฟฟ้าระหว่างขดลวดทั้งสองในรูปที่ 2.13 จะเทียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวด 2 ชุด แต่ขดลวดทั้งสองมิได้พันอยู่บนแกนแม่เหล็กเดียวกัน โดยใช้อากาศซึ่งมีการลดทอนมากกว่าแกนแม่เหล็กมาก ๆ

ดังนั้นในการออกแบบระบบ RFID ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายทอดพลังงานให้มากที่สุดจึงต้องเน้นไปที่ย่านความถี่ที่เหมาะสมต่อการส่งกระจายพลังงาน จำนวนรอบของขดลวดที่เครื่องอ่านข้อมูล และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดที่แท็ก มุมติดตั้ง และระยะห่างระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก

เมื่อความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารมีค่าสูงมากขึ้น จะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องใช้สำหรับขดลวดสายอากาศของแท็กจะมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงใช้จำนวนรอบในการพันลดลงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น หากใช้งานที่ความถี่ย่าน 125 kHz จะต้องมีการพันขดลวดสายอากาศที่แท็กในช่วง 100-1,000 รอบ แต่หากเพิ่มความถี่ในการใช้งานเป็น 13.56 MHz ก็ จะสามารถลดจำนวนรอบของขดลวดจะเหลือเพียง 3-10 รอบเท่านั้น ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แท็กลงได้ แต่ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลให้แรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามเหล็กในย่านความถี่สูงลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ทำให้จำกัดระยะทางในการใช้งานมากขึ้น การเลือกใช้อุปกรณ์ RFID จึงต้องพิจารณาทั้งขนาดของแท็กและระยะทางที่ต้องการใช้งานตรวจจับเป็นสำคัญ เพื่อใช้กำหนดเลือกย่านความถี่ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ใช้งาน

สิ่งที่ควรให้ความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบ Inductive coupling ก็คือพฤติกรรมการกินกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ชิปที่ติดตั้งอยู่บนแท็ก เนื่องจากค่อนข้างมีความหลากหลายและสัมพันธ์กับรูปแบบในการนำไปประยุกต์ใช้งาน การเลือกค่าความถี่พื้นฐานในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านกับแท็กระยะทางพื้นที่ใช้งาน และขนาดของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากจำนวนรอบของขดลวดสายอากาศ จึงจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับประเภทของการใช้งานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.5.2 การส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แบบ Inductive coupling กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล หรือ Uplink communication โดยใช้เทคโนโลยีที่เป็นการส่งกระจายคลื่นความถี่วิทยุคือ Load modulation จะมีหลักการทำงานดังนี้

2.5.2.1 เทคโนโลยี Load modulation

พฤติกรรมในการส่งสัญญาณระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านและขดลวดของแท็กมีแบบจำลองที่ไม่ต่างจากการทำงานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแต่อย่างใด หากแต่เพียงตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายทอดพลังงานเป็นอากาศไม่ใช่โลหะดังเช่นที่พบเห็นในหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป แต่การใช้อากาศเป็นตัวกลางถ่ายทอดสัญญาณระหว่างขดลวดทั้งสองนั้น จะทำได้ก็ต่อเมื่อระยะห่างระหว่างขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กห่างกันไม่เกิน 0.16 เท่าของค่าความยาวคลื่น (0.16λ) ซึ่งหากคิดกรณีที่ใช้ความถี่ในย่าน 125 kHz ที่มีความยาวคลื่น 2,400 m ก็จะหมายความว่าจะวางแท็กกับเครื่องอ่านห่างกันได้ในระยะทางไม่เกิน 0.16 คูณ 2,400 = 384 m [3]

หากมีการนำแท็กซึ่งมีคุณสมบัติของขดลวดและตัวเก็บประจุ ตรงกันกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องอ่านมาใช้ในพื้นที่ตรวจสอบที่มีการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กจากเครื่องอ่านข้อมูล แท็กย่อมจะดึงพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการเหนี่ยวนำเพื่อสร้างแรงดันไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน ซึ่งหากพิจารณาในแง่ของวงจรไฟฟ้าแล้ว เครื่องอ่านข้อมูลจะมองเห็นแท็กเป็นโหลดวงจรตัวหนึ่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_T ต่อพ่วงอยู่กับขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ไม่ว่าจะเป็นการส่งหรือหยุดส่งพลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูล ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ Z_T ที่เครื่องอ่านข้อมูลอย่างแน่นอน เนื่องจากในแง่ของวงจรเรโซแนนซ์ ที่เกิดจากขดลวด และตัวเก็บประจุ บนแท็กย่อมมีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่และไม่มีการจ่ายพลังงานก็เทียบเท่ากับความถี่เท่ากับศูนย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์เสมือน Z_T นี้ย่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลโดยปริยาย ซึ่งเป็นสัญญาณแจ้งให้เครื่องอ่านข้อมูลทราบว่ากำลังจะมีการส่งข้อมูลจากแท็กมา เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Load modulation ส่วนจะประยุกต์ใช้งานส่งข้อมูลแบบ Half duplex หรือ Full duplex นั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรตรวจจับและถอดรหัสสัญญาณซึ่งเป็นเรื่องที่ลงรายละเอียดไปในการออกแบบ

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูล

ในการพัฒนาสายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุของเครื่องอ่านข้อมูล มีเหตุผลหลักอยู่ 2 ประการคือ

- เพื่อต้องการส่งความถี่วิทยุ (คลื่นพาห์) ให้เป็นกำลังงานของแท็ก
- เพื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุ (สัญญาณข้อมูล) จากแท็ก

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ สามารถที่จะแพร่กระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพในมิติเชิงเส้นของสายอากาศ ซึ่งเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ในการประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะ

ทางคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่สูง (13.56 MHz) ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าประมาณ 22.12 m เนื่องจากค่าของความยาวคลื่นมีค่ายาวมาก ในความเป็นจริงไม่สามารถที่จะสร้างสายอากาศได้ในระยะที่จำกัดตามจริง แต่มีทางเลือกหนึ่งเป็นสายอากาศขดลวดแบบบ่วงขนาดเล็ก พิจารณาจากความยาวเส้นลวดรวมทั้งหมดของสายอากาศที่น้อยกว่า $\lambda/10$ ซึ่งจะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน (13.56MHz) สายอากาศชนิดนี้จะใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้ (Magnetic in Near Field) ในการเชื่อมต่อการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศขดลวดตัวส่งและตัวรับ

การทำให้เกิดสนามโดยสายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็กนั้นจะไม่แพร่กระจายคลื่น แต่จะทำให้คลื่นอ่อนกำลังลงมากกว่า ความเข้มสนามถูกลดลงด้วย r^{-3} (เมื่อ $r=$ ระยะห่างจากสายอากาศ) ในสนามระยะใกล้ (r^{-3}) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวจำกัดระยะการอ่านในการใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3]

เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ผ่านขดลวด (สายอากาศ) เป็นการเหนี่ยวนำแรงดันให้ตกคร่อมด้านปลายสุดของขดลวด แรงดันนี้จะใช้เพื่อกระตุ้นแท็กแบบพาสซีฟ ดังนั้นสายอากาศขดลวดส่วนมากจะถูกออกแบบให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันได้สูงสุด

จากสมการที่ 2.1 เป็นสมการของ Biot-savart ที่ได้มาจากกฎของแอมแปร์ ได้กล่าวไว้ว่า การไหลของกระแสในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวนำ รูปที่ 2.14 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสส่วนหนึ่ง ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในตัวนำ (ลวด) ที่มีความยาวจำกัด [3]-[5] คิดได้จากสมการ

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

โดยที่ $I =$ กระแส

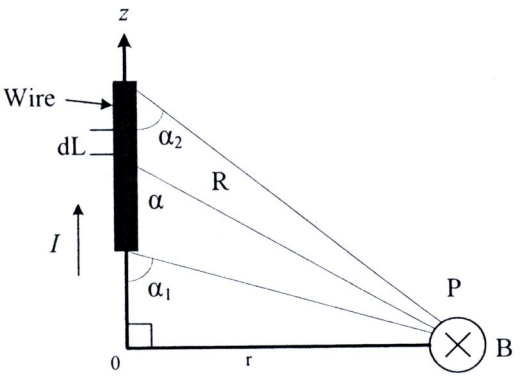
r = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของลวด

μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) ของช่องว่างอิสระ

มีค่า $4\pi\times10^{-7}$ (Henry/meter)

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

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.18 การคำนวณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) ที่ลวดตัวนำ [3]

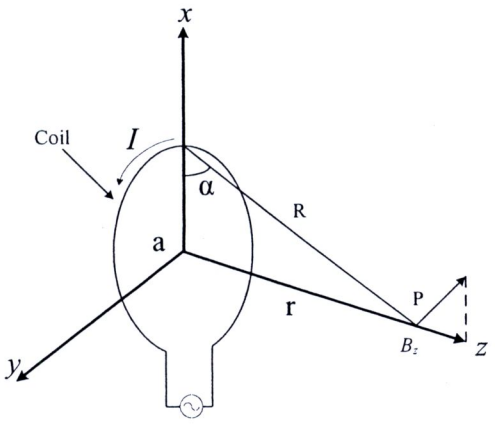
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดจากสายอากาศขดลวดแบบบ่วงวงกลม จำนวน N รอบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 จะได้สมการดังนี้ [3]

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

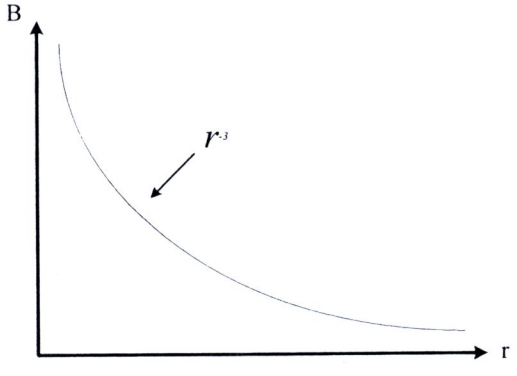
$$B_z = \frac{\mu_0 INa^2}{2}\left(\frac{1}{r^3}\right) \qquad ; r^2 \geq a^2 \tag{2.4}$$

โดยที่ a = รัศมีของบ่วง

สมการที่ 2.4 นี้แสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายอากาศแบบบ่วง ถูกลดลงด้วย $1/r^3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ความเข้มของสนามที่มากที่สุดในระนาบของบ่วงและทิศทางที่เหมาะสมสัมพันธ์กับค่ากระแส (I) จำนวนรอบ (N) และพื้นที่ผิวของบ่วง สมการที่ 2.4 ใช้มากสำหรับคำนวณหาค่า กระแส-รอบ ซึ่งจำเป็นสำหรับระยะการอ่าน ความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อกำลังงานที่แท็กจะได้รับตามสัดส่วน



รูปที่ 2.19 การคำนวณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I) เข้าบ่วง [3]



รูปที่ 2.20 การลดลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r [3]

2.6.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศขดลวด

จากกฎของฟาราเดย์ กล่าวไว้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านพื้นผิวปิด จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรอบบ่วง ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ เมื่อสายอากาศของแท็กและสายอากาศของเครื่องอ□านข้อมูลอยู่ในระยะที่ใกล้กัน สนามแม่เหล็ก B ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดจากสายอากาศขดลวดของเครื่องอ□านข้อมูลเหนี่ยวนำแรงดัน ทำให้เกิด

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) ในสายอากาศขดลวดของแท็ก และทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่เหมาะสมได้เรียกว่ากฎของฟาราเดย์

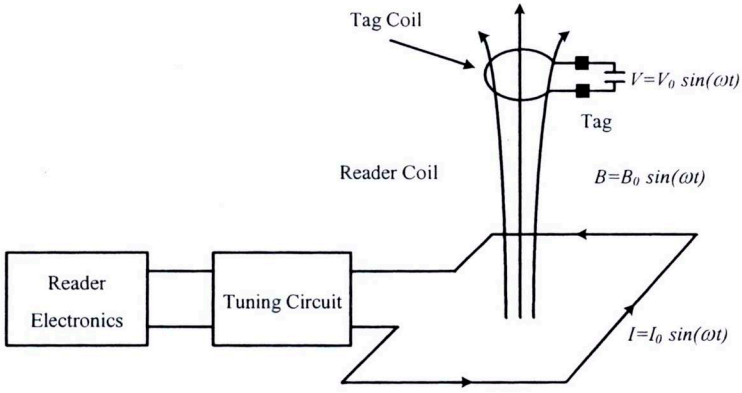
ในการเหนี่ยวนำแรงดันบนสายอากาศขดลวดของแท็ก เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux : ψ) ต่อเวลา จะได้ดังสมการที่ 2.5

$$V = -N\frac{d\psi}{dt} \tag{2.5}$$

โดยที่ N = จำนวนรอบของสายอากาศขดลวด

ψ = เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านแต่ละรอบ

เครื่องหมายลบในสมการการเหนี่ยวนำแรงดัน แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดกระแสไหลซึ่งมีผลทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ที่รู้กันในชื่อกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ซึ่งเป็นการเน้นถึงความจริงของทิศทางการไหลของกระแสในวงจร แสดงว่าแรงดันเหนี่ยวนำทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม



รูปที่ 2.21 พื้นฐานโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ□านข้อมูลและสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3]

เส้นแรงแม่เหล็กในสมการที่ 2.5 คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวทั้งหมดของสายอากาศขดลวดและสามารถหาได้จากสมการ

$$\psi = \int_S \bar{B}.d\bar{S} \tag{2.6}$$

โดยที่ $\bar{B}$ คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ที่ได้มาจากสมการที่ 2.4

S คือ พื้นที่ผิวที่ขดลวดล้อมรอบ

จากสมการที่ 2.6 สังเกตได้ว่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $\bar{B}$ และพื้นที่ผิว $d\bar{S}$ เป็นปริมาณเวกเตอร์ ผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์ในสมการที่ 2.6 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวด ซึ่งผลลัพธ์ของสองเวกเตอร์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเวกเตอร์ทั้งสองอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศขดลวดของแท็กจะมีค่ามากที่สุด เมื่อขดลวดทั้งสอง (สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศขดลวดของแท็ก) อยู่ในทิศทางที่ขนานกัน

จากสมการที่ 2.3-2.6 จะเป็นการเหนี่ยวนำแรงดัน V_0 สำหรับสายอากาศแบบบ่วงที่ไม่ได้จูน จะได้สมการที่ 2.7 ดังนี้

$$V_o = 2\pi fNSB_o \cos\alpha \tag{2.7}$$

โดยที่ f = ความถี่ของสัญญาณ

N = จำนวนรอบของขดลวดในบ่วง

S = พื้นที่ของบ่วงในหน่วย(m^2)

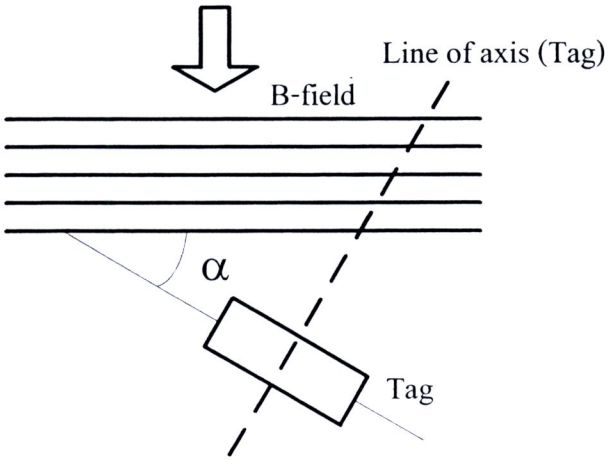
B_o = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

α = มุมระหว่างลูกข่ายกับระนาบสนามแม่เหล็ก

ถ้าทำการจูนขดลวด (ด้วยตัวเก็บประจุ : C) ที่สัญญาณความถี่ (13.56 MHz) แรงดันเอาต์พุต V_o ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ 2.7 จะคูณด้วยค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Quality factor) ของวงจรจูน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่ 5 ถึง 50 ที่ความถี่ต่ำของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

$$V_o = 2\pi f_o NQSB_o \cos\alpha \tag{2.8}$$

โดยค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ เป็นสิ่งบ่งชี้ของการเลือกความถี่ที่เหมาะสม



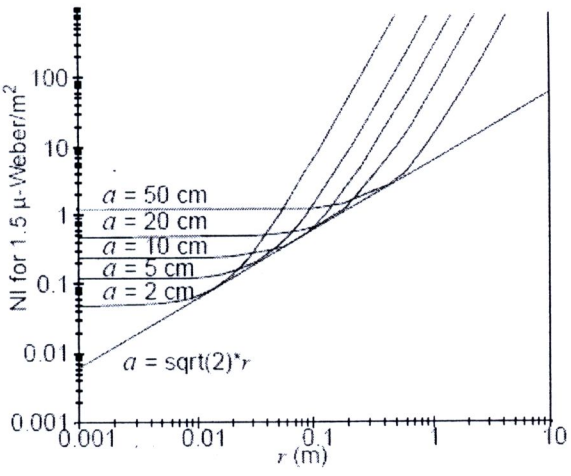
รูปที่ 2.22 การปรับทิศทางของสายอากาศของแท็กให้เหมาะสม [3]

การเหนี่ยวนำแรงดันข้ามสายอากาศขดลวดแบบบ่วงเป็นของฟังก์ชั่นมุมของสัญญาณ แรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่ามากที่สุดเมื่อสายอากาศขดลวดอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับทิศทางของสัญญาณที่ $\alpha = 0$

ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่แท็กต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และค่ากระแส-รอบ (Ampere-turns) ของสายอากาศขดลวดเครื่องอ□านข้อมูลที่มีรัศมีใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$NI = \frac{2B_0\left(a^2 + r^2\right)^{3/2}}{\mu a^2} \tag{2.9}$$

สำหรับระยะการอ่านที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการบอกถึงการพิจารณา การเพิ่มขึ้นของรัศมีของขดลวดซึ่งจะได้ผลมากกว่าการเพิ่มกระแสให้กับขดลวด



Note: B_O = 1.5 μWb/m² is used.

รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน [3]

จากรูปที่ 2.19 ค่า B_o ที่ใช้เท่ากับ 1.5 μWb/m² และรัศมีที่เหมาะสมของบ่วงต้องการค่าของกระแส-รอบที่น้อยที่สุด สำหรับระยะของการอ่านสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) เช่น

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

โดยที่ $$K = \frac{2B_z}{\mu_0}$$

โดยการนำอนุพันธ์มาใช้เพื่อหาค่ารัศมีจะได้

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

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

จากสมการข้างต้นจะกลายเป็นสมการที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

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

จากผลลัพธ์ข้างต้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการอ่านกับขนาดของแท็ก ค่ารัศมีที่เหมาะสมจะหาได้จาก

$$a = \sqrt{2}r \tag{2.11}$$

โดยที่ a = รัศมีของขดลวด

r = ระยะการอ่าน

จากผลลัพธ์ข้างต้นบอกให้รู้ว่า ค่ารัศมีที่เหมาะสมที่สุดของบ่วงสำหรับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลจะมีค่าประมาณ 1.414 เท่า ของระยะการอ่าน

2.6.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด

2.6.2.1 ขนาดและค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรง

เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทางไฟฟ้าจะแสดงตัวเลขตามมาตรฐานอเมริกา (American wire gauge : AWG) ค่าตัวเลขจะเป็นสัดส่วนที่ตรงกันข้ามกับค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นผ่านศูนย์โดยประมาณจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุก ๆ ขนาดลวดลดไปหกเบอร์ ลวดที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมีค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงที่สูง ค่าความต้านทานทางด้านไฟกระแสตรงของตัวนำที่เป็นแบบเดียวกันตามพื้นที่หน้าตัดหาค่าได้โดย

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma S} \tag{2.12}$$

โดยที่ l = ความยาวทั้งหมดของลวด

σ = ค่าความนำไฟฟ้า

S = พื้นที่หน้าตัด

ตารางที่ 2.1 แสดงเส้นผ่านศูนย์สำหรับด้านในและสารเคลือบโลหะของลวด และค่าความต้านทานทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อ 1 mil = 2.54×10^{-3} cm

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

2.6.2.2 ค่าความต้านทานทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของลวด

สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง ประจุคลื่นพาห์จะกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของลวด ขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่ารีแอกแตนซ์ใกล้จุดศูนย์ของลวดก็เพิ่มขึ้นด้วย มีผลให้ขอบเขตความหนาแน่นกระแสในค่าอิมพีแดนซ์สูง ดังนั้นประจุจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของลวดไปยังขอบของลวด มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลงในจุดศูนย์กลางของลวดและเพิ่มขึ้นใกล้ขอบของลวด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์คลื่นผิว (Skin effect) ความหนาภายในตัวนำที่มีความหนาแน่นกระแสลดลง $1/e$ หรือ 37% จากค่าความลึกผิว (Skin depth) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{2.13}$$

โดยที่ f = ความถี่

$\mu = \mu_0 . \mu_r$ = ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

μ_0 = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ

μ_r = ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

σ = ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ

ค่าความต้านทานของลวดที่ขึ้นกับความถี่ และค่าความต้านทานที่เกิดจากความหนาของพื้นผิว เรียกว่า ความต้านทานทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ การประมาณค่าความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับหาได้จากสมการ

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

โดยที่ a = รัศมีของขดลวด

สำหรับลวดทองแดง มีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 1.2566 N/A^2 ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 59.6×10^6 s/m และ มีค่าความสูญเสียประมาณได้โดยค่าความต้านทานทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของขดลวด ถ้ารัศมีของเส้นลวดใหญ่กว่า $0.066/\sqrt{f}$ cm

2.6.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด

กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสผ่านตัวนำอีกตัวหนึ่ง เรียกว่า ค่าความเหนี่ยวนำ (L) ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าคุณลักษณะของตัวนำ ขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าเส้นลวดที่เป็นวัสดุที่เหมือนกัน และขดลวดที่มีจำนวนรอบมากก็จะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าขดลวดที่มีจำนวนรอบน้อย ค่าความเหนี่ยวนำของตัวนำมีนิยามคือ อัตราส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

$$L = \frac{N\psi}{I} \tag{2.15}$$

โดยที่ N = จำนวนรอบ

I = กระแส

ψ = เส้นแรงแม่เหล็ก

2.6.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด

ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวดตรง ที่แสดงในรูปที่ 2.14 สามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวด มีหน่วยเป็น μH

l และ a = ความยาวและรัศมีของลวดในหน่วย cm ตามลำดับ

2.6.3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 1 ชั้น

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2.20 สามารถคำนวณได้จากสมการ

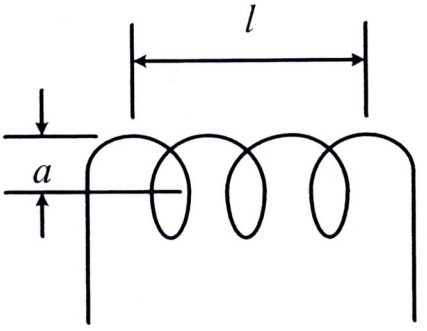
$$L = \frac{(aN)^2}{22.9l + 25.4a} \tag{2.17}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด มีหน่วยเป็น μH

a = รัศมีของขดลวด มีหน่วยเป็น cm

l = ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็น cm

N = จำนวนรอบ



รูปที่ 2.24 รูปของขดลวด 1 ชั้น [3]

สำหรับค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพที่ดีที่สุดของขดลวด ควรจะมีความยาวประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด

2.6.3.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบบ่วงวงกลมหลายชั้น

จากรูปแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดขนาดใหญ่ในขอบเขตที่จำกัด จะมีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพมากเมื่อพันขดลวดหลาย ๆ รอบ เป็นเหตุผลของรูปแบบในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศขดลวดของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 2.21 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดแบบบ่วงวงกลม สามารถคำนวณได้จากสมการ [3]

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

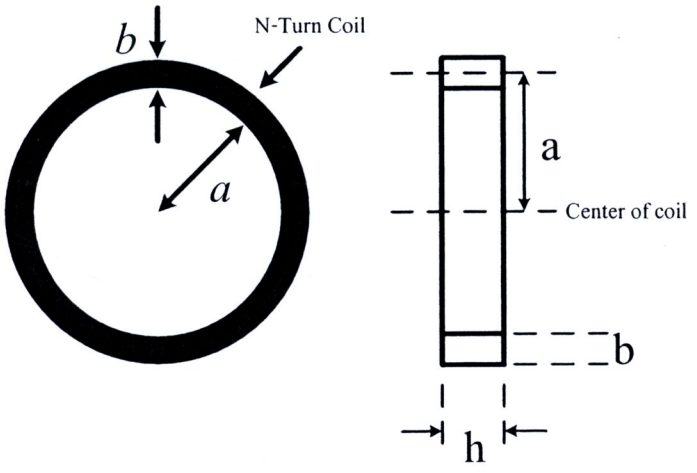
โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด มีหน่วยเป็น μH

a = รัศมีเฉลี่ยของขดลวด มีหน่วยเป็น cm

N = จำนวนรอบ

b = ความหนาในการขด มีหน่วยเป็น cm

h = ความสูงในการขด มีหน่วยเป็น cm



รูปที่ 2.25 สายอากาศขดลวดบ่วงวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใด ๆ [3]

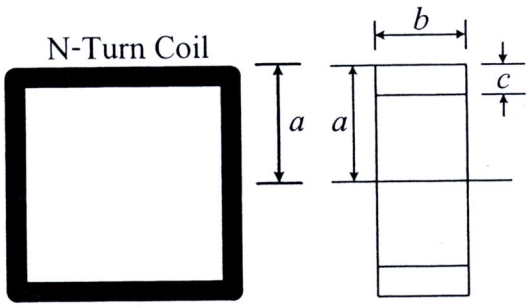
จำนวนรอบที่ต้องการสำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่แน่นอน สามารถคำนวณได้จากการประยุกต์สมการที่ 2.16 ซึ่งจะได้สมการดังนี้

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

2.6.3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ถ้า N คือจำนวนรอบและ a เป็นความยาวที่วัดจากจุดศูนย์กลางของสี่เหลี่ยมถึงขอบด้านนอกของบ่วง ส่วนด้านข้างของบ่วงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว b และความหนา c ดังแสดงในรูปที่ 2.22

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



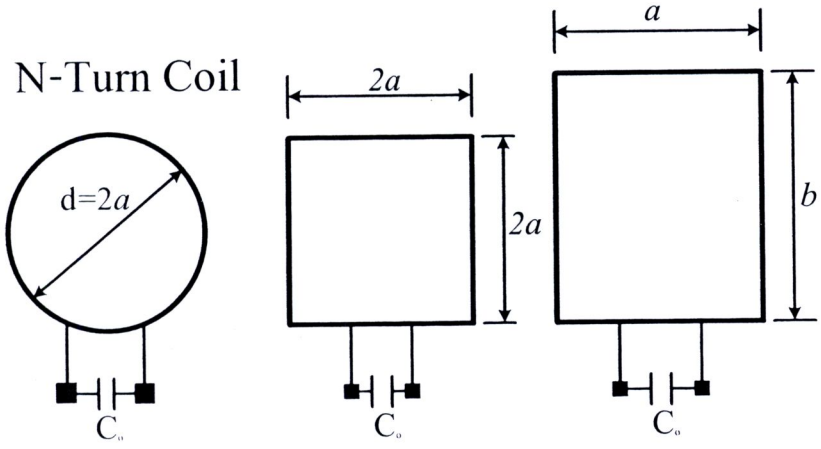
(ก) รูปด้านหน้า (ข) รูปด้านข้าง

รูปที่ 2.26 สายอากาศขดลวดแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลายชั้น [3]

2.7 รูปแบบของสายอากาศขดลวด

2.7.1 สายอากาศขดลวดของแท็ก

สายอากาศขดลวดสำหรับแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถทำได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการประยุกต์การใช้งาน ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศของแท็กที่ทำงานในย่านความถี่สูง เช่นแบบ Smart label หรือ Smartcard มีรูปแบบสายอากาศเป็นสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดแตกต่างกันไปตามการใช้งาน รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะต่างๆ ของสายอากาศแท็ก สายอากาศขดลวดโดยทั่วไปมักทำด้วยลวดเส้นเล็ก ๆ ค่าความเหนี่ยวนำและจำนวนรอบของขดลวดสามารถคำนวณได้จากสมการดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.27 รูปแบบต่าง ๆ ของสายอากาศขดลวดของแท็ก [3]

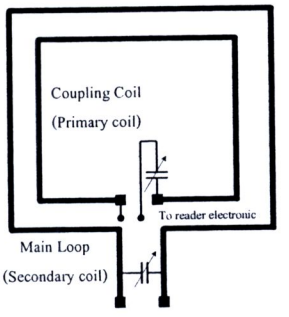
2.7.2 สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูล

ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวดเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยๆเนื่องจากความจำกัดของค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการแมชชิ่ง ให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูง สายอากาศขดลวดเครื่องอ่านข้อมูลจึงควรมีค่าความเหนี่ยวนำไม่เกิน 5 μH จะใช้ค่าความจุประมาณ 27 *pF* ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่สูงซึ่งเป็นค่าเก็บประจุที่สามารถหาได้ง่าย สายอากาศขดลวดเครื่องอ่านข้อมูลสามารถที่จะทำเป็นบ่วงเดียวตามรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม หรือ บ่วงคู่ (Transformer) ตามรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

ในรูปแบบวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมผลที่ได้จะให้ค่าความต้านทานที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่ามาก ส่วนในวงจรเรโซแนนซ์ขนานจะให้ผลของค่าความต้านทานสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นจะทำให้กระแสมีค่าน้อย เนื่องจากแรงดันสามารถเพิ่มระดับขึ้นได้โดยการใช้รูปแบบบ่วงคู่ขนาน วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมักจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการสัญญาณที่มีแรงดันสูง รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของสายอากาศบ่วงหม้อแปลง (Transformer loop) ที่บ่วงหลักเป็นรูปแบบของรอบโครงสร้างขนาดใหญ่ของลวด โดยจูนค่าที่ตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (13.56MHz) บ่วงอื่นจะเรียกว่าบ่วงเชื่อมต่อและจะมีรูปแบบที่เล็กกว่า 2-3 รอบของขดลวด ตำแหน่งของบ่วงเชื่อมต่อจะวางอยู่ภายในบ่วงหลัก

บ่วงเชื่อมต่อจะทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุต/เอาต์พุตของเครื่องอ่าน การเชื่อมต่อขดลวดที่จุดอินพุต/เอาต์พุตในตัวอ่าน ที่บ่วงหลักจะต้องทำการจูนให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์และไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน

บ่วงเชื่อมต่อโดยทั่วไปจะไม่ได้ทำการจูน แต่ในการออกแบบจะทำการจูนที่ตัวเก็บประจุ C_2 ที่ต่ออนุกรมอยู่กับบ่วงเชื่อมต่อ เพราะว่าจำนวนรอบที่บ่วงหลักมากกว่าบ่วงเชื่อมต่อ 2-3รอบ ทำให้ที่บ่วงเชื่อมต่อมีค่าความเหนี่ยวนำน้อย เป็นผลให้ต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุมีค่ามาก



รูปที่ 2.28 สายอากาศบ่วงหม้อแปลงของเครื่องอ่านข้อมูล [3]

2.8 วงจรเรโซแนนซ์ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) และแบนด์วิดธ์

ในการประยุกต์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สายอากาศขดลวดเป็นส่วนสำคัญของวงจรเรโซแนนซ์และระยะในการอ่านของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการทำงานของวงจรเรโซแนนซ์อย่างมาก

รูปที่ 2.25 และ 2.26 แสดงตัวอย่างรูปแบบของวงจรเรโซแนนซ์ ของสายอากาศขดลวดและการจูนตัวเก็บประจุ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) สามารถคำนวณได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.21}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด

C = ค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้จูน

วงจรเรโซแนนซ์สามารถที่จะมีรูปแบบเป็นแบบอนุกรม หรือ แบบขนาน วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่เรโซแนนซ์ ผลลัพธ์คือจะมีกระแสที่ใช้ในวงจรมาก โดยทั่วไปจะใช้วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสำหรับสายอากาศของเครื่องอ่านส่วนวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งค่ากระแสที่ได้จะมีค่าต่ำและแรงดันจะมีค่าสูงที่ความถี่เรโซแนนซ์ วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับสายอากาศของแท็ก

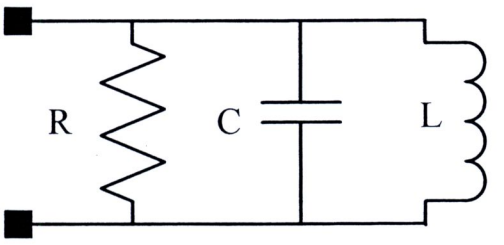
2.8.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจรสามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ ω = ความถี่เชิงมุม $= 2\pi f$

R = ความต้านทานโหลด



รูปที่ 2.29 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [3]

ในที่นี้ไม่สนใจค่าความต้านทาน (r) ของขดลวด ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากเมื่อตัวส่วนในสมการ(2.20) มีค่ามาก และค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าน้อยเมื่อ

$$\omega^2 LC = 1 \tag{2.23}$$

เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์และความถี่เรโซแนนซ์หาได้จาก

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.24}$$

ทำการแทนสมการที่ 2.21 ลงในสมการที่ 2.20 ค่าความต้านทานที่ความถี่เรโซแนนซ์จะกลายเป็น

$$Z = R \tag{2.25}$$

ค่า R และ C ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน สามารถนำมาคำนวณแบนด์วิดธ์ B ของวงจรได้ดังสมการ

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2.26}$$

ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = \frac{f_0}{B} \tag{2.27}$$

โดยที่ f_0 = ความถี่เรโซแนนซ์

B = แบนด์วิดธ์

แทนสมการที่ 2.24 และ สมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.28 ตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะได้ดังสมการ

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}} \tag{2.28}$$

ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน และค่ารากที่สองอัตราส่วนระหว่างค่าความจุกับค่าความเหนี่ยวนำในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะใช้สำหรับวงจรสายอากาศของแท็ก แรงดันที่ตกคร่อมในวงจรสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และ สมการที่ 2.28 ดังนี้

$$V_0 = 2\pi f_0 N\left(R\sqrt{\frac{C}{L}}\right)SB_0\cos\alpha \tag{2.29}$$

สมการข้างต้นแสดงถึงการเหนี่ยวนำแรงดันในขดลวดแท็กเป็นส่วนกลับของรากที่สองของค่าความเหนี่ยวนำ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบและพื้นผิวของขดลวด

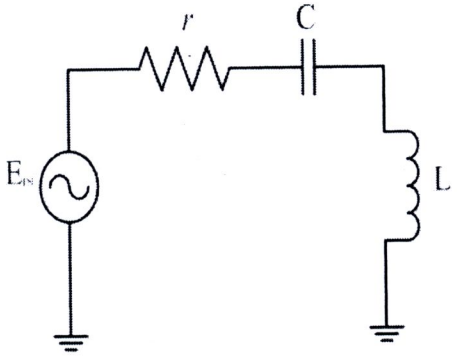
วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานสามารถใช้ในสายอากาศแบบบ่วงหม้อแปลง สำหรับเครื่องอ่านที่ระยะทางไกล ๆ อธิบายได้ในสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่าน (รูปที่ 2.24) แรงดันในบ่วงทุติยภูมิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนของจำนวนรอบ (n_2 / n_1) ของบ่วงหม้อแปลง แม้ว่าสัญญาณมีแรงดันสูงก็ตามไม่สามารถที่จะรับสัญญาณได้ สาเหตุที่แยกสายอากาศเพื่อต้องการสำหรับการรับสัญญาณ วงจรสายอากาศรับควรจะจูนสัญญาณที่ทำการมอดูเลตของแท็ก

2.8.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมอย่างง่ายแสดงดังในรูปที่ 2.26 สมการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรคือ

$$Z(j\omega) = r + j(X_L - X_C) \tag{2.30}$$

โดยที่ r = ความต้านทานของวงจร



รูปที่ 2.30 วงจรเรโซแนนซ์อนุกรม [3]

$$X_L = 2\pi f_0 L \tag{2.31}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_0 C} \tag{2.32}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.30 จะมีค่าลดลงเมื่อองค์ประกอบค่ารีแอกแตนซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน ($X_L = X_C$) เรียกว่าสภาวะเรโซแนนซ์ ความถี่เรโซแนนซ์จะเหมือนกับความถี่เรโซแนนซ์ ของวงจรขนานตามสมการที่ 2.24

แบนด์วิดธ์ครึ่งกำลังจะถูกกำหนดโดยค่า r และ L ดังสมการ

$$B = \frac{r}{2\pi L} \tag{2.33}$$

ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) ในวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q = \frac{f_0}{B} = \begin{cases} \dfrac{\omega L}{r} = \dfrac{1}{\omega C r} \\ \dfrac{1}{r}\sqrt{\dfrac{L}{C}} \end{cases} \tag{2.34}$$

วงจรอนุกรมเป็นรูปแบบการแบ่งแรงดันเพราะฉะนั้นแรงดันที่ตกคร่อมในขดลวดจะคำนวณได้จากสมการ

$$V_0 = \frac{jX_L}{r + jX_L - jX_C} V_{in} \tag{2.35}$$

หรือ

$$\left|\frac{V_0}{V_{in}}\right| = \frac{X_L}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{X_L}{r\sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r}\right)^2}} = \frac{Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_L - X_C}{r}\right)^2}} \tag{2.36}$$

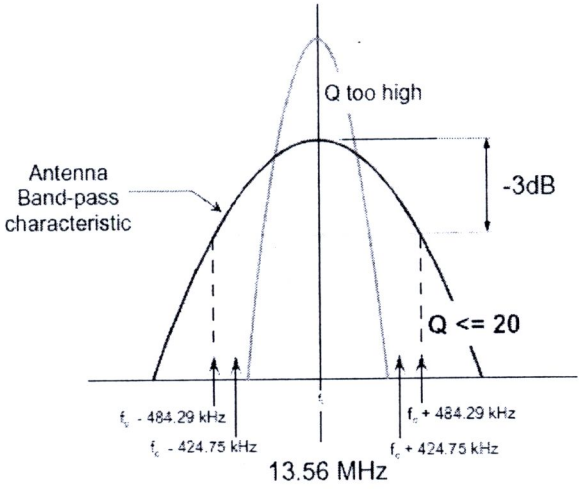
2.8.3 ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพและแบนด์วิดธ์

ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพนิยามขึ้นเพื่อแสดงถึงคุณสมบัติของสายอากาศในเชิงความสามารถในการเลือกความถี่หรือ ซีเล็กติวิตี้ (Selectivity) และการสูญเสียกำลังงานของสายอากาศโดยทั่วไปแล้วค่าประกอบเชิงคุณภาพที่สูงจะให้ค่ากำลังงานที่ออกมาสูง สำหรับสายอากาศทีมีการระบุขนาดที่แน่นอน แต่ว่าค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพที่มากขึ้นจะทำให้คุณลักษณะของการจำกัดความถี่ลดลงและถ้าจำนวนบ่วงมากขึ้นก็จะสร้างปัญหาให้กับ Protocol timing bit สำหรับเหตุผลต่างๆเหล่านี้ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศใช้งานกับอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ควรเลือกค่าประสิทธิภาพที่ไม่เกิน 20 ในการใช้งานย่านความถี่สูง

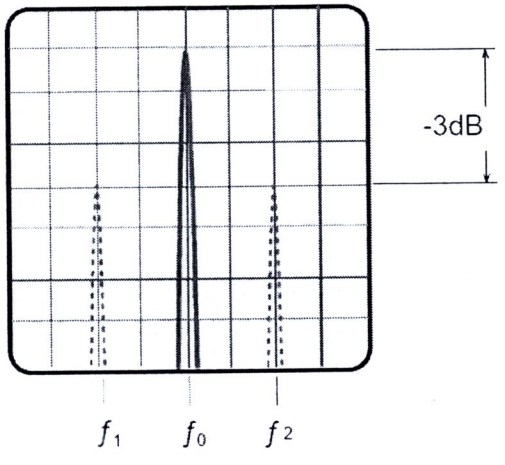
การวัดค่าค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของสายอากาศในขณะที่มีโหลด สามารถทำการวัดได้โดยง่ายถ้าใช้เครื่องมือวัดที่มีความสามารถให้กำเนิดความถี่ระหว่าง 13 MHz-14 MHz จากรูปที่ 2.28 เป็นการวัดค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพโดยใช้สเปคตรัมอนาไลเซอร์ เนื่องจากค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดธ์ และแบนด์วิดธ์จะนิยามจากช่วงความถี่แถบข้าง (f_1, f_2) ที่มีกำลังงานต่ำกว่าที่ ณ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) เท่ากับ 3dB จะสามารถหาค่าแบนด์วิดธ์กับค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพจากค่าที่ได้จากการวัดโดยนำมาคำนวณได้ตามสมการที่ 2.37 และ 2.38 ตามลำดับ

$$B = f_2 - f_1 \tag{2.37}$$

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \tag{2.38}$$



รูปที่ 2.31 ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ



รูปที่ 2.32 การหาค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพจากแบนด์วิดธ์

2.8.3.1 ข้อจำกัดของค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ

เมื่อทำการออกแบบวงจรสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล อาจจะหลงคิดว่าการออกแบบขดลวดจะต้องมีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพสูง ในที่นี้มีสามประการที่สำคัญที่เป็นข้อจำกัดของวิธีนี้

ก) แรงดันที่สูงมากสามารถทำให้ฉนวนเบรกดาวน์เช่น ที่ขดลวดหรือตัวเก็บประจุที่เรโซแนนซ์ ยกตัวอย่าง กระแส 1 A ที่ไหลในขดลวด 2 mH จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวด 1500 Vpp ในกรณีของการออกแบบขดลวดเพียงบ่วง

เดียวของตัวอ่าน การกู้สัญญาณที่ได้รับจากแท็กจะต้องทำในขณะที่แรงดันที่มีค่าสูง

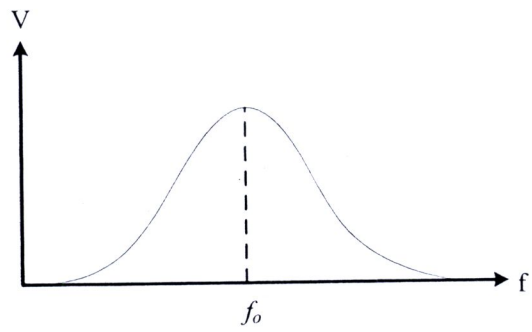
ข) การจูนที่เหมาะในช่วงวิกฤต อุปกรณ์ที่ใช้วัดวงจรสายอากาศที่มีค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพสูง, แรงดันสูงจะมีส่วนประกอบของค่าความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมได้และ มีความเสถียรภาพสูงน่าจะมีใช้ แต่โดยทั่วไปจะมีราคาแพงและยากที่จะมีใช้โดยทั่วไป

ค) ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของวงจรที่ได้รับมีค่าสูง ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ย้อนกลับมาจะสัมพันธ์กับกำลังของคลื่นพาห์ที่ได้รับ ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจากแท็กจะมีค่าน้อย วงจรของเครื่องอ่านอาจเกิดความสับสนได้ในการกู้สัญญาณ

2.8.3.2 วิธีการจูน

วงจรจะต้องจูนที่ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับค่ามากที่สุดที่แสดง (ระยะการอ่าน) ของอุปกรณ์ มีอยู่สองตัวอย่างของการจูนของวงจรมีดังนี้

1. วิธีการวัดค่าแรงดัน
   ก) ทำการปรับค่าแรงดันที่ต้นกำเนิดของสัญญาณที่ความถี่เรโซแนนซ์ (13.56 MHz)
   ข) ต่อแรงดันที่ได้จากต้นกำเนิดของสัญญาณคร่อมวงจรเรโซแนนซ์
   ค) ต่อออสซิลโลสโคปคร่อมวงจรเรโซแนนซ์
   ง) จูนตัวเก็บประจุหรือขดลวดขณะที่สังเกตแอมพลิจูดของสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป
   จ) หยุดการจูนเมื่อได้ค่าแรงดันสูงสุด



รูปที่ 2.33 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3]

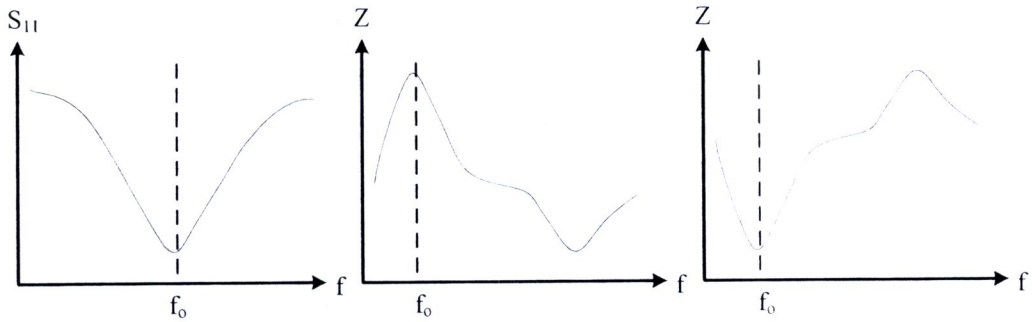
2. เอส-พารามิเตอร์หรือวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer)

   ก) ทำการปรับค่าเอส-พารามิเตอร์ ทดสอบการปรับค่า (Network Analyzer) สำหรับการวัด S_{11} และปรับให้อยู่ในตำแหน่งมาตรฐาน

   ข) วัดค่า S_{11} สำหรับวงจรเรโซแนนซ์

   ค) อิมพีแดนซ์ที่สะท้อนหรือแอดมิตแตนซ์ที่สะท้อนสามารถวัดแทนค่า S_{11} ได้

   ง) จูนตัวเก็บประจุหรือขดลวดจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุด หรือมีค่าเป็นศูนย์ (S_{11}) ที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_o สำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ค่ายอดที่มีค่ามากที่สุดจะเกิดขึ้นสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและค่าพีคน้อยที่สุดสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.34 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3](ก) แสดงผลตอบสนองของ S_{11}
(ข) แสดงผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและ
(ค) แสดงผลตอบสนองของค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

ในรูปที่ 2.29 (ก) จะไม่มีค่าที่ความถี่เรโซแนนซ์แสดงถึงการส่งกลับอินพุตที่มีค่าน้อยที่ความถี่เรโซแนนซ์ วิธีนี้วงจรจะดูดกลืนสัญญาณที่ความถี่ขณะที่ความถี่อื่น ๆ สะท้อนกลับมา ในรูป ที่ 2.29 (ข) ความโค้งที่ค่าอิมพีแดนซ์จะมีพีคที่ความถี่เรโซแนนซ์ ในที่นี้เพราะว่าวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานมีค่าอิมพีแดนซ์มากที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ส่วนในรูปที่ 2.29 (ค) แสดงผลตอบสนองสำหรับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีค่าอิมพีแดนซ์น้อยที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และยอดที่มีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์

2.9 ระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระยะการอ่านเป็นคำจำกัดความของค่าที่มากที่สุด ในระยะที่ใช้สื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก ระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดพาสซีฟจะอยู่ในช่วง 1 นิ้วถึง 1 เมตร จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ ระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุโดยทั่วไปจะมีผลกระทบมาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

ก) ความถี่ที่ใช้และการทำงานของขดลวดสายอากาศ

ข) ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพของสายอากาศการจูนวงจร

ค) การปรับทิศทางของสายอากาศ

ง) ค่ากระแสและแรงดัน

จ) ความไวของการรับสัญญาณ

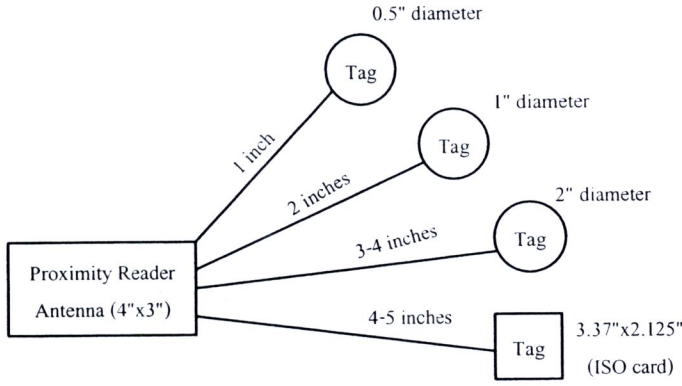
ฉ) การเข้ารหัส (หรือการมอดูเลต) และการถอดรหัส (หรือการดีมอดูเลต)

ช) จำนวนของบิตข้อมูล

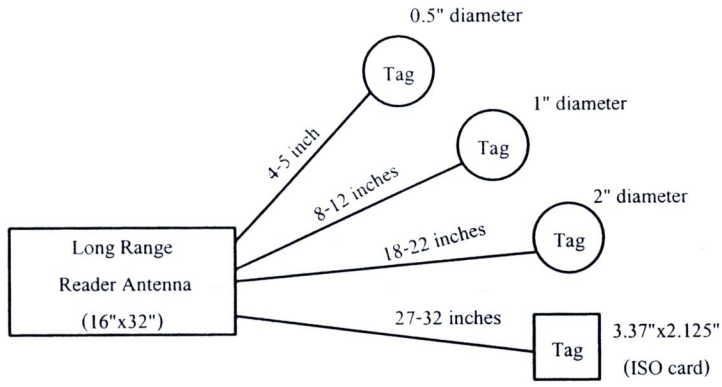
ซ) สภาพของสิ่งแวดล้อม (โลหะ, สัญญาณรบกวนจากเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์) อื่นๆ

ความถี่ที่ใช้จะเป็นข้อจำกัดที่กล่าวมาแล้ว (ก-ค) จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศและการจูนวงจร ข้อจำกัด (ง-จ) จะกำหนดโดยเทคโนโลยีของวงจรของเครื่องอ่านข้อจำกัด (ฉ) คือโปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของอุปกรณ์ และ (ช) แสดงความสัมพันธ์ของโปรแกรม Firm Ware สำหรับการแปลความหมายของข้อมูล

ขนาดของสายอากาศจะมีผลต่อระยะการอ่านข้อมูลซึ่งสายอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะทำให้ระยะการอ่านมากขึ้นด้วย รูปที่ 2.30 และ 2.31 แสดงตัวอย่างของระยะการอ่านของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุชนิดพาสซีฟแบบต่างๆ



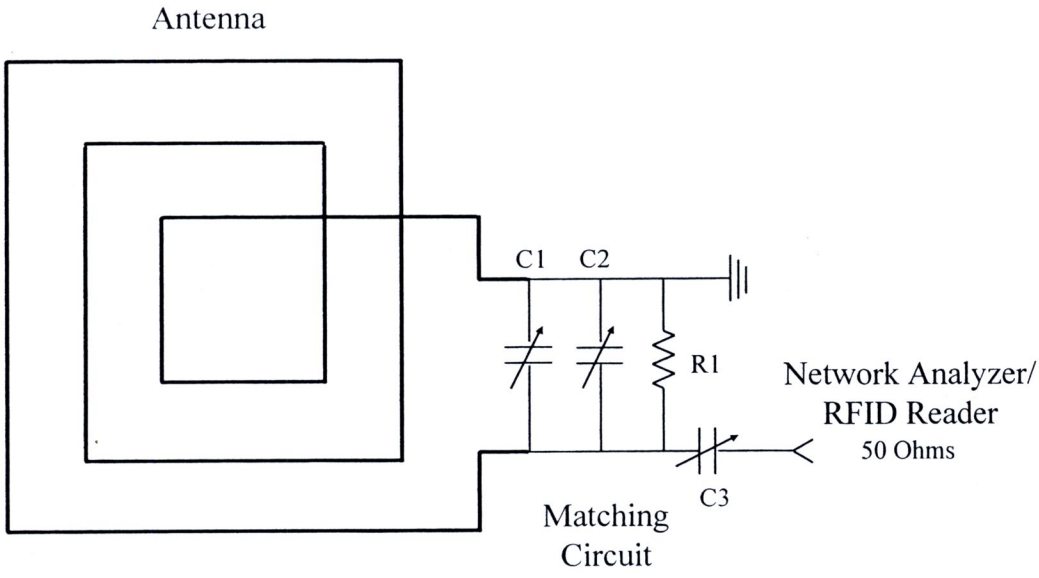
รูปที่ 2.35 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ [3]



รูปที่ 2.36 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล [3]

2.10 หลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตชิ่งสำหรับสายอากาศบ่วงเกลียว [8]

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอหลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตชิ่งเพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลสามารถส่งผ่านกำลังงานเข้าสายอากาศได้มากที่สุด ด้วยการทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็น50 โอห์ม ซึ่งวงจรแมตชิ่งที่นำเสนอนี้เรียกว่า Tree element match โดยมีโครงสร้างของวงจรที่ไม่ซับซ้อนและออกแบบง่าย ส่วนของวงจรจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพียงสองชนิดคือ ตัวเก็บประจุที่สามารถปรับค่าได้ (C) และตัวต้านทาน (R) ซึ่งค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมจะอธิบายการคำนวณอย่างละเอียดในหัวข้อการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 2.10.2 รูปที่ 2.33 แสดงการนำวงจรแมตชิ่งมาต่อเข้ากับสายอากาศ



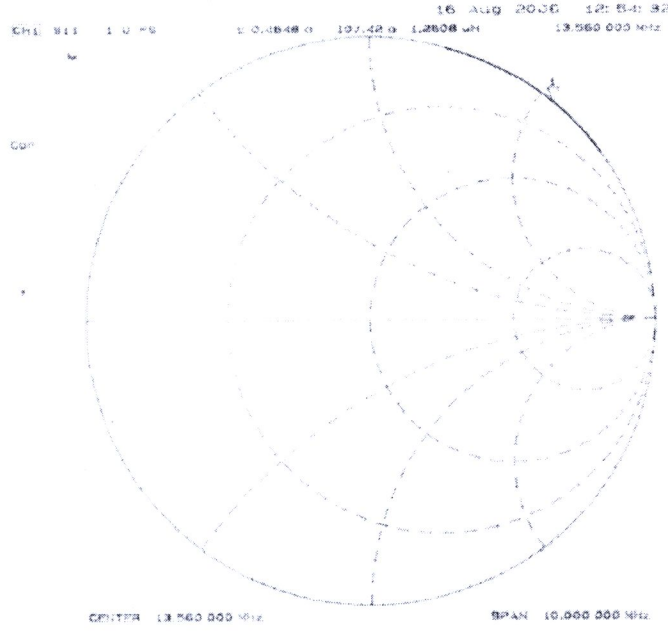
รูปที่ 2.37 การนำวงจรแมตชิ่งมาต่อเข้ากับสายอากาศ

2.10.1 การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ

ขั้นตอนแรกในการแมตสายอากาศคือการปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งในการปรับเทียบนั้นจะมีสามขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนแรกต่อด้วยโหลด (Load) 50 โอห์ม ขั้นตอนที่สองคือลัดวงจร (Short) ด้วยความต้านทาน 0 โอห์ม และขั้นตอนที่สามคือเปิดวงจร (Open) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อทดสอบกับระบบ RF ทั่วไป เมื่อทำปรับเทียบเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแล้วก็จะนำสายอากาศมาเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยขั้นตอนนี้จะยังไม่มีส่วนของวงจรแมตชิ่งเข้ามาเกี่ยวข้องเพราะว่าจะต้องดูคุณสมบัติของสายอากาศก่อนว่ามีคุณสมบัติเป็น L หรือเป็น C ซึ่งดูได้จาก Smith chart โดยหลักการของวงจรนี้ถ้าหากสายอากาศมีคุณสมบัติเป็น C จะต้องนำ L หรือขดลวดมาต่ออนุกรมในวงจรเพื่อทำให้สายอากาศมีคุณสมบัติเป็น L ก่อน เมื่อสายอากาศมีคุณสมบัติเป็น L แล้ว ก็จะเป็นขั้นตอนของการนำวงจรแมตชิ่งเข้ามาเชื่อมต่อกับสายอากาศเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ 50 โอห์มหรือใกล้เคียงมากที่สุด รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.10.2 การปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยวงจรแมตชิ่ง

ในขั้นตอนนี้จะนำวงจรแมตชิ่งมาเชื่อมต่อกับสายอากาศและนำไปต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อดูค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ รูปที่ 2.34 แสดงตัวอย่างวัดค่าอิมพีแดนซ์และดูคุณสมบัติของสายอากาศจากจาก Smith chart



รูปที่ 2.38 คุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith chart

จากรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $(0.4648\Omega + j107.42)$ และมีคุณสมบัติเป็น L โดยมีค่า L เท่ากับ 1.2608 μH ที่ความถี่ 13.56 MHz จาก Smith chart จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังอยู่วงกลมด้านนอกซึ่งไม่ใช่วงกลม 50 โอห์ม ดังนั้นจะต้องมาสนใจที่วงจรแมตชิ่ง โดยขั้นตอนแรกจะต้องคำนวณหาค่า R1 ที่เหมาะสมให้ได้ก่อนซึ่งในการคำนวณหาค่า R1 นั้นจะต้องหาค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) ออกมาก่อน

$$Q = \frac{F_0}{BW} \tag{2.38}$$

$$Q = \frac{13.56\text{MHz}}{2\text{MHz}} = 6.78$$

ในที่นี้จะกำหนดให้แบนด์วิดธ์ของสายอากาศเท่ากับ 2MHz ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับ RFID ย่านความถี่สูง ที่กำหนดใน ISO15693 และ ISO14443/B ดังนั้นการคำนวณหาค่า R1 สามรถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

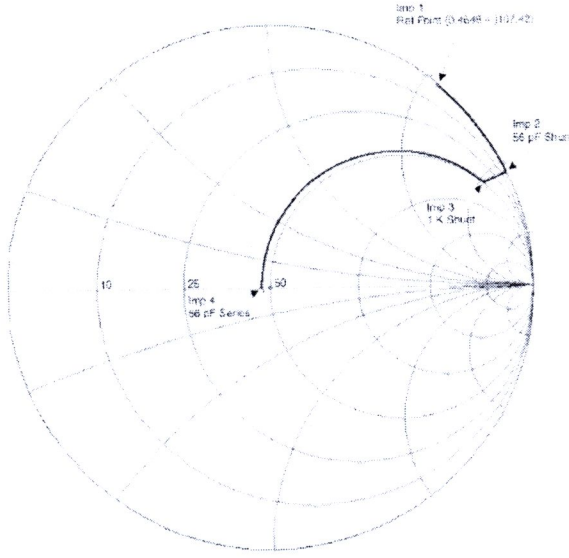
$$Q = \frac{R_P}{X_L} \tag{2.39}$$

$$Q = \frac{R}{(2\pi)(13.56\text{MHz})(1.2608\mu\text{H})} = \frac{R}{107.42}$$

โดยที่ค่า X_L สามารถนำค่าจาก Smith chart มาใช้ได้เลย ดังนั้นจาก Smith chart จะได้ค่า X_L เท่ากับ 107.42 โอห์ม เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า R_P ได้

$$R_P = \frac{Q}{X_L} \tag{2.40}$$

$$R_P = \frac{6.78}{107.02} = 728\Omega$$



รูปที่ 2.39 การจำลองการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith chart

การวัดค่าอิมพีแดนซ์จากรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.35 จะเห็นค่าค่าอิมพีแดนซ์ที่หนึ่งจะอยู่ที่วงนอกสุด การที่จะทำให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศขยับเข้ามาใกล้วงกลม 50 โอห์มคือการนำ C1 และ C2 มาต่อขนานกันจากนั้นให้ทำการปรับจูน จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขยับลงมาอยู่ที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่สอง ต่อไปให้นำ R1 มาต่อขนานไปที่ C1 และ C2 ค่าอิมพีแดนซ์ก็จะขยับลงมาอยู่ที่ค่าอิมพีแดนซ์สาม ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำ C3 มาต่ออนุกรมเข้าไปแล้วทำการปรับจูนก็จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอยู่ที่วงกลม 50 โอห์มพอดี ก็คือจะได้สายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงหรือเท่ากับ 50 โอห์มนั่นเอง ข้อเสนอแนะในการเลือกค่า C1, C2 และ C3 ควรจะเป็น C ปรับค่าที่มีช่วงกว้างๆ เนื่องจากว่าจำเป็นต้องมีการปรับจูน ส่วนค่า R1 ก็จะได้จากการคำนวณหรือ R_P นั่นเอง

2.11 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบ RFID ย่านความถี่สูงไม่ว่าจะเป็นลักษณะและประเภทของแท็ก การทำงานของเครื่องอ่าน ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ การสื่อสารแบบ Inductive coupling ระยะในการติดต่อสื่อสารของระบบ RFID ในย่านความถี่สูง วงจรจูนเพื่อให้เครื่องอ่านข้อมูลส่งผ่านกำลังงานเข้าสายอากาศสูงสุด นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศขดลวดที่นิยมใช้กันทั่วไป เพื่อจะเป็นความรู้พื้นฐานในการนำไปทำการออกแบบสายอากาศของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงต่อไป