

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

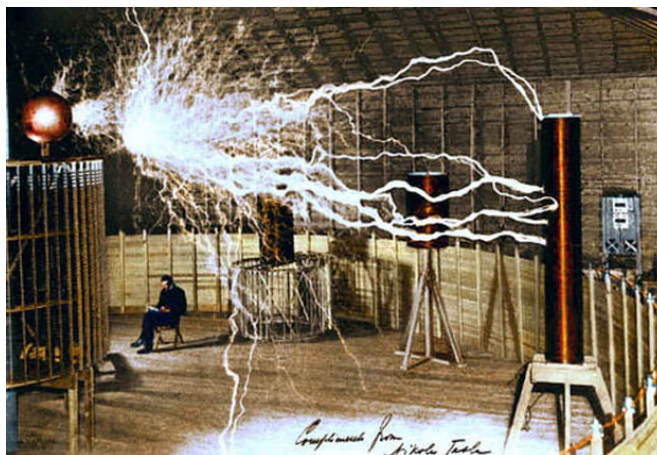
ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาทฤษฎีและหลักการของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transmission : WPT) โดยจะเริ่มจากทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย ความเป็นมาของระบบ ชนิดการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย หลักการและทฤษฎีของระบบ WLAN และ WIMAX ความถี่ 2.4 GHz ที่จะนำมาใช้กับระบบ รวมถึงทฤษฎีสายอากาศแบบ ไดโพล วงจรเรียงกระแส และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนสำหรับ ระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

2.2 ทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

การส่งผ่านกำลังงานไร้สายคือ การใช้พลังงานไฟฟ้ามาแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ซึ่งไม่อาศัยตัวนำในการเดินทางที่เป็นตัวส่ง จากนั้นส่งกำลังงานไปยังตัวรับ และตัวรับก็มีหน้าที่แปลงพลังงานนั้นกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้ง

2.2.1 ความเป็นมาของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

การส่งผ่านกำลังงานไร้สายมาจากแนวคิดและการทดสอบของนิโคลาส เทสลา (Nicola Tesla) การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1899 ที่บริษัท โคโลราโด สปริง อิเล็กทริก (Colorado Springs Electric Company) [8] การทดสอบดังกล่าวประกอบด้วย ขดลวดขนาดใหญ่ (Gigantic Coil) ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60 m × 60 m โดยขดลวดนี้สามารถให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับ 150 kHz และมีกำลังงานมากถึง 300 kW ในส่วนของด้านบนขดลวดสี่เหลี่ยมได้ทำการติดตั้งแท่งเสาโลหะ โดยยอดดอยเสาโลหะจะถูกติดตั้งลูกบอลทองแดงขนาดใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 m ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายของเทสลา พบว่าเมื่อทำการปล่อยกำลังงานออกจากลูกบอลทองแดง จะมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 100 MV อยู่รอบๆ ชั้นอากาศ ดังรูปที่ 2.1

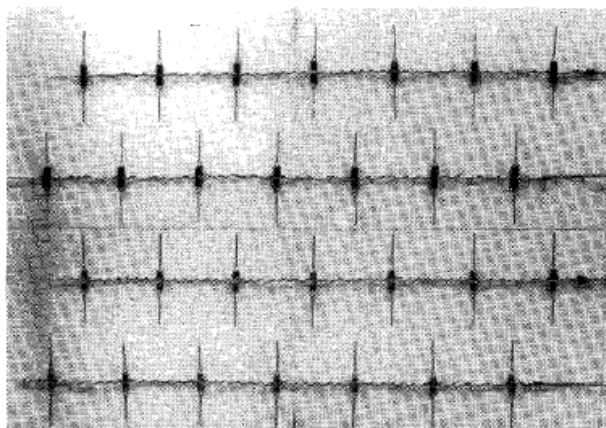


รูปที่ 2.1 การทดสอบการส่งผ่านกำลังงานไร้สายของเทสลา [8]

นอกจากนี้เทสลาได้ประสบความสำเร็จกับการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย โดยได้อาศัยบอลลูนในการรับและส่งกำลังงานไฟฟ้า ซึ่งบอลลูนจะถูกลอยอยู่บนชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Layer) โดยมีระยะห่างระหว่างบอลลูนทั้งสองเป็นระยะทางเท่ากับ 42 km จากการทดสอบดังกล่าวพบว่าสามารถทำให้หลอดไฟติดมากกว่า 200 ดวง โดยแต่ละดวงจะใช้กำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 50 W ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาการส่งผ่านกำลังงานไร้สายจึงกลายเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ.1933 ถึง ค.ศ. 1934 นักวิจัยชื่อ เฮท. วี. โนเบิล (H.V. Noble) ได้อาศัยแนวคิดและทฤษฎีของเทสลานำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อต้องการให้การส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีประสิทธิภาพมากกว่าที่เทสลาเคยทำมาก่อนหน้านี้ โดยโนเบิลได้ทำการเปลี่ยนลูกบอลทองแดงที่มีหน้าที่ส่งกำลังงานมาเป็นสายอากาศไดโพลแทน โดยการส่งกำลังงานนี้ถูกส่งด้วยความถี่ 100 MHz ผลจากการทดสอบพบว่าการส่งกำลังงานไร้สายไปยังสายอากาศไดโพลด้านรับสามารถรับกำลังงานได้ถึง 100 W

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

ในปี ค.ศ. 1958 มีนักวิจัยได้ให้ความสนใจให้มีพัฒนาการส่งผ่านกำลังงานไร้สายและนำงานวิจัยดังกล่าวนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่ต่างแตกต่างกันออกไป เช่น ระบบดาวเทียมภาคพื้นดินพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar-Powered Satellite to Ground System : SPS) [9] และการใช้กำลังงานไร้สายขับเคลื่อนเครื่องบินเฮลิคอปเตอร์ (Helicopter Powering) เป็นต้น โดยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายทั้งหมดนี้จะถูกคำนึงถึงค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านในระบบด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.2 สายอากาศไดโพลชนิดลำดับของนักวิจัย อาร์.เฮท จอร์จ [10]

ในปี ค.ศ.1964 นักวิจัยชื่อ อาร์.เฮท จอร์จ (R.H. George) [10] ได้ทำการวิจัยการส่งผ่านกำลังงานไร้สายโดยใช้สายอากาศไดโพลชนิดแถวลำดับ (Array Antenna) จำนวน 28 ตัว ต่อเข้ากับไดโอดแบบสะพาน (Bridge Diodes) จำนวน 4 ตัว โดยไดโอดที่ใช้เบอร์ 1N82G ดังรูปที่ 2.2 ผลการทดสอบของการส่งผ่านกำลังงานไร้สายพบว่า ได้ทำการส่งกำลังงานออกไปเท่ากับ 40 W ที่ความถี่ 2-3 GHz สามารถรับกำลังงานได้เพียง 7 W เมื่อคิดประสิทธิภาพของการส่งผ่านเท่ากับ 40% โดยเป็นที่มาของสายอากาศจัดเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifying Circuit Integrated with Antenna : Rectenna)

2.2.3 ประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย

ประเภทของการส่งผ่านกำลังงานงานไร้สายสามารถแบ่งได้ตามประเภทของเทคโนโลยีในการส่ง เช่น ไร้สาย WiFi WLAN Microwaves รวมทั้ง คลื่นแสง ระยะในการรับส่ง และสายอากาศที่ใช้ในการรับ เช่น เส้นลวดหรือขดลวดในการรับสัญญาณความถี่ต่ำ ไปจนถึงใช้เลนส์ในการรวบรวมแสงได้ สามารถดูได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำแนกประเภทของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย [11 -15]

เทคโนโลยี	ระยะ	ค่าสภาพ เจาะจงทิศทาง	ความถี่	สายอากาศ	การประยุกต์ใช้งาน
Inductive coupling	Short	Low	Hz - MHz	Wire coils	Electric tooth brush
Resonant inductive coupling	Mid	Low	MHz - GHz	Tuned Wire coils Lumped element	Charging portable devices RFID Smartcards
Capacitive coupling	Short	Low	kHz - MHz	Electrodes	Smartcards Charging portable devices
Magneto dynamic	Short	N.A.	Hz	Rotating magnets	Charging Electric vehicles
Microwaves	Long	High	GHz	Parabolic dishes rectennas	Solar power satellite Powering drone aircraft
Light waves	Long	High	$\geq$ THz	Lasers photocells lenses	Powering drone aircraft

ดังนั้นจากตารางที่ 2.1 สามารถเห็นได้ว่าการส่งผ่านกำลังงานไร้สายมีหลายประเภท และมีการนำไปใช้งานที่หลากหลายมาก ทั้งนี้ทางผู้จัดทำรายงานเล่มนี้ จะทำการออกแบบสายอากาศและวงจรเรียงกระแสเป็นหลักเพื่อที่จะทำการเก็บเกี่ยวพลังงานได้ โดยผู้จัดทำจะทำการออกแบบเพื่อรองรับเทคโนโลยี WLAN ที่มีการทำงานในย่านความถี่ 2.40 GHz ถึง 2.50 GHz ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะขอกล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้ในเทคโนโลยี WLAN

2.3 มาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN

มาตรฐาน IEEE 802.11 หรือ WLAN ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ WLAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ WLAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของ PHY Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 Mbps 2 Mbps 5.5 Mbps 11 Mbps และ 54 Mbps โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz 5 GHz และ อินฟราเรด(1 และ 2 Mbps เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense

Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่าย LAN แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบผู้ใช้ ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วย

เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้นได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11e และ IEEE 802.11i [16]

2.3.1 มาตรฐานของเทคโนโลยี WLAN

- **IEEE 802.11b** ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น บลูทูธ โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 หรือ WLAN ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมักเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และ Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatability Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้
- **IEEE 802.11a** ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 GHz อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 GHz ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 m ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 m สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก
- **IEEE 802.11g** ได้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่

54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (Backward Compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด ตามแผนการแล้วมาตรฐาน IEEE 802.11g ได้รับการตีพิมพ์ประมาณช่วงกลางปี พ.ศ. 2546

- **IEEE 802.11e** ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ QoS สำหรับการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับมัลติมีเดีย เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้
- **IEEE 802.11i** ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีช่องโหว่อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูลด้วยคีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้ [16]

2.3.2 ประวัติลำดับของการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16

- กรกฎาคม 1999 IEEE 802.16 กลุ่มคณะทำงานได้กำเนิดขึ้นเพื่อพัฒนามาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ในการใช้ในระบบไร้สายย่านความถี่กว้าง โดยกลุ่มคณะทำงานอยู่ภายใต้องค์กร IEEE Standard Association (IEEE-SA) ประกอบไปด้วยนักวิจัยและพัฒนา จากหน่วยงานรัฐ บริษัทเอกชนจากทั่วโลก ร่วมกันพัฒนามาตรฐาน
- ธันวาคม 2001 มาตรฐานแรกของ IEEE 802.16 ได้ผ่านการรับรองซึ่งมีชื่อว่า IEEE 802.16-2001 ซึ่งเป็นการกำหนดมาตรฐาน สำหรับอุปกรณ์เครือข่ายและลูกข่ายติดตั้งอยู่กับที่ และทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 10 ถึง 66 GHz
- ในปี 2002 มาตรฐาน IEEE 802.16a ถูกพัฒนาขึ้นและได้รับการรับรองเพื่อเป็นมาตรฐานเสริมสำหรับ IEEE 802.16-2001 (ซึ่งเป็นตัวมาตรฐานหลัก) IEEE 802.16a กำหนดมาตรฐาน สำหรับอุปกรณ์เครือข่ายและลูกข่ายติดตั้งอยู่กับที่แต่ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 2 ถึง 11 GHz และในปีเดียวกันยังมีการพัฒนามาตรฐานย่อยหลายมาตรฐานตามมา ตัวอย่างเช่น
 - IEEE 802.16c กำหนด คุณสมบัติตั้งต้นของระบบ เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตอุปกรณ์สามารถนำไปกำหนดใช้ในผลิตภัณฑ์ของตัวเองหรืออีกนัยหนึ่งเป็นการกำหนดเพื่อให้อุปกรณ์จากต่างผู้ผลิตสามารถทำงานร่วมกันได้บนคุณสมบัติตั้งต้นอันเดียวกัน
 - IEEE 802.16.2 ซึ่งมีชื่อว่า วิธีปฏิบัติข้อเสนอแนะบน "Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems" ในความถี่ 10 GHz ถึง 66 GHz หมายถึง มาตรฐานนี้จะเป็นการกำหนดแนวทางและคำแนะนำในการออกแบบและ

ติดตั้งระบบสำหรับอุปกรณ์เครือข่ายและลูกข่ายติดตั้งอยู่กับที่เพื่อควบคุมสัญญาณรบกวนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ใช้กับระบบที่ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 10 GHz ถึง 66 GHz

- IEEE 802.16.2a ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติข้อเสนอแนะบน "Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems" ในความถี่ 2 GHz ถึง 11 GHz จะคล้ายคลึงกับ IEEE 802.16.2 แต่ต่างที่เป็นมาตรฐานสำหรับระบบที่ทำงานที่แถบคลื่นวิทยุ 2 ถึง 11 GHz
- ในปี 2005 มาตรฐาน IEEE 802.16e ซึ่งเป็นมาตรฐานเสริมให้กับมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 เพื่อรองรับอุปกรณ์ไร้สายย่านความถี่กว้าง ได้รับการรับรองเมื่อเดือนธันวาคม 2548 จึงมีชื่อเรียกมาตรฐานเป็นทางการว่า IEEE 802.16e-2005
- ส่วนประเด็นเรื่องมาตรฐานความปลอดภัยบนเครือข่าย IEEE 802.16 นั้น ได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 802.16-2004 แต่จากผลการศึกษาของจากหลายๆ สถาบัน ยังพบช่องโหว่ในมาตรฐาน ซึ่งทาง IEEE 802.16 กลุ่มคณะทำงานได้แก้ไขปรับปรุงและบรรจุอยู่ใน IEEE 802.16-2004 ฉบับแก้ไขหรือที่เรียกว่า IEEE 802.16-2004/Corrigendum1 และบางส่วนถูกเพิ่มเติมอยู่ใน IEEE 802.16e-2005

2.4 หลักการและทฤษฎีสายอากาศไดโพล

สำหรับสายอากาศเส้นลวดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้งถือว่าเป็นสายอากาศที่มีความเก่าแก่ที่สุด เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวง่ายต่อการออกแบบและมีราคาถูก จึงนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในอดีตสายอากาศเส้นลวดดังกล่าวถูกนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นสายอากาศไดโพล ซึ่งสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศที่นิยมนำมาใช้เป็นสายอากาศต้นแบบให้กับสายอากาศประเภทอื่นๆ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของสายอากาศไดโพลรวมถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

และสายอากาศไดโพลได้มีการจำแนกอยู่หลายประเภทตามขนาดความยาวคลื่นเช่น

- ไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal dipole) คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวของสายอากาศที่น้อยกว่า $\lambda/50$
- ไดโพลเล็ก (Small dipole) คือ สายอากาศไดโพลที่มีความยาวที่มากกว่า $\lambda/50$ แต่ไม่เกิน $\lambda/10$
- ไดโพลยาวจำกัด (Finite length dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวไม่น้อยกว่า $\lambda/10$
- ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (Half-wavelength dipole) คือ สายอากาศที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความคลื่น ($\lambda/2$) ซึ่งเป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการออกแบบของสายอากาศไดโพลทั้งหมด

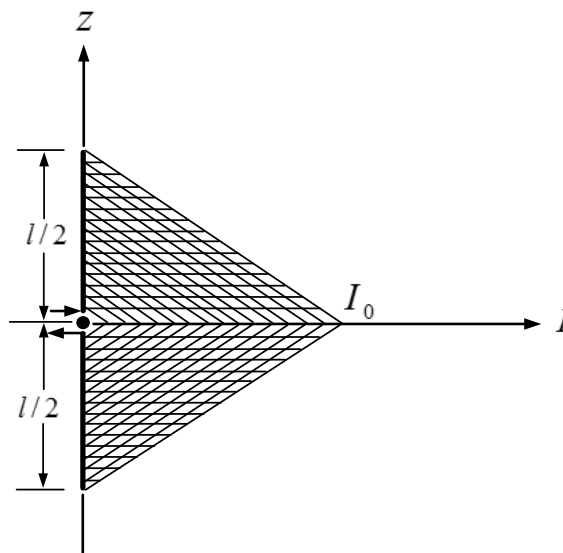
2.4.1 ไดโพลขนาดจิ๋ว [17]

ไดโพลขนาดจิ๋ว (Infinitesimal linear dipole) หรือสายอากาศไดโพลที่มีความยาวน้อยกว่าความยาวของคลื่นมากๆ $l \ll \lambda$ โดยสายอากาศวางตัวตามแนวแกน z และสมมาตรที่จุดกำเนิด ถึงแม้ว่าไดโพลจิ๋วจะไม่ถูกนำไปใช้ในทางปฏิบัติแต่จะถูกใช้แสดงในรูปของสายอากาศแผ่นตัวเก็บประจุ (Capacitor-plate) หรือบางที่เรียกว่า สายอากาศที่มีโหลดอยู่ด้านบน (Top-hat-loaded) โดยแผ่นที่ปลายทั้งสองถูกใช้ทำเป็นโหลดเก็บประจุเพื่อที่จะทำให้กระแสในไดโพลมีค่าสม่ำเสมอเนื่องจากสมมติให้ขนาดของแผ่นที่ปลายทั้งสองมีขนาดเล็กและไม่คำนึงถึงการแผ่พลังงานของแผ่นทั้งสอง ดังนั้นเส้นลวดจิ๋วที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีความยาวสั้นมากๆ $l \ll \lambda$ และพอมมากๆ ($a \ll \lambda$ -รัศมีเส้นลวดเล็กมากๆ) การเปลี่ยนแปลงกระแสตามเส้นลวดจึงสมมติให้มีค่าคงที่

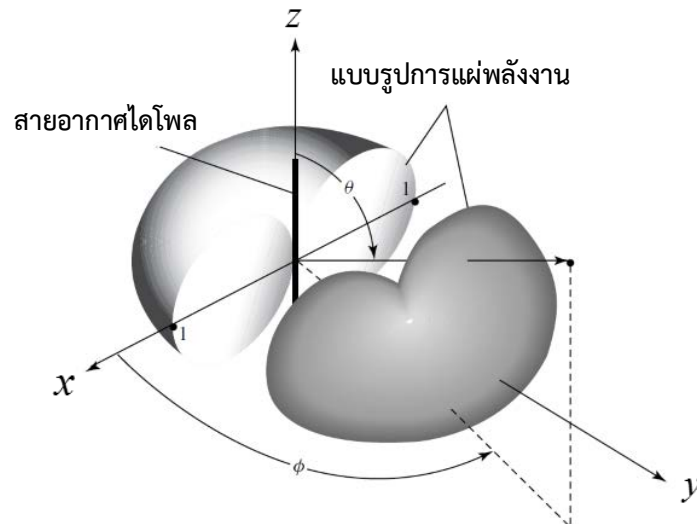
2.4.2 ไดโพลขนาดเล็ก

คุณสมบัติการแผ่พลังงานของไดโพลจิ๋วซึ่งมีความยาว $l \leq \lambda/50$ ถูกพิจารณาในหัวข้อที่แล้ว โดยการกระจายของกระแส ถูกสมมติให้มีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าการกระจายของกระแสมีค่าคงที่แต่ในทางปฏิบัติแล้วทำไมไม่ได้เพราะเป็นแค่ปริมาณทางคณิตศาสตร์แต่การกระจายของกระแสจริงๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงสั้นๆ

การประมาณที่ดีกว่าของการกระจายของกระแสนบนสายอากาศเส้นลวดซึ่งมีความยาว $\lambda/50 < l \leq \lambda/10$ คือใช้การกระจายแบบการเปลี่ยนแปลงของรูปสามเหลี่ยม (Triangular variation) โดยการจัดเรียงรูปทรงที่สะดวกที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ของไดโพล ส่วนใหญ่จะกำหนดให้สมมาตรกับจุดกำเนิดและวางตามแนวแกน z แสดงดังรูปที่ 2.3 และแบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิ๋วแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การจัดวางโครงสร้างของโพลและการกระจายของกระแส [17]



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติของไดโพลจิว [17]

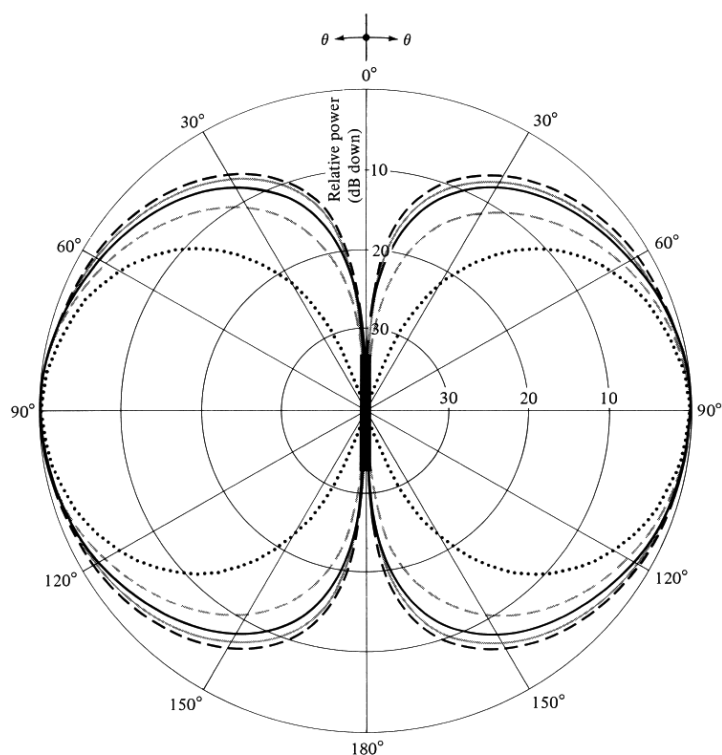
2.4.3 ไดโพลความยาวจำกัด

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาเราจะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการแผ่พลังงานของไดโพลที่มีความยาวต่างๆ เพื่อที่จะลดความยุ่งยากของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยข้อสมมติเบื้องต้นคือเส้นลวดบางมากๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางเข้าใกล้ศูนย์) โดยข้อสมมติฐานนี้จะดีก็ต่อเมื่อขนาดของเส้นลวดมีขนาดเล็กมากๆ ถ้าเทียบกับความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.5 จะแสดงถึงแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบสองมิติที่ความยาวตามที่กำหนดคือ $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ และ λ และแสดงเปรียบเทียบกับแบบรูปกำลังสำหรับไดโพลจิว $l \ll \lambda (U \ll \sin^2 \theta)$ จะพบว่าถ้าความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น ลำคลื่นจะมีค่าแคบลง เพราะว่าสภาพจะจางทิศทางเพิ่มขึ้นตามความยาว และที่ 3-dB บีมวิทท์แต่ละความยาวมีค่าดังนี้

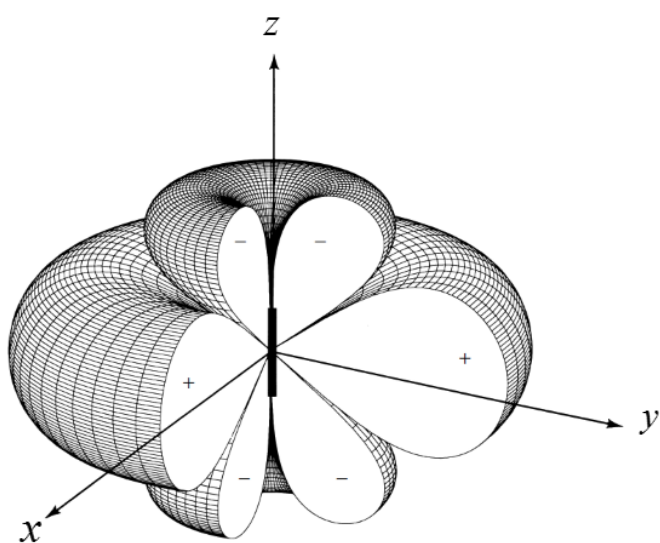
$l \ll \lambda$	3-dB บีมวิทท์	$= 90^\circ$
$l = \lambda/4$	3-dB บีมวิทท์	$= 87^\circ$
$l = \lambda/2$	3-dB บีมวิทท์	$= 78^\circ$
$l = 3\lambda/4$	3-dB บีมวิทท์	$= 64^\circ$
$l = \lambda$	3-dB บีมวิทท์	$= 47.8^\circ$

เมื่อความยาวของไดโพลเพิ่มมากขึ้นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น ($l > \lambda$) จำนวนของโลบก็จะเพิ่มมากขึ้นตามแบบรูปกำลังนอร์มอลไลซ์ของไดโพลความยาว $l = 1.25\lambda$ แสดงดังรูปที่ 2.6 ในขณะรูปที่ 2.6 (ก) แสดงรูปสามมิติขณะที่รูปที่ 2.6 (ข) แสดงรูปสองมิติ ส่วนการกระจายกระแสสำหรับไดโพลที่มีความยาว $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ และ 2λ แสดงดังรูปที่ 2.7

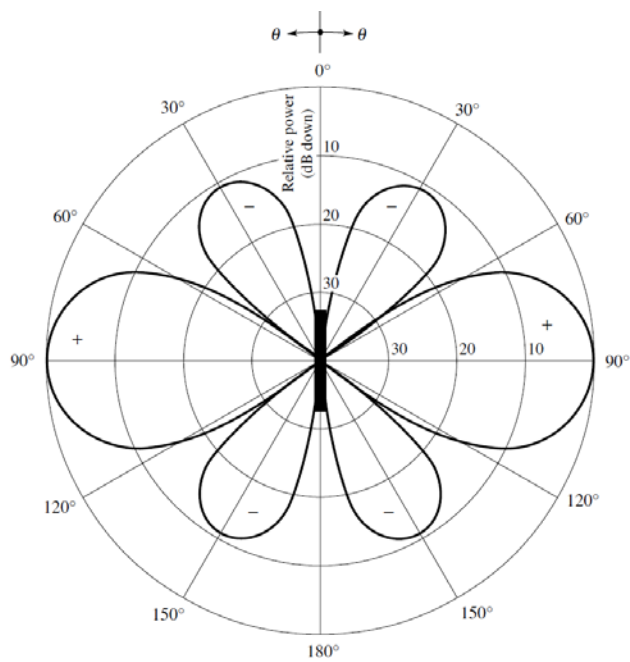


— — — — —	$l = \lambda/4$	3-dB ปีมวิทท์ = 90°
—————	$l = \lambda/2$	3-dB ปีมวิทท์ = 87°
—————	$l = \lambda/2$	3-dB ปีมวิทท์ = 78°
- - - - -	$l = 3\lambda/4$	3-dB ปีมวิทท์ = 64°
.....	$l = \lambda$	3-dB ปีมวิทท์ = 47.8°

รูปที่ 2.5 แบบรูปเชิงขนาดในระนาบมุมยก (Elevation plane) สำหรับไดโพลพอมที่มีการกระจายกระแสแบบไซน์ซoidal เมื่อ $l = \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ และ λ [17]

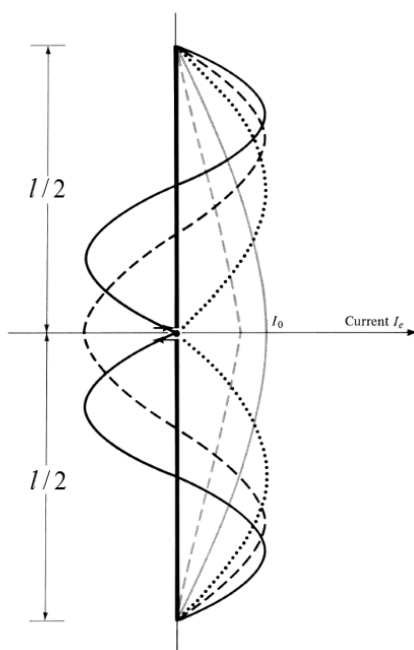


(ก) รูปสามมิติ



(ข) รูปสองมิติ

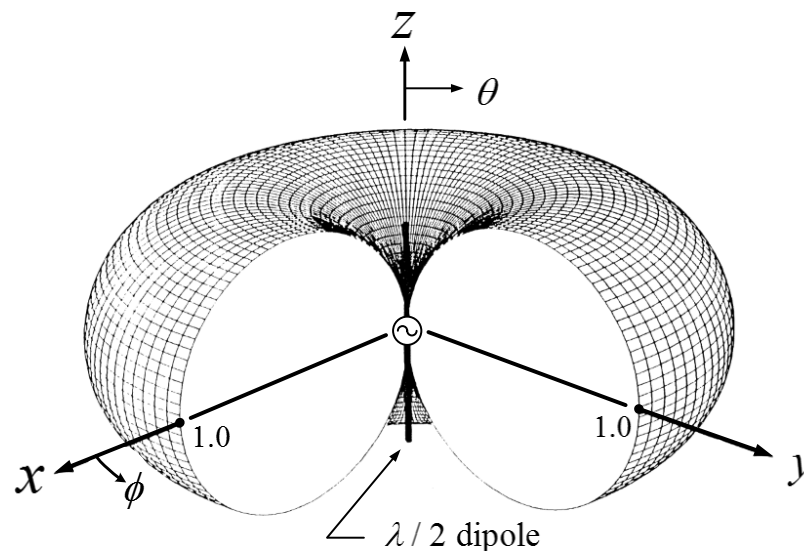
รูปที่ 2.6 แบบรูปเชิงขนาดสามมิติและสองมิติสำหรับไดโพลพอม เมื่อ $l = 1.25\lambda$ และมีการกระจายกระแสแบบไซน์ไซด์คอล [17]



รูปที่ 2.7 การกระจายของกระแสตามแนวความยาวของสายอากาศแบบเส้นลวดเชิงเส้น [17]

2.4.4 ไดโพลครึ่งความยาวคลื่น

หนึ่งในสายอากาศที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางคือ สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น ($l = \lambda / 2$) ทั้งนี้ เนื่องจากความต้านทานการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลมีค่า 73 Ω ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณที่นิยมใช้คือ 50 หรือ 75 Ω เมื่อนำมาต่อรวมกันจะทำให้แมตชิ่งได้โดยที่ความถี่ที่เรโซแนนซ์ โดยแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น [17]

2.5 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

สายอากาศชนิดต่างๆ ที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไปมีค่าคุณลักษณะและค่าปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบการประเมินสมรรถนะของสายอากาศเพื่อช่วยตัดสินใจประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานอยู่มากมาย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศดังต่อไปนี้

2.5.1 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้นนอกจากจะพิจารณาเฉพาะ $|S_{11}|$ แล้วยังสามารถที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage standing wave ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากๆ จะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นมีการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้สายอากาศไม่สามารถที่จะแผ่ออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นเมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากันหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด จะเป็นผลให้เกิดการสะสม

พลังงานไว้วางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2

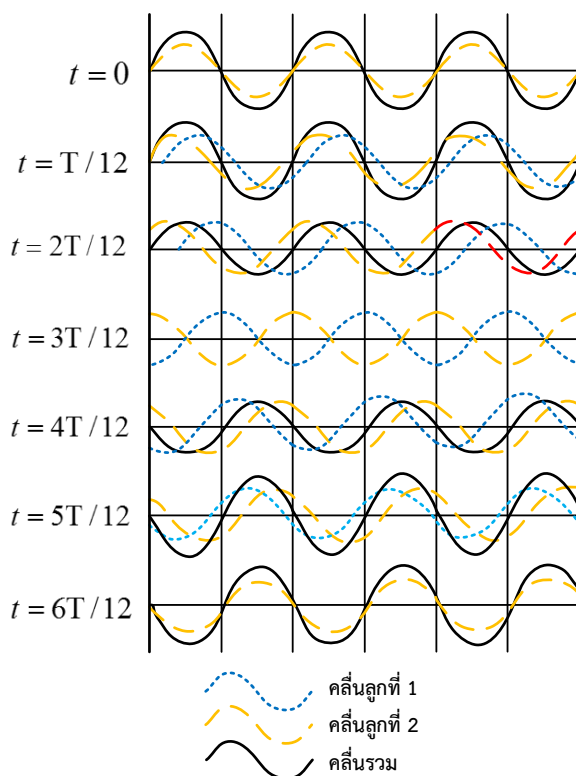
$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.1)$$

เมื่อ Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ
 Z_o คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$RL(dB) = -20 \log |\Gamma| \quad (2.2)$$

2.5.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio; SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นที่เคลื่อนที่บนสายส่งในทิศทางตรงข้ามกัน คลื่นทั้งสองจะรวมตัวกันและหักล้างซึ่งกันและกันสลับไปมา ผลที่ได้จะเรียกว่าคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดคลื่นนิ่ง

รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองรวมตัวกันและหักล้างกันได้อย่างไร โดยอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะแบ่งได้เป็นสองประเภทคืออัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio; VSWR) และอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแส (Current Standing Wave Ratio; ISWR)

อัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดันคือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงสุดกับแรงดันต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกันอัตราส่วนคลื่นนิ่งกระแสคือ อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ 2.4

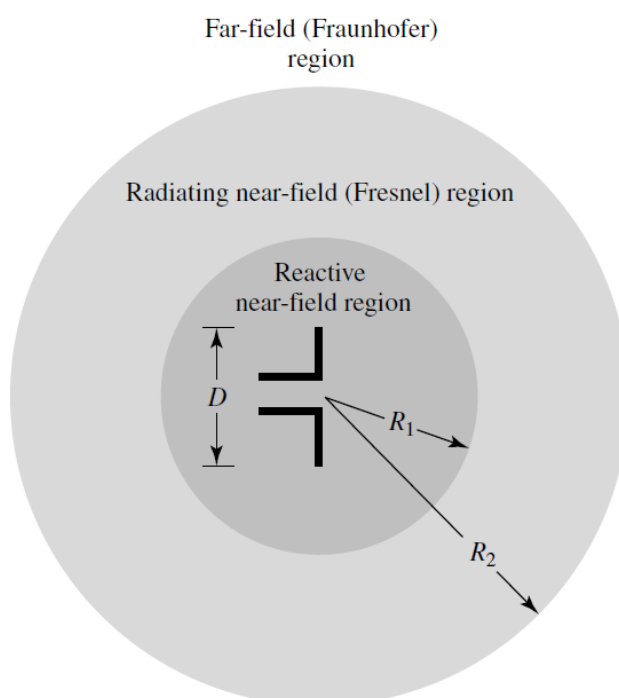
$$ISWR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (2.4)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังสมการที่ 2.5

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.5)$$

2.5.3 ระยะสนามของสายอากาศ (Field Region)

ระยะสนามของสายอากาศคือระยะที่บอกว่าสายอากาศมีการสะสมพลังงานหรือมีการแพร่กระจายคลื่นออกมา โดยระยะสนามของสายอากาศแบ่งเป็น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระยะสนามของสายอากาศที่ระยะต่างๆ [17]

R_1 - ระยะสนามระยะใกล้รีแอคทีฟ (Reactive near field) คือระยะที่วัดจากสายอากาศไปจนถึง $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ หรือระยะที่อยู่ระหว่าง $0 \leq R_1 < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ โดยที่ D คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ ที่ระยะนี้จะพบว่าสายอากาศจะไม่แพร่กระจายคลื่นออกมาแต่จะสะสมพลังงานในรูป Reactive กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของส่วนจินตภาพ

R_2 - ระยะสนามระยะใกล้ที่แพร่กระจายคลื่น (Radiation near field) คือระยะตั้งแต่ $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ ไปจนถึง $\frac{2D^2}{\lambda}$ หรือ $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R_2 < \frac{2D^2}{\lambda}$ ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาบางส่วนและสะสมไว้บางส่วน กำลังงานที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน

- ระยะสนามระยะไกล (Far field) คือระยะตั้งแต่ $\frac{2D^2}{\lambda}$ เป็นต้นไปหรือ $\frac{2D^2}{\lambda} \leq R_3 < \infty$ ที่ระยะนี้สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นออกมาหมด กำลังที่คำนวณได้จะเป็นส่วนจริง

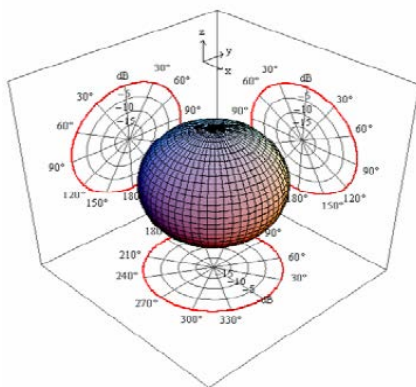
โดยที่ D คือมิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

2.5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

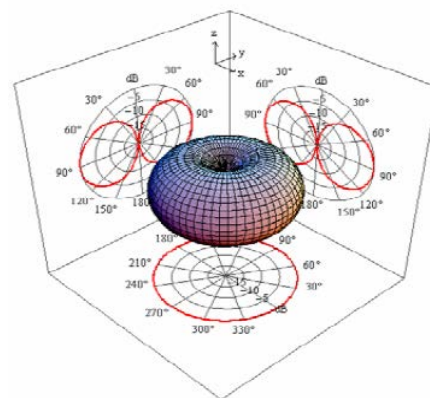
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคือการแสดงทางกราฟของคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะหาได้จากระยะสนามระยะไกลและแสดงเป็นฟังก์ชันของการระบุทิศทาง โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ คือ

- แบบไม่ชี้ทิศทาง (Non-directional)
- แบบรอบทิศทาง (Omni-directional)
- แบบทิศทางเดียว (Uni-directional)
- แบบสองทิศทาง (Bi-directional)

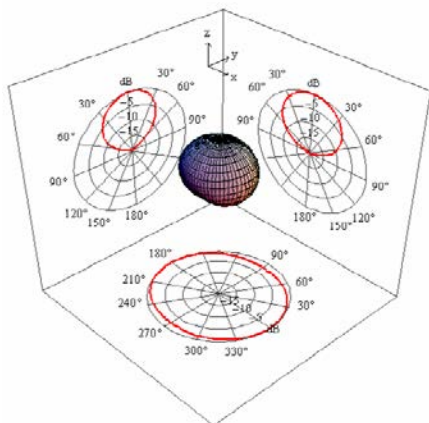
ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ต่อไปนี้



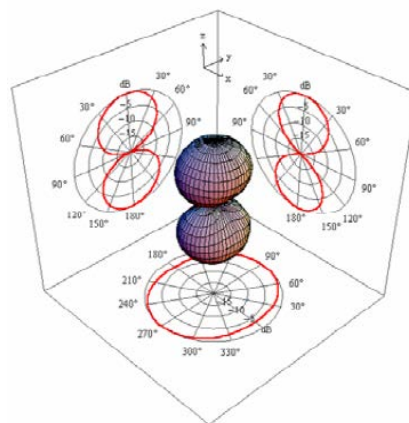
(ก) แบบไม่ชี้ทิศทาง



(ข) แบบรอบทิศทาง



(ค) แบบทิศทางเดียว

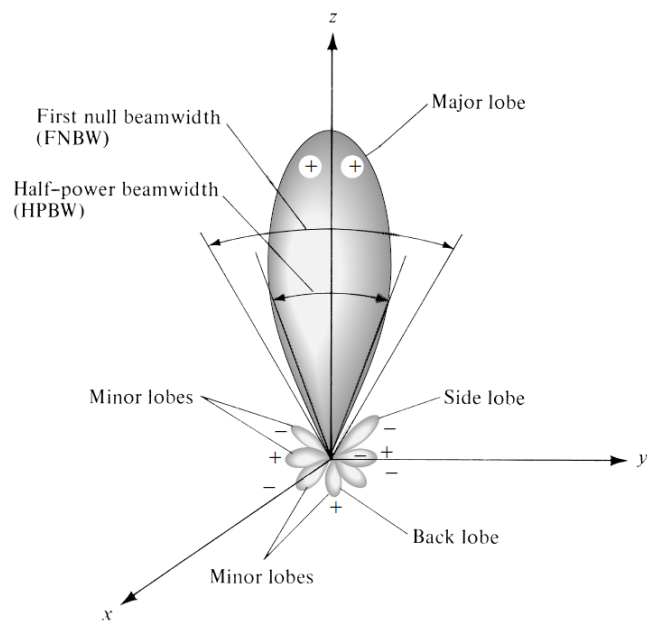


(ง) แบบสองทิศทาง

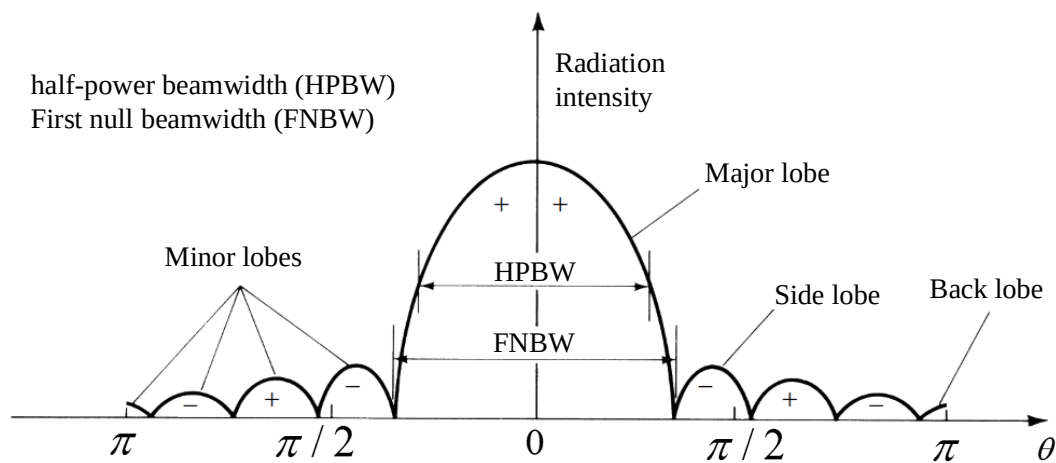
รูปที่ 2.11 แบบรูปการแพร่กระจาย

โดยทั่วไปแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศขณะที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีความเหมือนกันทุกประการ ในการวัดจึงสามารถทำได้โดยให้สายอากาศทดสอบทำงานในภาคส่งหรือภาครับก็ได้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปขนาดยอดของสนาม แบบรูปโพลาริเซชันและแบบรูปสภาพเจาะจงทิศทาง แบบรูปเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้งานสายอากาศในลักษณะงานเฉพาะต่างๆ

ในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะประกอบด้วยระดับสัญญาณที่ชี้ไปในทิศทางต่างๆ ปกติระดับสัญญาณที่มียอดสูงสุดเป็นตัวกำหนดแนวเล็งหลักของสายอากาศ ระดับสัญญาณนี้เรียกว่าลำคลื่นหลัก (Major Lobe) และระดับสัญญาณอื่นๆ เรียกว่าลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) โดยลำคลื่นย่อยมีอยู่สองลักษณะคือลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe) และลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back Lobe) ซึ่งระดับลำคลื่นย่อยมีความสำคัญในการออกแบบสายอากาศเนื่องจากลำคลื่นย่อยเป็นทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางที่ไม่พึงประสงค์



(ก) พูคลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิทซ์ของแบบรูปสายอากาศ



(ข) สเกลในเชิงเส้นของแบบรูปกำลังและความสัมพันธ์กับพูคลื่นและบีมวิทซ์

รูปที่ 2.12 พูคลื่นการแผ่กำลังงานและบีมวิทซ์ของสายอากาศ [17]

รูปที่ 2.12 (ก) (ข) ลำคลื่นของสายอากาศจะมีการพิจารณาความกว้างลำคลื่น โดยความกว้างลำคลื่นมีผลต่อการพิจารณาความสามารถในการกำหนดรายละเอียดการตรวจวัดข้อมูลในการสำรวจข้อมูลระยะไกล หรือพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ เช่นในการให้บริการการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น โดยทั่วไปมีนิยามของความกว้างลำคลื่นสองแบบที่นิยมใช้กัน ได้แก่

- ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beam width; HPBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่กึ่งกำลังคลื่นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสูงสุด

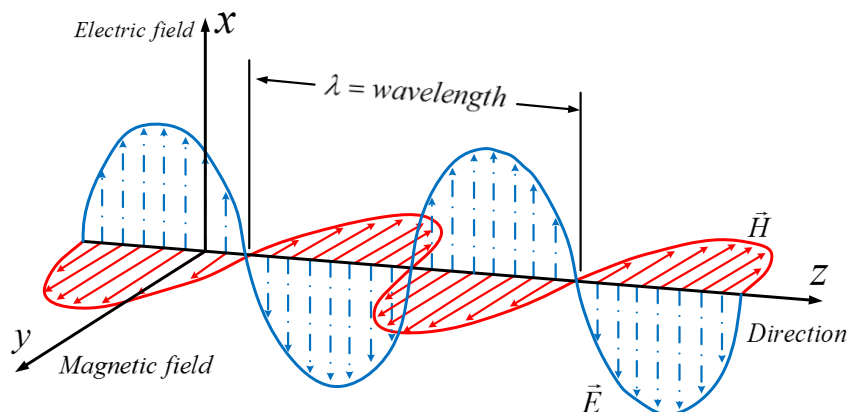
- ความกว้างลำคลื่น ณ จุดศูนย์คู่แรก (First null beam width; FNBW) คือ ขนาดเชิงมุมของลำคลื่นหลักที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์คู่แรก

2.5.5 โพลาริเซชันของคลื่นระนาบ (Polarization) [18]

โพลาริเซชันของคลื่นระนาบโดยทั่วไปแล้วคลื่นระนาบไม่ได้มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชี้ไปในทิศทางเดียวอย่างในรูปที่ 2.13 เสมอไปจากสมการดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= (M_x \vec{i}_x + M_y \vec{i}_y) k^2 e^{-jkz} \\ \vec{H} &= (-M_x \vec{i}_y + M_y \vec{i}_x) (\omega \epsilon - j\sigma) k e^{-jkz} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

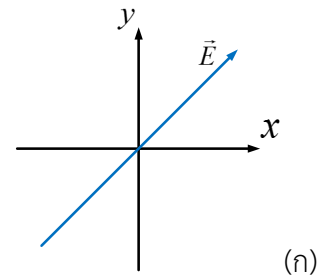
จะเห็นว่าถ้าเฟสของ M_x และ M_y ไม่เท่ากันทิศทางของสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ หรือ $\vec{H}$ จะเปลี่ยนไปตามเวลา ในการนิยามของการโพลาริเซชันนี้ เราถือเอาทิศทางของปลายของ $\vec{E}$ บนระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เป็นหลัก เช่น ทิศทางของปลายสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ เป็นเส้นตรงเราเรียกโพลาริเซชันของกรณีนี้ว่า โพลาริเซชันแบบเส้นตรง (linear polarization) ถ้าเป็นโพลาริเซชันแบบเส้นตรงที่ขนานกับพื้นโลก เราเรียกว่า โพลาริเซชันแบบขนานกับพื้นโลก (horizontal polarization) ถ้าตั้งฉากกับพื้นโลกเรียกว่า โพลาริเซชันแบบตั้งฉากกับพื้นโลก (vertical polarization)



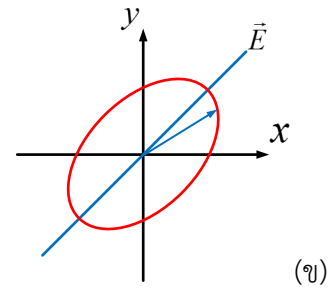
รูปที่ 2.13 คลื่นระนาบเคลื่อนที่ในทิศ Z [11]

ถ้าดูจากเฟส M_x และ M_y เราสามารถสรุปเป็นภาพได้ดังนี้คือ

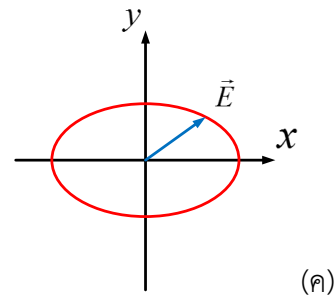
1. เมื่อเฟสของ M_x เท่ากับ M_y จะได้
โพลาริเซชันแบบเส้นตรงตามรูปที่ 3.4(ก)



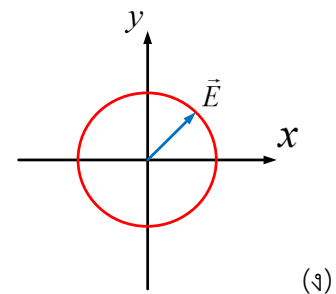
2. เมื่อเฟสของ M_x ไม่เท่ากับ M_y และ $\theta \neq \pi/2$
จะได้โพลาริเซชันแบบวงรีตามรูป (ข)



3. เมื่อเฟสของ M_x และ M_y ต่างกันเท่ากับ $\pi/2$
- ถ้า $|M_x| \neq |M_y|$ จะเป็นโพลาริเซชันแบบวงรีที่มี
แกนหลักอยู่บนแกน x และ y ตามรูป (ค)



- ถ้า $|M_x| = |M_y|$ จะเป็นโพลาริเซชันแบบวงกลม
ตามรูป (ง)



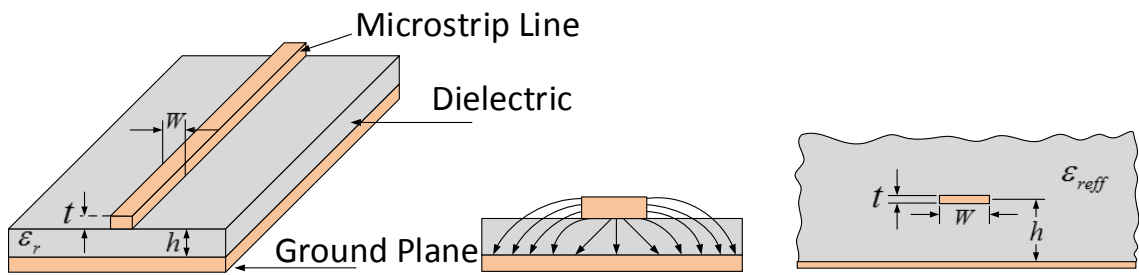
รูปที่ 2.14 โพลาริเซชันแบบต่างๆ [18]

โพลาริเซชันแบบวงรีและแบบวงกลมนั้นทิศทางการหมุนของ $\vec{E}$ อาจจะเป็นแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ ในการนิยามให้ถือหลักดังนี้ คือ เมื่อเรากำหนดระนาบ $x-y$ คงที่ระนาบหนึ่งและเมื่อเรามองจากทิศทางของสายอากาศส่ง ถ้าสนามไฟฟ้า $\vec{E}$ ที่ปรากฏบนระนาบนี้หมุนตามเข็มนาฬิกาเรากำหนดว่าเป็นโพลาริเซชันแบบตามเข็มนาฬิกาหรือแบบหมุนเวียนขวา และถ้า $\vec{E}$ หมุนทวนเข็มนาฬิกา ก็จะเป็นโพลาริเซชันแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนเวียนซ้าย

2.6 การออกแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างอยู่หลายแบบซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามโครงสร้างในการออกแบบ เช่น โครงสร้างสายนำสัญญาณแบบระนาบร่วม (Coplanar Waveguide) โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบ การวิเคราะห์และสมการในการคำนวณมีความแตกต่างกัน รายงานฉบับนี้จึงนำเสนอการพื้นฐานที่มีความเกี่ยวข้องที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปเบื้องต้นมาแสดงไว้ดังต่อไปนี้

การป้อนสัญญาณแบบสายไมโครสตริป มีสมการในการออกแบบซึ่งต้องให้มีเกณฑ์เฉพาะตามต้องการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป และเส้นสนามไฟฟ้า [17]

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{h} \leq 1$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \Omega \quad (2.7)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{W}{h}}} + 0.4 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{W}{h} > 1$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} \Omega \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (2.10)$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณ และ h คือความสูงของวัสดุฐานรองหาได้จาก

$$W = w + \frac{t}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2h}{t} \right) + 1 \right] \quad (2.11)$$

$$H = h - 2t \quad (2.12)$$

2.7 วงจรเรียงกระแส (Rectifying circuit)



รูปที่ 2.16 ผังวงจรเรียงกระแส

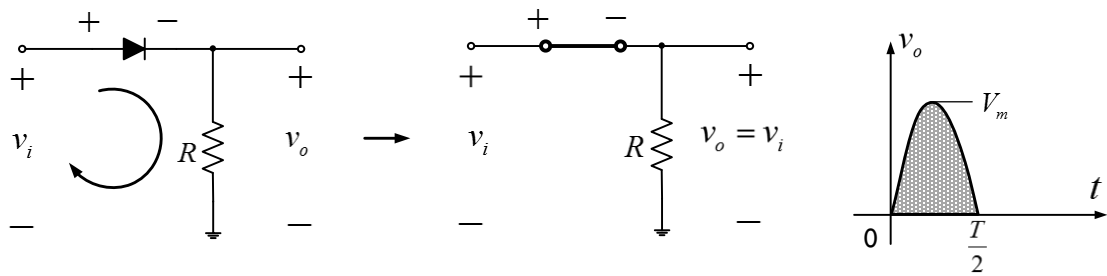
วงจรเรียงกระแสมีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณดังกล่าวคือ ไดโอด โดยพื้นฐานทั่วไปวงจรเรียงกระแสจะประกอบด้วย ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (Coupling Capacitor) วงจรแมตชิงแบบสตับ (Stub Matching) ไดโอดช็อตกี้ (Schottky Diode) ตัวกรองสัญญาณเก็บประจุ (Capacitor Filter) และตัวต้านทาน (Resistor) ซึ่งแต่ละส่วนของวงจรเรียงกระแสจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

2.7.1 วงจรเรียงกระแสและการทำงานของไดโอด [19]

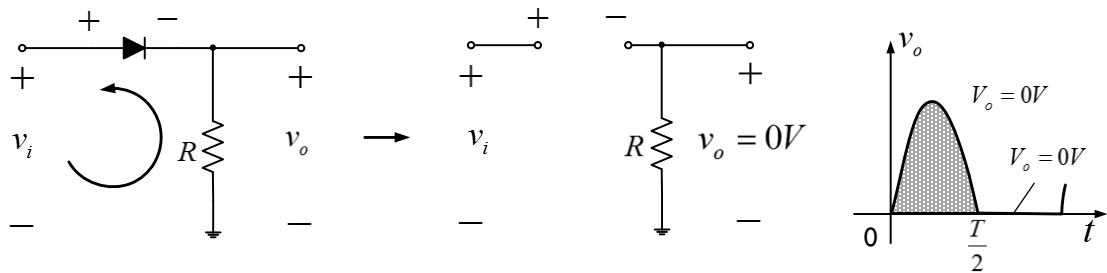
วงจรเรียงกระแสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier)
- วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full-Wave Rectifier)

วงจรเรียงกระแสทั้งสองแบบนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ไดโอดเพื่อทำการเรียงกระแสโดยไดโอดจะยอมให้กระแสไหลไปในทิศทางเดียวเท่านั้น โดยในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการทำงานของไดโอดในอุดมคติ โดยที่จ่ายแรงดันชั่วขณะ $v_i = V_m \sin \omega t$ ซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ให้วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นซึ่งประกอบด้วย ไดโอดในอุดมคติ ดังรูปที่ 2.17



(ก)



(ข)

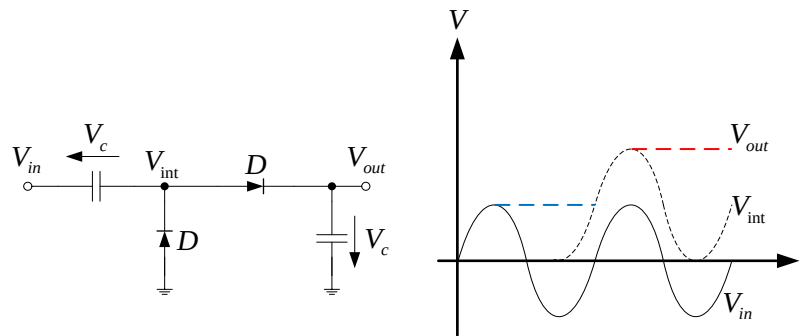
รูปที่ 2.17 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น [19]

ขณะสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านบวกปรากฏที่วงจรเรียงกระแส จะเกิดการไปอัดตรงที่ไดโอด ซึ่งเปรียบเสมือนการลัดวงจร ทำให้สัญญาณผ่านไดโอดได้จะได้แรงดันเอาต์พุต (v_o) ซึ่งมีขนาดเท่ากับแรงดันอินพุต (v_i) ตามรูปที่ 2.17 (ก)

ในทางตรงกันข้าม ขณะสัญญาณครึ่งไซเคิลด้านลบปรากฏที่วงจรเรียงกระแส จะเกิดการไปแอสกลับที่ไดโอดในอุดมคติ ซึ่งเปรียบเสมือนการเปิดวงจร สัญญาณไม่สามารถผ่านไดโอดได้แรงดันเอาต์พุตจึงเท่ากับศูนย์ ($v_o = 0V$) ดังรูปที่ 2.17 (ข)

2.7.2 ไดโอดทวีแรงดันสองเท่า (Voltage Doubler Diode)

ไดโอดทวีแรงดันสองเท่า ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเปรียบเทียบขนาดของ Magnitude ของสัญญาณทางด้านเข้าและทางด้านออกของวงจร โดยทางด้านออกของวงจรจะมีขนาดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากกว่าขนาดสัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ สองเท่า ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรไดโอดทวิแรงดันสองเท่าและรูปแบบสัญญาณ

ไดโอดที่ใช้สำหรับเรียงกระแสบนความถี่ไมโครเวฟได้เลือกใช้ไดโอดชอตтки (Schottky Diode) ซึ่งไดโอดชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และมีแรงดันตกคร่อมไดโอดเพียง 0.3 V - 0.5 V จึงเหมาะสำหรับนำมาเรียงกระแส (Rectifier) ตรวจวัดสัญญาณ (Detector) และยังสามารถเป็นสวิตช์เปิดและปิดได้เร็วกว่าไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรผสมสัญญาณความถี่สูง (High frequency mixer) ไดโอดชอตткиมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสและไดโอดชนิดนี้มีลักษณะการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการที่ 2.13

$$i(v) = I_o + \frac{d_2}{4} V^2 + d_1 V_1 \cos(\omega t) + \frac{d_2}{4} V^2 \cos 2\omega t + \dots \quad (2.13)$$

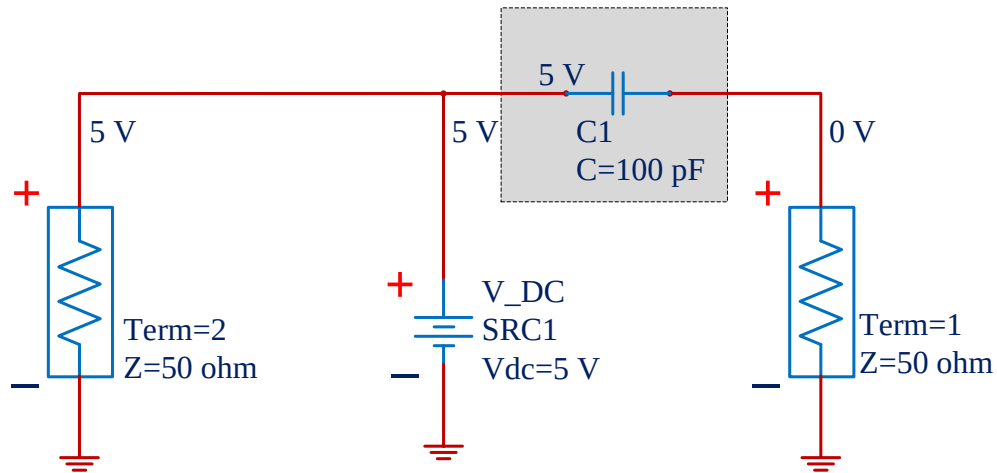
จากสมการที่ 2.13 จะประกอบไปด้วยเทอมของแรงดันไฟตรง เทอมของกระแสไฟตรงและเทอมของกำลังงาน โดยทั้งสามเทอมนี้มีความสัมพันธ์กัน เมื่อกำลังงานของสัญญาณที่ถูกผ่านการตรวจวัดสัญญาณด้วยไดโอดชอตтки ขนาดของสัญญาณทางด้านเข้าจะมีสัดส่วนกับแรงดันไฟตรงทางด้านออกเท่ากับกำลังสอง V_2 ซึ่งเรียกว่าการตรวจวัดตามกฎกำลังสอง (Square law detection) โดยทั่วไปไดโอดที่ถูกใช้ในการเรียงกระแสจะมีคุณสมบัติของกระแสไฟฟ้าจะมีอยู่ 3 ช่วง คือ ช่วงการเรียงกระแสตามกฎกำลังสอง ช่วงการเรียงกระแสเชิงเส้น ช่วงการอิ่มตัว ช่วงการเรียงกระแสตามกฎกำลังสอง เป็นช่วงที่นิยมใช้งานเนื่องจากต้องการกำลังงานไมโครเวฟไม่สูงมาก

2.7.3 ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ

ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (Coupling Capacitor) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟตรงรั่วหรือไหลออกทางด้านเข้าและทางด้านออกของวงจรความถี่วิทยุ หรืออาจจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งตัวเก็บประจุเชื่อมต่อทำหน้าที่ลัดวงจร (Short Circuit) เฉพาะกระแสไฟฟ้าตรง แต่ความถี่วิทยุสามารถไหลผ่านหรือทำงานได้ปกติ ดังรูปที่ 2.20 สามารถคำนวณหาค่าเก็บประจุเชื่อมต่อได้จากสมการที่ 2.14

$$C_{coupling} = \frac{1}{2\pi f(Z_{input})} \quad 2.14$$

เมื่อ

 f = ความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบ Z_{input} = อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของวงจรหรือสายอากาศรูปที่ 2.19 การจำลองตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ C_1

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าไม่มีแรงดันกระแสตรงไหลไปทาง Term=1 เนื่องจากตัวเก็บประจุทำหน้าที่ป้องกันไม่กระแสไฟตรงไหลผ่านไปได้

2.7.4 กรองสัญญาณโดยตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้าที่มีการกระเพื่อม (Ripple) ของสัญญาณหรือมีการแกว่งของสัญญาณ ตัวเก็บประจุดังกล่าวเหมือนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter: LPF) เพื่อต้องการให้ได้สัญญาณเรียบ โดยสามารถหาค่าตัวเก็บประจุนี้ได้จากสมการ

$$C = \frac{4N}{T} \int_0^T C_D (\overline{V_D} + V_0 \sin \omega t) dt \quad 2.15$$

โดยที่

$$N = \frac{V_0}{2V_s} \quad 2.16$$

เมื่อ

 N คือ จำนวนไดโอดที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านอินพุตกับด้านออก T คือ คาบเวลาของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ C_D คือ ค่าตัวเก็บประจุภายในตัวไดโอด $\overline{V_D}$ คือ ค่าแรงดันที่ไบอัสเดินหน้าให้กับไดโอด $V_0 \cos \omega t$ คือ ค่าแรงดันไฟตรงที่ได้จากด้านออกของวงจร

2.7.5 ตัวต้านทาน (Resistor)

ตัวต้านทาน (Resistor) ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตรงให้กับวงจรแปลงกระแสไฟฟ้ามากขึ้นกว่าเดิม โดยตัวต้านทานนี้มีผลต่อกำลังงานทางด้านเข้าและด้วยไดโอดที่มีคุณสมบัติเป็นไม่เป็นเชิงเส้นนี้จึงทำให้กำลังงานถูกทำให้ลดลง (Absorbed Active Power) ค่าความต้านทานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16 ถึง สมการที่ 2.18

$$V_{out} = V_O - I_{out} R_{out} \quad 1.16$$

$$R_{out} = \frac{V_O - V_{out}}{I_{out}} \quad 2.17$$

$$V_O = 4N\bar{V}_D \big|_{I_{out}} \quad 2.18$$

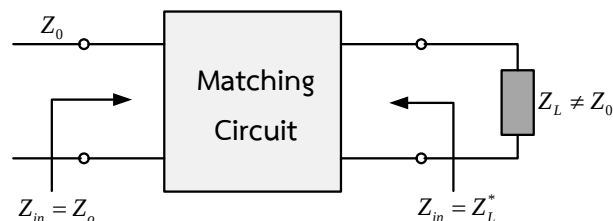
โดยที่

N คือ จำนวนไดโอด

$\bar{V}_D$ คือ กระแสไฟฟ้าตรงตกคร่อมไดโอด

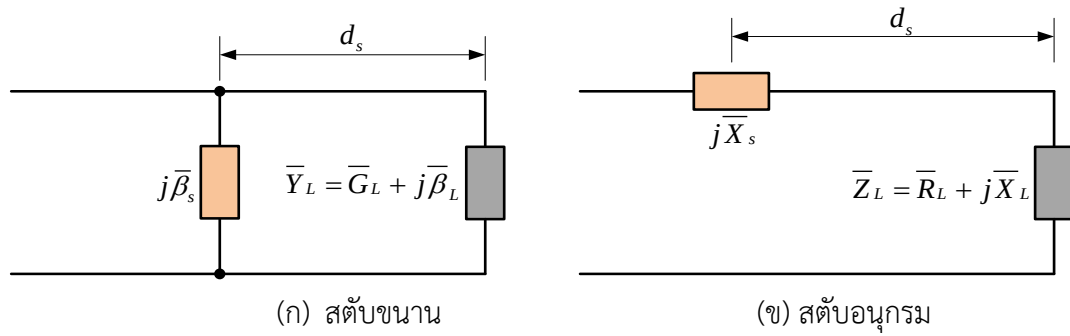
2.7.6 วงจรแมตชิงสตัป

วงจรแมตชิงสตัป (Stub Matching) ทำหน้าที่ ปรับอิมพีแดนซ์ด้านเข้าให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ด้านออกมากที่สุด หรือระหว่างโหลดกับวงจร อันเนื่องมาจากเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณเกิดขึ้นมาเมื่อค่า $Z_L \neq Z_0$ การแก้ปัญหานั้นจะทำได้โดยการใช้วงจรแมตชิงสตัปแทรกกลางระหว่างสายนำสัญญาณกับโหลดดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ผังวงจรแมตชิงสตัป

จากรูปที่ 2.20 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของวงจร (Z_0 หรือ Z_{in}) และ Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของไดโอดช็อตก็ วงจรปรับแมตชิงสตัปกระทำตัวเสมือนเป็นอุปกรณ์รีแอ็กแตนซ์ การพิจารณาสายนำสัญญาณแบบไม่มีการสูญเสียมีโหลดแอดมิตแตนซ์เท่ากับ Y_L ดังรูปที่ 21 (ก) ในกรณีที่วงจรปรับแมตชิงสตัปถูกต่อแบบขนานและโหลดอิมพีแดนซ์เท่ากับ R_L ดังรูปที่ 21 (ข) ในกรณีที่วงจรปรับแมตชิงสตัปถูกต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 2.21 ผังวงจรปรับแมตซ์ิ่งสตับ

การหาระยะ d_s ในกรณีวงจรปรับแมตซ์ิ่งสตับถูกต่อแบบขนานหาได้จากสมการที่ 2.19 ถึงสมการที่ 2.20 และความยาวสายนำสัญญาณสำหรับวงจรปรับแมตซ์ิ่งสตับแบบเปิดปลายสายได้จากสมการที่ 2.21

$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{\beta}_L \pm \sqrt{\bar{\beta}_L^2 - A(1 - \bar{G}_L)}}{A} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่

$$A = \bar{G}_L (\bar{G}_L - 1) + \bar{\beta}^2 \quad (2.20)$$

$$l_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} (\bar{\beta}_s) \quad (2.21)$$

การหาระยะ d_s ในกรณีวงจรปรับแมตซ์ิ่งสตับถูกต่อแบบอนุกรมหาได้จากสมการที่ 2.22 ถึงสมการที่ 2.23 และความยาวสายนำสัญญาณสำหรับวงจรแมตซ์ิ่งสตับชนิดปลายปิดได้จากสมการที่ 2.24

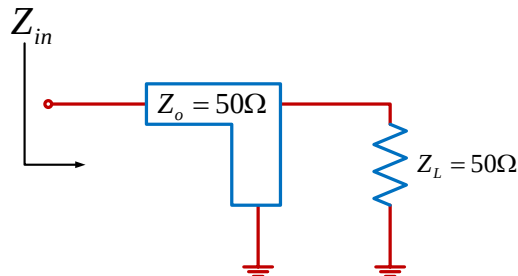
$$d_s = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}_L \pm \sqrt{\bar{X}_L^2 - A(1 - \bar{R}_L)}}{A} \right) \quad (2.22)$$

$$A = \bar{R}_L (\bar{R}_L - 1) + \bar{X}_L^2 \quad (2.23)$$

$$l_s = \frac{1}{\beta} \cot(-\bar{X}_s) \quad (2.24)$$

และเนื่องด้วยการออกแบบวงจรเรียงกระแสต้องออกแบบบนแผ่นไมโครสตริปและตัวไมโครสตริปเองก็สามารถใช้เป็นสายนำสัญญาณแบบอนุกรม หรือสตับแบบวงจรเปิดและแบบปิดได้เพื่อการแมตซ์ิ่งวงจรในย่านความถี่สูงและไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรที่อยู่บนแผ่นพิมพ์ทั้งนี้

เนื่องจากโครงสร้างของไมโครสตริปจะเหมือนกับเส้นสายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ นอกจากนี้การใช้ไมโครสตริปยังทำให้เกิดการสูญเสียกำลังน้อยกว่าการใช้อุปกรณ์แบบลัมป์ อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครสตริปจะไม่เหมาะกับวงจรความถี่ต่ำ เนื่องจากที่ความถี่ต่ำนั้นไมโครสตริปจะมีความยาวมากและทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้การออกแบบการแมตช์วงจรด้วยไมโครสตริปโดยใช้สแต็บเดี่ยว (Single - stub)



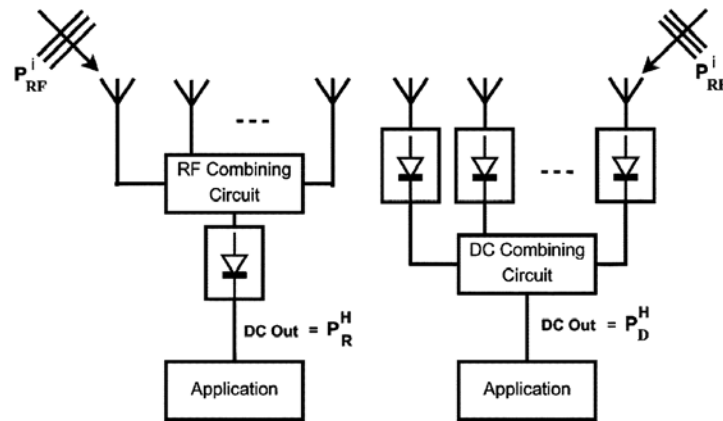
รูปที่ 2.22 การต่อใช้สแต็บเดี่ยวในรูปแบบไมโครสตริป [20]

จากรูปที่ 2.22 แสดงการแมตช์ต่อกับโหลด 50 Ω เพื่อแมตช์หรือแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดไปยังค่าอิมพีแดนซ์ Z_{in} ที่ต้องการ โดยใช้ไมโครสตริปที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 Ω ทำหน้าที่เป็นวงจรการแมตช์ ซึ่งประกอบด้วยสแต็บแบบวงจรลัดต่อขนานกับโหลด ทั้งนี้วงจรการแมตช์อาจใช้สแต็บแบบวงจรเปิดแทนสแต็บแบบวงจรลัดก็ได้ [20]

2.8 งานวิจัยที่มีมาก่อน

จากการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่าม้งานวิจัยที่ทำการแปลงกำลังสัญญาณคลื่นวิทยุเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีรูปแบบที่หลากหลาย ทั้งการศึกษาเกี่ยวกับค่าประสิทธิภาพของระบบแรงดันทางด้านขาออกที่ได้ โครงสร้างของระบบโดยหลักแล้วจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สายอากาศและวงจรเรียงกระแส ซึ่งงานวิจัยที่มีมาก่อนนี้จะศึกษาสายอากาศที่ต่อรวมกับวงจรเรียงกระแสที่เรียกว่า Rectenna

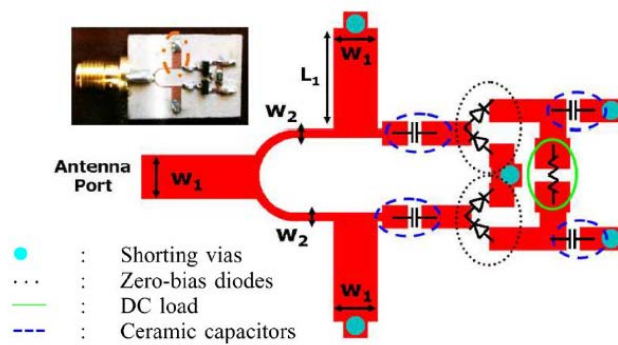
งานวิจัยแรกเป็นการนำเสนอรูปแบบการต่อใช้งานของสายอากาศซึ่งมีสองรูปแบบด้วยกันซึ่งเป็นผลงานของ Ugur Olgun และคณะ ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2011 โดยรูปแบบแรกในรูปที่ 2.23 (ก) เป็นการใช้อย่างอากาศหลายๆตัวรับสัญญาณเข้ามาจากนั้นทำการรวมสัญญาณคลื่นวิทยุเข้าด้วยกันก่อนที่จะเข้าสู่วงจรเรียงกระแส และในแบบที่สองในรูป 2.23 (ข) เป็นการใช้อย่างอากาศหลายๆตัวเช่นกันแต่สายอากาศแต่ละตัวจะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสก่อน จากนั้นจะรวมแรงดันที่ได้เข้าด้วยกันข้อดีของแบบ 2.23 (ข) นี้คือเกิดการสูญเสียน้อยกว่าแบบแรก 2.23 (ก) เนื่องจากการนำสัญญาณวิทยุมารวมกันจะทำให้เกิดการสูญเสียในวงจรมากขึ้น โดยแสดงวงจรเรียงกระแสดังรูปที่ 2.24 ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ และอัตราขยายแสดงได้ดังรูปที่ 2.25 (ข) โดยผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศมีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ตั้งแต่ 2. GHz ถึง 2.6 GHz โดยประมาณ และมีอัตราขยายมากที่สุด 4.8 dBi โดยประมาณ



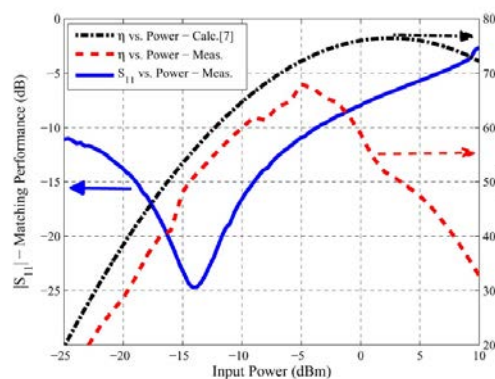
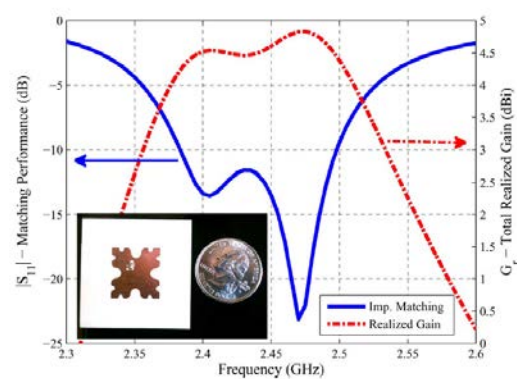
(ก) รวมความถี่วิทยุ

(ข) รวมไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 2.23 รูปแบบการต่อใช้งานของสายอากาศ



รูปที่ 2.24 วงจรเรียงกระแสต้นแบบ

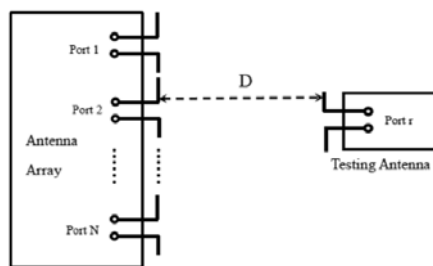
(ก) เปรียบเทียบระหว่างอินพุตต่อ $|S_{11}|$ และ η 

(ข) การทดสอบคุณลักษณะต่างๆ

รูปที่ 2.25 ผลการทดสอบคุณลักษณะของ $|S_{11}|$ อัตราขยายและการวัดเทียบของวงจร

งานวิจัยต่อมาเป็นของ Fangyi Xie ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2013 ได้นำเสนอรูปแบบสายอากาศแบบแถวลำดับ (Antenna Array) จากรูปที่ 2.27 เสนอโดยการนำเอาสายอากาศต้นแบบมาต่อเรียงกันในรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มโอกาสในการรับสัญญาณให้ได้มากที่สุด และจากรูปที่ 2.28 (ก) แสดงถึงการจำลองและการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ รูปที่ 2.28 (ข)

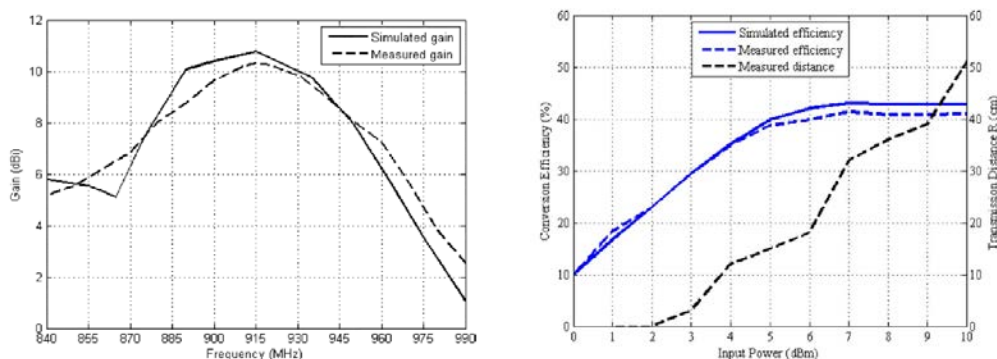
เป็นการจำลองและการทดสอบค่าประสิทธิภาพเทียบกับระยะทางโดยมีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 40% ที่ระยะ 40 cm



รูปที่ 2.26 รูปแบบสายอากาศแถวลำดับและการทดสอบ

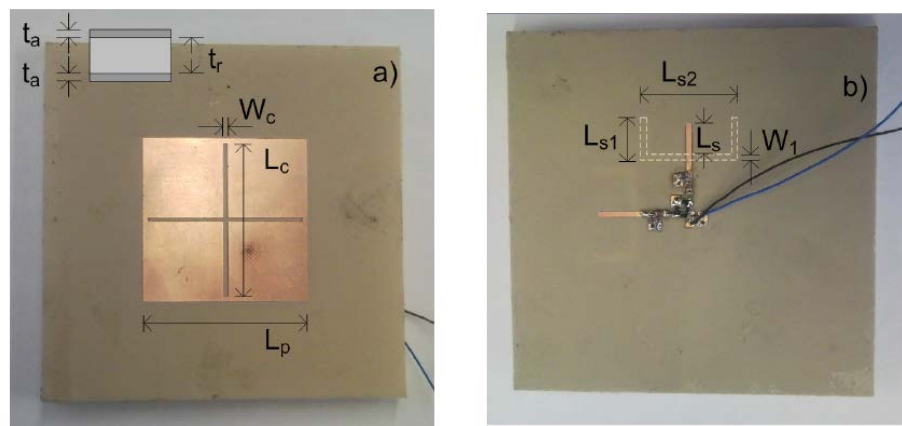


รูปที่ 2.27 สายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ

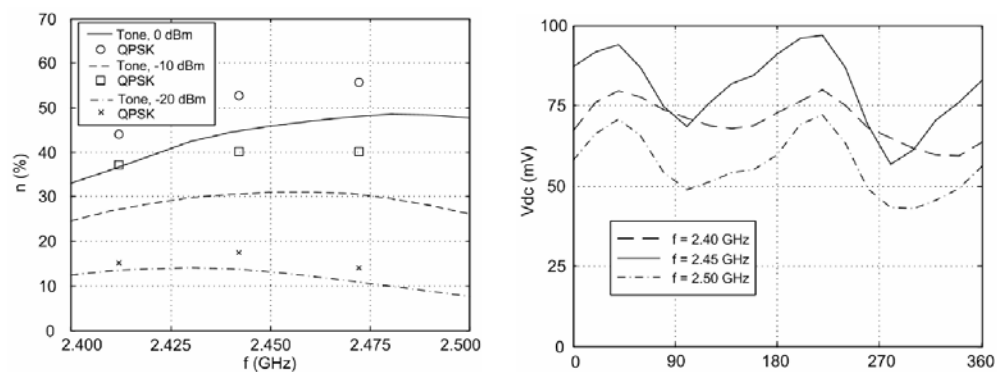


รูปที่ 2.28 สายอากาศต้นแบบและการนำสายอากาศต้นแบบมาต่อกันแบบแถวลำดับ

งานวิจัยนี้เป็นของ Gianfranco Andia Vera ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2010 ได้นำเสนอสายอากาศจัดเรียงกระแสดโดยใช้สายอากาศแบบร่องกากบาทเพื่อรับสัญญาณความถี่ย่าน กำลังงานไร้สาย 2.45 GHz โดยการออกแบบในการรับสัญญาณคลื่นสนามแม่เหล็กกำลังงานต่ำๆ สายอากาศถูกใช้งานอยู่ในย่านความถี่ประมาณ 2.30 GHz ถึง 2.60 GHz มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศหรือ efficiency ค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 40% ที่ความถี่ 2.475 GHz โดยแปลงเป็นแรงดันกระแสตรงได้ประมาณ 78 ดังแสดงดังรูปที่ 2.29 ถึง 2.30



รูปที่ 2.29 รูปสายอากาศต้นแบบด้านหน้าและด้านหลัง

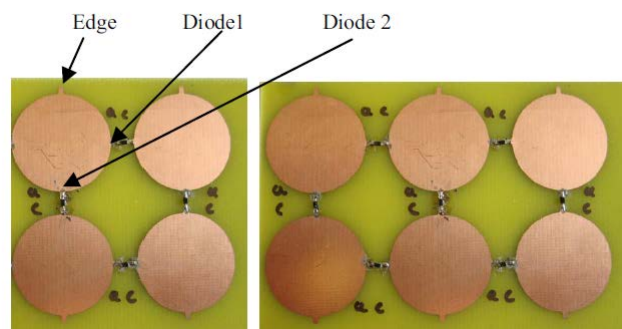


(ก) ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพของวงจร
เรียงกระแส

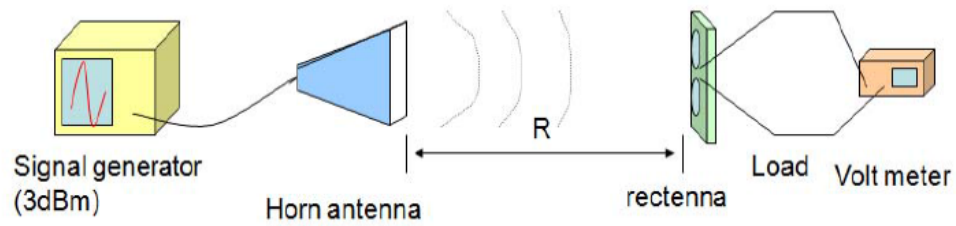
(ข) แรงดันกระแสตรงทางด้านขาออก

รูปที่ 2.30 ผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ

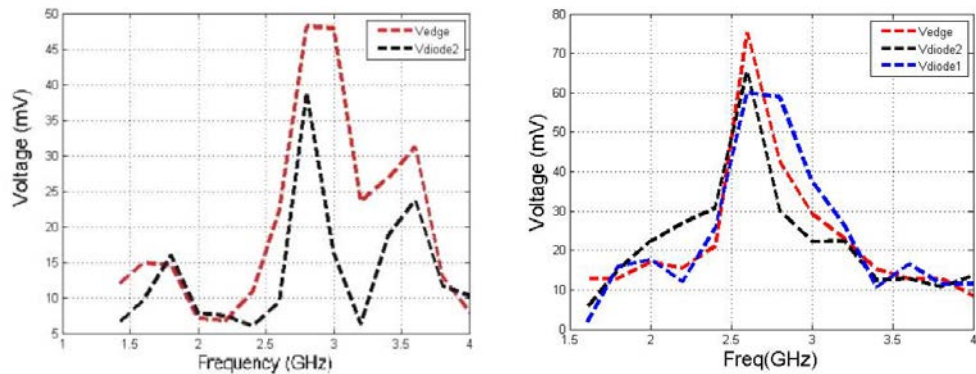
งานวิจัยต่อมาเป็นของ Jingwei Zhang ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2011 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการต่อสายอากาศแบบแถวลำดับโดยได้ทำการเปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาออกเปรียบเทียบระหว่างการต่อสายอากาศแถวลำดับตั้งแต่หนึ่งองค์ประกอบถึงสามองค์ประกอบ แต่จะแยกวัดค่าแรงดันที่ไดโอดทีละตัวแยกกัน และกล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อที่จะทำการทดสอบวัดค่าแรงดันต่างๆได้



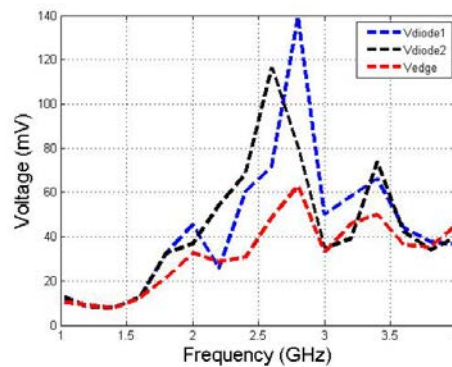
รูปที่ 2.31 สายอากาศแถวลำดับแบบสององค์ประกอบและสามองค์ประกอบ



รูปที่ 2.32 รูปการติดตั้งการทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ



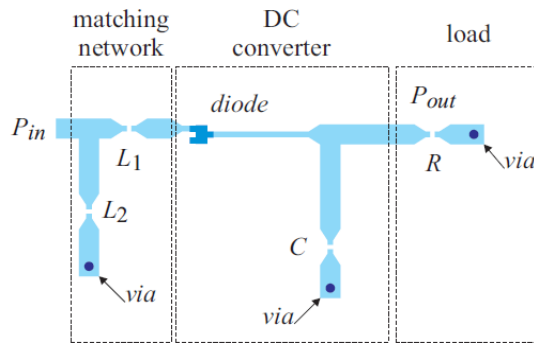
(ก) ผลการทดสอบสายอากาศ 1 องค์กรประกอบ (ข) ผลการทดสอบสายอากาศ 2 องค์กรประกอบ



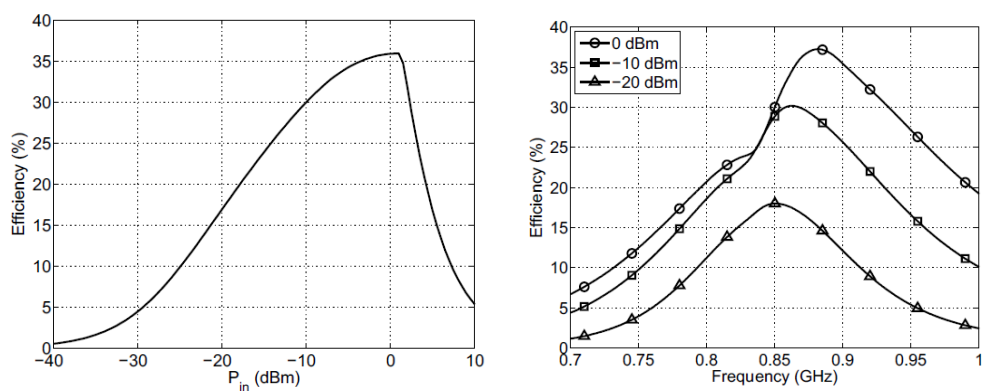
(ค) ผลการทดสอบสายอากาศ 3 องค์กรประกอบ

รูปที่ 2.33 ผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ

งานวิจัยต่อมาเป็นของ Stylianos D. ที่ได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2014 ได้นำเสนอเกี่ยวกับการแบ่งสายอากาศและวงจรเรียงกระแสออกเป็นส่วนๆเพื่อที่จะงานต่อการสร้างและการวิเคราะห์ โดยได้ทำการทดสอบวงจรเรียงการสแยกกับสายอากาศและหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเรียงกระแสโดยเปรียบเทียบกับตัวต้านทานหลายๆค่า และความถี่ต่างๆเพื่อดูค่าประสิทธิภาพได้ดังแสดงตามรูปที่

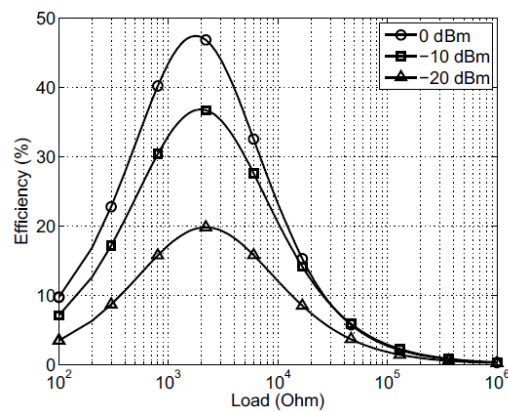


รูปที่ 2.34 การออกแบบไมโครสตริป



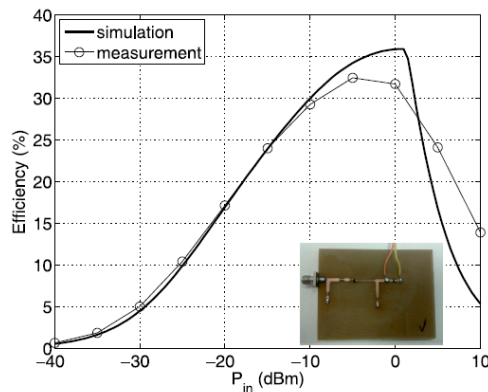
(ก) ค่าประสิทธิภาพต่อกำลังงานด้านเข้า

(ข) ค่าประสิทธิภาพจรรีงกระแสเทียบกับความถี่ต่างๆ

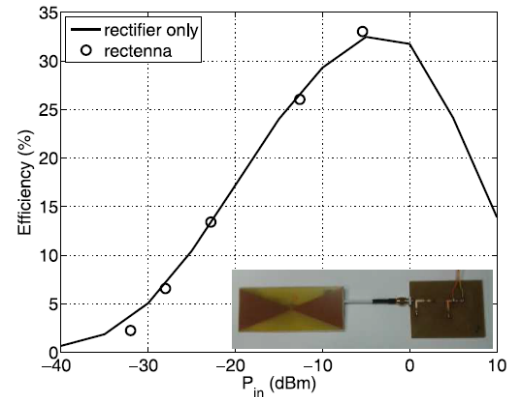


(ค) ค่าประสิทธิภาพจรรีงกระแสเทียบกับค่าความต้านทานต่างๆ

รูปที่ 2.35 ผลการจำลองแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ



(ก) ผลการจำลองและผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพ
วงจรเรียงกระแสเทียบกับกำลังงานด้านเข้า



(ข) ผลการทดสอบสายอากาศและวงจรเรียง
กระแส

รูปที่ 2.36 ผลการทดสอบแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ

จากการศึกษาวิจัยที่มีมาก่อนนั้นได้นำแนวคิดและการออกแบบต่างๆที่ได้นำเสนอมาปรับปรุงและประยุกต์ใช้เข้ากับงานที่จะได้ทำการออกแบบ เช่นสายอากาศแบบแถวลำดับ การติดตั้งการวัดทดสอบเพื่อวัดแรงดันทางด้านขาออกของสายอากาศ รวมถึงแนวคิดการออกแบบสายอากาศที่ติดกับวงจรเรียงกระแสในแต่ละตัวเพื่อที่จะลดการสูญเสียภายในวงจรได้

2.9 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีและหลักการของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transmission : WPT) โดยได้เริ่มจากประวัติความเป็นมาและกล่าวถึงชนิดของการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย มาตรฐานที่ใช้กับเทคโนโลยี WLAN ความถี่ 2.40 GHz ประวัติลำดับของการพัฒนามาตรฐานซึ่งระบบ WLAN นั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเป็นระบบที่น่าสนใจซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวได้นำมาทำการออกแบบสายอากาศในลำดับต่อไป

สายอากาศสำหรับการส่งผ่านกำลังงานไร้สายนั้นส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนและยุ่งยากและมีความละเอียดเนื่องจากต้องต่อใช้งานกับใช้อุปกรณ์แบบลัมป์ต่างๆ โดยในที่นี้เราจะเลือกใช้สายอากาศแบบแผ่นพิมพ์โดยที่เราได้เลือกใช้สายอากาศแบบไดโพล โดยเบื้องต้นจะใช้หลักการในการออกแบบจากการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ที่แมตซ์ในสายนำสัญญาณไมโครสตริป และในส่วนของวงจรเรียงกระแสได้สร้างแยกกันกับสายอากาศเพื่อให้จ่ายต่อการออกแบบและใช้งานโดยส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศน้อยที่สุด โดยโดยพิจารณา $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นอัตราขยาย แรงดันทางด้านขาออกและค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานในบทที่ 3 และ 4 ต่อไป