



รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบผิวโค้งโดยใช้
ทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์
(Synthesis of Back-Feed Curved Reflector Antenna
Using Physical Optics)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยและผู้เกี่ยวข้อง



รายงานการวิจัย

การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบผิวโค้งโดยใช้
ทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์
(Synthesis of Back-Feed Curved Reflector Antenna
Using Physical Optics)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคต์

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาววันวิสาข์ ไทยวิโรจน์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2551

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินการได้ และได้รับผลสำเร็จบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
ทุกประการ โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2550
สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ปิยาภรณ์ กระจอดนอก และนางสาววันวิสาข์ ไทยวิโรจน์ ผู้ร่วม
วิจัยซึ่งช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รังสรรค์ วงศ์สรรค์

บทคัดย่อ

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การเชื่อมต่อแบบจุดไปหลายจุด ต้องการสายอากาศที่ให้ ล้ำคลื่นครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างและอัตราขยายค่อนข้างสูง สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อน สัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทดแทนสายอากาศไดโพลหรือ สายอากาศแถวลำดับแบบธรรมดาสำหรับการประยุกต์ใช้กับการสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายที่ ต้องการสายอากาศเพียงตัวเดียวในการแผ่กระจายคลื่นในห้องขนาดใหญ่ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบผิวโค้งที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนที่มี รูปทรงเป็นไปตามสมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบควอดเรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระดับความพลั่ว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง จากนั้นจะ เลือกตัวสะท้อนที่มีคุณลักษณะเหมาะสำหรับการแผ่กระจายคลื่นในห้องขนาดใหญ่ มาสร้างสายอากาศ ต้นแบบที่ความถี่ 10 GHz เพื่อนำไปวัดทดสอบคุณลักษณะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ และสังเคราะห์ด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ต่อไป

Abstract

In the wireless communication applications such as point-to-multipoint, it is desirable for antenna beam to cover a broad area and rather high gain. Shaped reflector antennas using backscattering technique comprise an interesting alternative to more usual dipole antenna or antenna arrays for WLAN communication, which require only one antenna for field radiating in the large room. This research presents synthesis of back-feed curved reflector antennas which have the various functions of elementary geometries i.e., quadratic, circular, parabolic and hyperbolic surface shapes. The antenna characteristics i.e., radiation pattern, ripple level, and half-power beamwidth of the variety of shaped backscatter are analytically determined using physical optics. In addition, the reflector which has appropriate characteristics for field radiating in large room will be constructed antenna model at 10 GHz. The reflector antenna will be realized and experimented to validate the technique and the developing analysis tool.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรม	
บทนำ.....	4
ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
สรุป	9
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน.....	10
วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์และฟังก์ชันกรีนไดแอดิก.....	12
หลักการสมมูล.....	26
แนวทางในการวิเคราะห์หาสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	29
ค่าลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน	34
สรุป	37
บทที่ 4 การสังเคราะห์และออกแบบสายอากาศตัวสะท้อน	
สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน	39
การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ค่าคุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อน	54
สรุป	61
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
วิธีการสร้างสายอากาศต้นแบบ	63
ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน	66
สรุป	69
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
สรุป	70
ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	71
ภาคผนวก	73
บรรณานุกรม	77
ประวัติผู้วิจัย	79

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนกับการสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่	2
รูปที่ 3.1 กระบวนการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์	11
รูปที่ 3.2 สนามสมมูลสำหรับสนาม \vec{E} และ \vec{H} ภายนอก	26
รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดและระบบพิกัด	40
รูปที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด	44
รูปที่ 4.3 วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน	47
รูปที่ 4.4 สายอากาศตัวสะท้อนและพื้นผิวสมมูล	47
รูปที่ 4.5 พื้นผิวสมมูลเพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อน	48
รูปที่ 4.6 เรขาคณิตของสายอากาศตัวสะท้อนในสองมิติและสามมิติ	49
รูปที่ 4.7 พิกัด x และ y บนอะเปอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด	51
รูปที่ 4.8 การชักตัวอย่างบนพื้นผิวตัวสะท้อน	52
รูปที่ 4.9 ระบบพิกัดเชิงขั้ว	52
รูปที่ 4.10 ผังงานในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน	54
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของอะเปอร์เจอร์ของสายอากาศตัวสะท้อน	55
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการวางของตัวป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเปอร์เจอร์สูงสุด	55
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และ $f/D = 0.5$	56
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน	56
รูปที่ 4.15 ระดับความพลั่ว	58
รูปที่ 5.1 โปรแกรม SolidWorks และ SolidCAM ในการออกแบบตัวสะท้อนแบบควอดเรติก	64
รูปที่ 5.2 G-code เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางวิ่งของการกัดโดยใช้เครื่องจักร CNC	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.3 สายอากาศตัวสะท้อนดินแบบ	66
รูปที่ 5.4 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในห้อง anechoic chamber	67
รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนแบบแบบควอดเรติกเมื่อ ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร	67

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การนำวิธีทัศนศาสตร์เชิงพีสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน	7
ตารางที่ 4.1 ระดับความพลิวเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพ ของอะเพอร์เจอร์สูงสุด	59
ตารางที่ 4.2 อัตราขยายสูงสุดเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพ ของอะเพอร์เจอร์สูงสุด	60
ตารางที่ 4.3 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเมื่อวางตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด	61
ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่าง สายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์ เชิงพีสิกส์	64
ตารางที่ 5.2 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่าง สายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร โดยการวัดทดสอบ	68
ตารางที่ 6.1 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติก	71

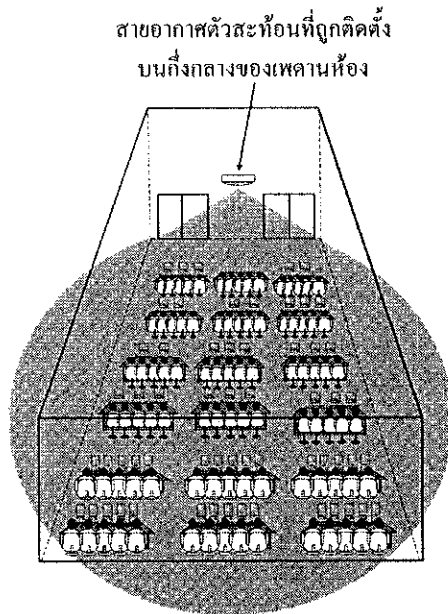
บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีโทรคมนาคมมีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมากในหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคโนโลยีทางการสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ที่มีการพัฒนามาตรฐานจาก 2G ไปเป็น 3G และกำลังมุ่งไปสู่ 4G ในอนาคตข้างหน้า เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบแพ็คเกจ (General Packet Radio Service: GPRS) ถือได้ว่าเป็นมาตรฐานของ 2.5G ที่จะช่วยให้โทรศัพท์มือถือสามารถให้บริการ โมบายล์อินเทอร์เน็ตได้ นอกจากนี้เทคโนโลยีทางด้านโทรศัพท์เซลลูลาร์แล้ว เทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงในขณะนี้คือ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) ซึ่งเป็นระบบเชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์หรือเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่ใช้สายเข้าด้วยกันหรือเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต โดยอาศัยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency: RF) รับส่งข้อมูลแทนสายเคเบิล กล่าวคือผู้ใช้งานสามารถเชื่อมโยงเข้ากับระบบเครือข่ายจากพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ในรัศมีของสัญญาณ และระบบยังสามารถแก้ปัญหาเรื่องการติดตั้งสายนำสัญญาณในพื้นที่ที่ทำได้ลำบาก นอกจากนี้ เทคโนโลยีทางด้าน WLAN ก็ได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ ๆ ออกมาหลายมาตรฐาน ซึ่งมุ่งที่จะเพิ่มอัตราเร็วของการส่งข้อมูลให้สูงขึ้นเป็นลำดับ และยังมีแนวคิดที่จะนำระบบ WLAN เข้ามาเสริมการให้บริการแก่ระบบเซลลูลาร์อีกด้วย จากความสำคัญดังกล่าว ทำให้มีการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ระบบ WLAN ออกมาเป็นจำนวนมาก สายอากาศนับเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นตัวช่วยให้อุปกรณ์ WLAN สามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปในอากาศทิศทางต่าง ๆ ได้ ซึ่งสามารถแบ่งสายอากาศออกตามการแพร่กระจายคลื่นได้คือ สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) เป็นสายอากาศที่มีลักษณะการกระจายคลื่นในแนวทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถบังคับทิศทางการรับส่งคลื่นได้ตามที่ต้องการ สายอากาศประเภทนี้นิยมใช้ในงานภายนอกอาคาร (outdoor) สำหรับการเชื่อมโยงแบบจุดไปจุด และอีกประเภทหนึ่งคือสายอากาศแบบรอบทิศทาง (omnidirectional antenna) เป็นสายอากาศที่มีลักษณะการกระจายคลื่นในแนวรอบ ๆ สายอากาศ โดยคลื่นจะถูกแพร่กระจายออกไปทุกทิศทาง ซึ่งสายอากาศประเภทนี้นิยมใช้งานภายในอาคาร (indoor) หรือใช้สำหรับการเชื่อมโยงแบบจุดไปหลายจุด โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ WLAN เช่น จุดเข้าถึงเครือข่าย (access point) และแลนดการ์ด ไร้สาย ส่วนใหญ่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งสายอากาศประเภทนี้ได้แก่ สายอากาศแบบไดโพลเส้นตรง (linear dipole) สายอากาศแบบร่อง (slot antenna) สายอากาศแบบบ่วง (loop antenna) สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) เป็นต้น ในการติดตั้งจุดเข้าถึงเครือข่าย จะถูกติดตั้งที่บริเวณผนังของห้องหรือ

อาคาร เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานโดยเปล่าประโยชน์ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ เช่น บริเวณที่ไม่มีผู้ใช้งานระบบ WLAN เป็นต้น นอกจากนี้ ถ้าต้องการกำหนดพื้นที่ใช้งานระบบ WLAN เช่น ต้องการให้สัญญาณครอบคลุมเฉพาะห้อง ๆ หนึ่งเท่านั้น สายอากาศเหล่านี้จึงไม่สามารถตอบสนองกับความต้องการได้จากข้อจำกัดและปัญหาดังกล่าว สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน (back-feed reflector antenna) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบ WLAN สำหรับใช้งานภายในอาคาร ที่ต้องการใช้สายอากาศเพียงตัวเดียวสำหรับแพร่กระจายคลื่นในห้องขนาดใหญ่ โดยสายอากาศจะถูกติดตั้งบนกึ่งกลางของเพดานห้อง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งลำคลื่นที่ส่งลงมาจะมีลักษณะครอบคลุมพื้นที่เป็นวงกลม ดังนั้นผู้ใช้งานระบบ WLAN ที่อยู่ภายในห้องนี้จะสามารถเชื่อมต่อกับจุดเข้าถึงเครือข่ายได้โดยใช้สายอากาศเพียงตัวเดียว นอกจากนี้สายอากาศดังกล่าวยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์กับดาวเทียมวงโคจรต่ำได้อีกด้วย เนื่องจากลำคลื่นให้พื้นที่ครอบคลุมเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ระยะเวลาในการสื่อสารระหว่างดาวเทียมและสถานีฐานบนพื้นดินได้นานขึ้น



รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนกับการสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์หาคุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน โดยทำการพิจารณาจากตัวสะท้อนที่มีผิวโค้งเปลี่ยนไปตาม

สมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบควอแดรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก เพื่อเปรียบเทียบว่าผิวโค้งแบบใดให้คุณลักษณะเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบ WLAN ซึ่งคุณลักษณะที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์หาข้อดีและข้อด้อยของผิวโค้งแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ระดับความพลิว (ripple level) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth) อัตราขยายสูงสุด (maximum gain) โดยสามารถหาคำตอบได้จากการใช้โปรแกรมจำลองผล หาผลเฉลยที่พัฒนาโดยใช้ ทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ (Physical Optics: PO) จากนั้นจะทำการเลือกตัวสะท้อนแบบผิวโค้งที่มีคุณลักษณะที่สอดคล้องกับความต้องการของระบบ WLAN มาสร้างสายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 10 GHz เพื่อนำไปวัดทดสอบคุณลักษณะเปรียบเทียบความแม่นยำจากโปรแกรมจำลองผลที่ได้จากวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 หาวิธีการพัฒนาและออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนสำหรับใช้งานกับการสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย
- 2.2 หาตัวสะท้อนแบบผิวโค้งที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นสายอากาศหลักสำหรับจุดเข้าถึงเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย
- 2.3 สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อศึกษาผลของการวัดทดสอบ โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 จำลองผลสำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์
- 3.2 ศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวสะท้อนแบบผิวโค้งที่มีรูปทรงตามสมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ
- 3.3 สร้างสายอากาศตัวสะท้อนต้นแบบ โดยเลือกตัวสะท้อนที่มีคุณลักษณะเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย รวมทั้งเปรียบเทียบผลจากการวัดและผลทางทฤษฎี

4. ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป และเป็นบริการความรู้แก่สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศ หน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์สื่อสารและโทรคมนาคม

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การเชื่อมต่อแบบจุดไปหลายจุด ต้องการสายอากาศที่ให้ ล้าคลื่นครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างและอัตราขยายค่อนข้างสูง โดยทั่วไปสายอากาศที่ใช้ในการ สื่อสารแบบไร้สาย เช่น ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย จะให้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบ ทิศทาง ทำให้ไม่เหมาะที่จะแผ่กระจายพลังงานภายในห้องขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้สายอากาศเพียง ตัวเดียว ดังกล่าวไว้ในบทที่ 1 วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือ การคิดค้นและพัฒนาวิธีการออกแบบ สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน โดยทำการสังเคราะห์พื้นผิว ของตัวสะท้อนที่มีรูปทรงเปลี่ยนไปตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ ผิวแบบควอดเรตติก พาราโบลิก ไฮเพอร์โบลิก และแบบทรงกลม เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณลักษณะ หาข้อดีและข้อด้อยของ พื้นผิวตัวสะท้อนแต่ละแบบ แล้วเลือกพื้นผิวตัวสะท้อนที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับเป็นจุดเข้าถึง ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย มาสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำจาก โปรแกรมจำลองผลที่ได้จากวิทยาศาสตร์เชิงพีสิกส์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจ และศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะ นำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มี ชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและ ต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศแบบต่าง ๆ รวมถึงสายอากาศตัวสะท้อนที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ใน ด้านการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ระบบเซลลูลาร์ และ ระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ข้อดีและข้อเสีย เพื่อที่จะนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับความต้องการดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ ระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

1. ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 ลักษณะสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย

การสื่อสารแบบไร้สายและโทรศัพท์เคลื่อนที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมากในขณะนี้ จึงทำให้มีการออกแบบสายอากาศออกมาจำนวนมากซึ่งยากที่จะกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่แน่นอนลงไป ในปัจจุบันสายอากาศที่นิยมนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายมากที่สุดคือ สายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และสายอากาศแบบสัญญาณต่ำ (low-profile antenna) เช่น สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) และสายอากาศระนาบอินเวอร์สเอฟ (Planar Inverted F Antenna: PIFA) ทั้งสามแบบนี้นิยมนำมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศแบบแรกคือ สายอากาศโมโนโพลนิยมใช้มากที่สุดเพราะมีน้ำหนักเบา คุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (broadband characteristics) และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน (Chen, Peng, and Liang, 2005) ส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่แผ่กระจายคลื่นถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวไม่ใช่ครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ถ้ามีระนาบกราวด์ที่กว้างจะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานแตกต่างจากระนาบกราวด์แบบอนันต์ สายอากาศแบบที่สองคือ สายอากาศแบบปลอก (Taguchi, Egashira, and Tanaka, 1991) มีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นเป็นไดโพลแบบไม่สมมาตรของตัวนำ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกมัดวงจรรอบลวดถักที่อยู่รอบ ๆ สายโคแอกเซียล สายอากาศนี้มีคุณลักษณะเหมือนสายอากาศแบบโมโนโพล ที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์ แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสียเมื่อนำไปใช้งาน โดยที่ต้องนำไปติดตั้งกับส่วนเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะทำให้อัตราการขยายลดลง ข้อเสียอีกอย่างของสายอากาศแบบโมโนโพลและสายอากาศแบบปลอกคือ โครงสร้างไม่แข็งแรงหักง่าย และการนำไปสร้างเป็นสายอากาศแบบสองความถี่เป็นไปได้ยาก แบบสุดท้ายคือ สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศแพทช์ (patch) มีโครงสร้างสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นส่วนของการแผ่กระจายคลื่นโดยมีส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรอง ไดอิเล็กตริกที่คั่นกลางระหว่างกราวด์กับส่วนของการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ (Jame and Hall, 1989) ส่วนสายอากาศระนาบอินเวอร์สเอฟ (Sim and Choi, 2006) มีลักษณะของแถบเส้นเป็นรูปตัวเอฟที่พัฒนามาจากสายอากาศแบบไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศระนาบอินเวอร์สเอฟมีข้อเสียคือ มีความกว้างแถบที่แคบ ซึ่งสายอากาศที่ได้กล่าวมาข้างต้นนิยมใช้เป็นจุดเข้าถึงเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายภายในอาคาร หรือใช้สำหรับการเชื่อมโยงแบบจุดไปหลายจุด โดยนิยมติดตั้งไว้ที่บริเวณผนังของตัวอาคาร จึงทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการใช้สายอากาศเพียงตัวเดียวในการแผ่กระจายพลังงานภายในห้องขนาดใหญ่ สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านการศึกษาแบบไร้สาย ได้แก่ สายอากาศตัวสะท้อนที่ใช้งานกับสถานีฐานในระบบเซลลูลาร์ (Bergmann, Hasselmann, Pereira, and Branco, 1998) โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วย ตัวสะท้อนที่มีรูปทรงเป็นแบบกรวย ตัวป้อนเป็นฮอร์นตามแกน (axial horn) นอกจากนี้ (Bergmann, Hasselmann, Pereira, and Branco, 2002) ได้มีการใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometrical Optics: GO) ในการปรับรูปทรงของพื้นผิวตัวสะท้อนเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานอยู่ในรูปของ โคเซกกำลังสองในระนาบแนวตั้ง (elevation angle) มีตัวป้อนเป็นฮอร์นรูปกรวยโคแอคเซียล (coaxial conical horn) ซึ่งจะให้แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบแนวมุมทิศ (azimuth angle) สำหรับสายอากาศตัวสะท้อนที่ใช้งานกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Smulders, Khusial, and Herben, 2001) ได้มีการออกแบบตัวสะท้อนโดยประยุกต์ใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ในการปรับรูปทรงของตัวสะท้อนแบบพาราโบลิกเพื่อให้ลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่ มีตัวป้อนเป็นฮอร์นลูกฟูกรูปกรวย (corrugated conical horn) ซึ่งออกแบบให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นวงกลมสมมาตร นอกจากนี้สายอากาศตัวสะท้อนยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (preliminary design report, 2005) โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบด้วยตัวสะท้อนแบบพาราโบลิกที่มีการปรับรูปทรงเพื่อให้ลำคลื่นแมตช์กับพื้นโลก (earth matched beam) และมีส่วนป้อนเป็นฮอร์นแถบคู่ (dual-band horn)

ในงานวิจัยนี้เสนอการสังเคราะห์พื้นผิวของตัวสะท้อนที่มีรูปทรงเปลี่ยนไปตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ รวมทั้งหาข้อดีและข้อเสียของตัวสะท้อนแต่ละแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกนำไปใช้เป็นประโยชน์สำหรับจุดเข้าถึงเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่ หรือใช้ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

1.2 ระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

ระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนนับว่าเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาสมรรถนะและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นแก่สายอากาศตัวสะท้อน อาทิเช่น อัตราขยายในแนวการโพลาริเซชันร่วมและการโพลาริเซชันไขว้ และประสิทธิภาพต่าง ๆ เป็นต้น จึงมีงานวิจัยมากมายที่ได้นำเสนอการประยุกต์กรรมวิธี สมมุติฐาน และทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อให้การทำนายมีความแม่นยำหรือความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสนามที่กระเจิงจากสายอากาศตัวสะท้อนแบ่งออกเป็นสามวิธี ได้แก่ วิธีแรกคือ วิธีสนามอะเพอร์เจอร์ (aperture field method) วิธีนี้จะให้ความถูกต้องในช่วงลำคลื่นพหุหลักและพหุข้างแรก ๆ เท่านั้น (Silver, 1949) วิธีที่สองคือ วิธีกระแสเหนี่ยวนำ (induced current method) เป็นวิธีที่ง่ายในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการหากระแสเหนี่ยวนำที่เกิดบนพื้นผิว

ของตัวสะท้อน เช่น วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ (Silver, 1949) ซึ่งวิธีนี้จะให้สนามที่แผ่กระจายจากตัวสะท้อนมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดทดสอบ และวิธีสุดท้ายคือ วิธีการเลี้ยวเบนที่ขอบ (edge diffraction method) โดยการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction: GTD) ถึงแม้วิธีนี้จะค่อนข้างแม่นยำ แต่ก็มีข้อเสียที่สำคัญคือ การทำนายสนามมีค่าเป็นอนันต์ที่จุดตัดและ (caustics) ซึ่งอาจเกิดการตัดกันของรังสีทำให้ไม่สามารถคำนวณสนามที่จุดสังเกตขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจุดที่เกิดการสะท้อน นอกจากนี้ข้อเสียดังกล่าวยังไม่สามารถถูกกำจัดออกไปได้โดยใช้รูปแบบของการสม่ำเสมอ (uniform versions) เช่น ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตสม่ำเสมอ (Uniform Geometrical Theory of Diffraction: UTD) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศแต่ละรูปแบบ จากงานวิจัย (Viskum and Wolf, 1993) ได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวสะท้อนคู่คี่รูปแบบไม่สมมาตรสำหรับลำคลื่นแบบวงรีระหว่างวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์กับวิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต พบว่าอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วมมีความไม่สอดคล้องกันตั้งแต่บริเวณพหุหลัก และแตกต่างกันค่อนข้างมากตั้งแต่บริเวณพหุข้างองศาใกล้ ๆ ไปจนถึงองศาไกล โดยสรุปว่ากรรมวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มีความแม่นยำกว่าเนื่องจากใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการวัด ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน

ตารางที่ 2.1 การนำวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
G. L. JAMES และ V. Kerdemelidis	วิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนโดยใช้วิธีการระดมมูลที่ขอบ โดยเปรียบเทียบกับวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์	1973
W. V. T. Rusch I	เปรียบเทียบการหาปริพันธ์ของวิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงฟิสิกส์	1974
Y. Rahmat-Smaii และ V. Galindo-Isreal	ประยุกต์ใช้นุกรมจาโคบี-เบสเซล (jacobi-bessel series) กับผลการแปลงฟูริเยร์ (fourier transforms) ของวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนคู่แบบไม่สมมาตร	1980
Y. Rahmat-Smaii และ V. Galindo-Isreal	เปรียบเทียบการคำนวณหาสนามระหว่างวิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตและวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ของสายอากาศตัวสะท้อนแบบไม่สมมาตร พบว่าวิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตเกิดความผิดพลาดในการหาแบบรูปการแผ่พลังงานบริเวณพหุข้างและองศาที่ห่างลำคลื่นหลัก	1984

ตารางที่ 2.1 การนำวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
T. Griesser และ C. A. Balanis	นำเสนอการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตและวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการคำนวณหาสนามกระจัดกระจายกลับ (backscatter fields) จากแผ่นสะท้อนมีมุมรูปสามเหลี่ยม (triangular corner reflector)	1985
T. Griesser และ C. A. Balanis	นำเสนอการวิเคราะห์ตัวสะท้อนสองแผ่นแบบมีมุม (dihedral corner reflector) โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงฟิสิกส์ ในการวิเคราะห์หาคัดขวางการกระจัดกระจายกลับ (backscatter cross section) ของตัวสะท้อนแบบมีมุม เมื่อมีมุมต่าง ๆ กัน ได้แก่ 77° , 90° และ 98°	1987
L. C. Silva และ คณะ	ทำการวิเคราะห์และสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนสำหรับใช้งานในย่านไมโครเวฟ รวมทั้งทำการออกแบบระบบป้อนสัญญาณของพอนาคัลลิน และทำการหาแบบรูปการแผ่พลังงานโดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์	2001
J.R. Bermann และ คณะ	ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ (MoM) ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมแบบรอบทิศทางเปรียบเทียบกับวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์	2002
J. A. M. Lorenzo	นำเสนอซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์หาคะแสเหนี่ยวนำของสายอากาศตัวสะท้อน (Induced-Current Analysis of Reflector Antenna: ICARA) โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ในการทำนายพฤติกรรมของสายอากาศ	2005

นอกจากนี้ยังมีหนังสือที่เกี่ยวข้องกับ การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนโดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ได้แก่ “Antenna Engineering Using Physical Optics: Practical CAD Techniques and Software” (Diaz and Milligan, 1996) ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า การคำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน เป็นต้น เล่มต่อมาเขียนโดย (Scott, 1990) หนังสือชื่อ “Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design” โดยมีเนื้อหาเกี่ยวกับพื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน วิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ รวมทั้งการออกแบบระบบสายอากาศ และหนังสือเล่มต่อมาชื่อ “Analysis of Reflector Antennas” เขียน โดย (Rusch and Potter,

1970) ได้อธิบายการวิเคราะห์หาสนามที่กระจัดกระจายจากตัวสะท้อน การหาแบบรูปการแผ่พลังงาน และคุณลักษณะของสายอากาศ เป็นต้น

2. สรุป

สายอากาศที่ใช้งานด้านการสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพล สายอากาศแบบปลอก สายอากาศแบบสัญญาณต่ำ เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเหล่านี้เป็นแบบรอบทิศทาง ทำให้สูญเสียกำลังงานโดยเปล่าประโยชน์ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ จึงไม่เหมาะที่จะเป็นสายอากาศหลักสำหรับจุดเข้าถึงเครือข่ายในท้องถิ่นขนาดใหญ่ ที่ต้องการสายอากาศเพียงตัวเดียวในการแผ่พลังงานภายในห้อง ดังนั้นสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้กับการสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ในงานวิจัยนี้นำเสนอการสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนที่มีรูปทรงเปลี่ยนไปตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ รวมทั้งหาข้อดีและข้อเสียของตัวสะท้อนแต่ละแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกนำไปใช้เป็นประโยชน์สำหรับระบบสื่อสารแบบไร้สาย เช่น นำไปใช้เป็นจุดเข้าถึงเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในท้องถิ่นขนาดใหญ่ เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มีความแม่นยำในการทำนายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ซึ่งเป็นวิธีแม่นยำตรงในการวิเคราะห์สายอากาศ

บทที่ 3

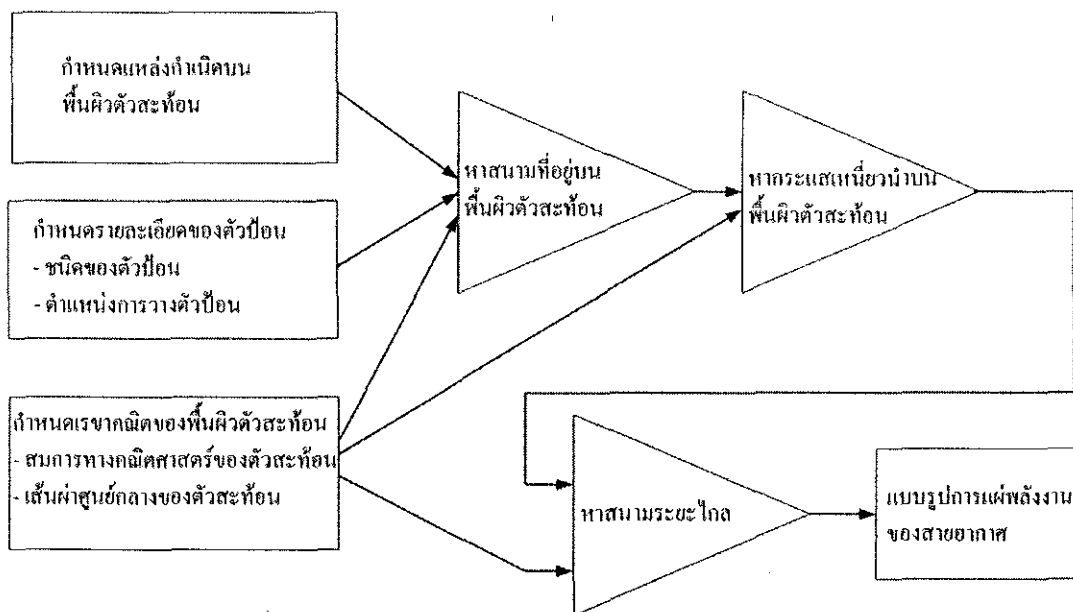
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

นับตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่สองเป็นต้นมา สายอากาศตัวสะท้อนถูกนำมาใช้ในการสื่อสารอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสายอากาศตัวสะท้อนมีอัตราขยายสูง สามารถส่งสัญญาณได้เป็นระยะทางไกล ๆ จึงทำให้มีการพัฒนาวิธีเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนขึ้นมาจำนวนมาก การใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศสามารถทำได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นสายอากาศตัวสะท้อนสำหรับการสื่อสารอวกาศแทบทั้งหมดจึงมีการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนได้ เช่น วิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศแต่ละรูป ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง กระบวนการในการวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศตัวสะท้อนโดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ซึ่งจะแสดงการหาที่มาของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในบทที่ 4 โดยเริ่มต้นจากการใช้ทฤษฎีและหลักการของฟังก์ชันกรีน ฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ ฟังก์ชันกรีนไดแอดิก หลักการสมมูล การหากระแสสมมูล จนได้ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล จากนั้นจะนำผลเฉลยที่ได้ไปเขียนเป็นฟังก์ชันหรือชุดคำสั่งย่อย โดยใช้ชื่อว่า เวกเตอร์ตัวแผ่กระจายคลื่น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน สุดท้ายจะอธิบายถึงค่าลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศ และบทสรุป

1. การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

วิธีทัศนศาสตร์ฟิสิกส์เป็นกรรมวิธีวิเคราะห์สายอากาศย่านความถี่สูง ที่ใช้การประมาณค่าของกระแสสมมูลบนผิวดำนำไฟฟ้าสมบูรณ์ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น โดยสามารถใช้หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กย่านสนามระยะไกลจากการหาปริพันธ์ของกระแสสมมูลบนผิวดำนำด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในการวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศตัวสะท้อน เริ่มจากการกำหนดรายละเอียดของพื้นผิวดำสะท้อน ได้แก่ สมการพื้นผิว เส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น และชนิดของแหล่งกำเนิดกระแสหรือชนิดของตัวป้อน (feed) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 หลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนคือ การหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแส (source current) ที่อยู่บนผิวของตัวสะท้อน โดยกระแสเหนี่ยวนำบนผิวดำสะท้อนจะหาได้จากองค์ประกอบของสนามตกกระทบในแนวสัมผัสแต่ละจุดที่กระทำบนผิวดำสะท้อน ซึ่งกระแสเหล่านี้จะก่อให้เกิด

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปในสนามระยะไกลทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ กระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปเป็นไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1 สำหรับนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยบล็อกสี่เหลี่ยมแสดงข้อมูลที่ต้งใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ และบล็อกสามเหลี่ยมแสดงฟังก์ชันที่ใช้ในการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่าฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่น (propagator function) ซึ่งสามารถหาสนามได้โดยการรวมสนามที่แผ่กระจายเนื่องจากแหล่งกำเนิดแต่ละแหล่ง ซึ่งกระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวสะท้อน สนามดังกล่าวเกิดจากการแบ่งซีกตัวอย่าง (sample) แหล่งกำเนิดขนาดหนึ่งหน่วย จึงจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันกรีน (Green's function) เพราะว่าฟังก์ชันกรีนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดกระแสและสนาม เนื่องจากแหล่งกำเนิดกระแสเป็นเวกเตอร์สามมิติ จึงทำให้สนามที่แผ่กระจายเป็นเวกเตอร์สามมิติด้วย ดังนั้นฟังก์ชันกรีนจะต้องประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละองค์ประกอบของแหล่งกำเนิด และแต่ละองค์ประกอบของสนามเป็นจำนวน 9 ตัว โดยจะถูกแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ขนาด 3x3 เรียกว่า ไดแอด (dyad) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 กระบวนการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

ปัจจัยเริ่มต้นในการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศตัวสะท้อน มีดังนี้

1.1 ความถี่ปฏิบัติการ

ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ดาวเทียมไทยคมที่ใช้ในระบบสื่อสารสำหรับประเทศไทย ความถี่ปฏิบัติการจะอยู่ที่ย่าน Ku (12-14 GHz) ระบบการสื่อสารเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายย่านความถี่ 2.4 GHz (2412-2484 MHz) สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11b และย่านความถี่ 5.2 GHz (5150-

5350 MHz) สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11a เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ความถี่ 10 GHz ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนต้นแบบ เนื่องจากมีอุปกรณ์เครื่องมือวัดสำหรับสนับสนุนการวิจัยอยู่ในห้องปฏิบัติการแล้ว

1.2 สายอากาศป้อน

สายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นแหล่งกำเนิดขั้นปฐมภูมิ (primary source) ของสายอากาศตัวสะท้อน ชนิดของสายอากาศป้อนมีหลายชนิด อาทิเช่น สายอากาศแบบไอโซทรอปิก สายอากาศแบบโคไซน์ยกกำลังต่าง ๆ สายอากาศฮอยเกน สายอากาศปากแตร สายอากาศไดโพลขนาดสั้นมาก แบบจำลองคณิตศาสตร์ง่าย ๆ เช่น ลำคลื่นแบบเกาส์ (gaussian beam) เป็นต้น นอกจากนี้การกำหนดมุมเล็ง และตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นก็มีผลต่อประสิทธิภาพช่องเปิดของสายอากาศตัวสะท้อน ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดมาตรฐาน ปฏิบัติงานในย่านความถี่ 10 GHz เนื่องจากมีสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดอยู่ในห้องปฏิบัติการแล้ว

1.3 ข้อมูลเริ่มต้นของตัวสะท้อน

สำหรับพื้นผิวของตัวสะท้อนที่นำมาสังเคราะห์หาข้อดีและข้อเสียในงานวิจัยฉบับนี้ได้แก่ ผิวแบบควอดเรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยกำหนดให้มีอะเพอร์เจอร์เป็นวงกลม และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10λ

2. ทศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์และฟังก์ชันกรีนไดแอดิก

ทศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข (Silver, 1949) ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงถึงการหาที่มาของผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากการใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) เพื่อทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณอวกาศว่างดังแสดงในสมการ (3.1) และ (3.2)

$$j\omega\epsilon\vec{E} - \nabla \times \vec{H} = -\vec{J} \quad (3.1)$$

$$j\omega\mu\vec{H} + \nabla \times \vec{E} = -\vec{M} \quad (3.2)$$

กำหนดให้ $\vec{J}(\vec{r}')$ และ $\vec{M}(\vec{r}')$ เป็นเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กที่กระจายที่ตำแหน่ง \vec{r}' ใด ๆ เมื่อ $\vec{r}' = x'\hat{a}_x + y'\hat{a}_y + z'\hat{a}_z$ แสดงถึงเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดกระแสที่ถูกชักตัวอย่าง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแส $\vec{J}(\vec{r}')$ และ

$M(\vec{r}')$ สามารถหาได้โดยการอินทิเกรตสนามที่เกิดขึ้นจากการแบ่งชั้กตัวอย่างแหล่งกำเนิดกระแสดังขนาดหนึ่งหน่วยหรือเรียกว่าการตอบสนองอิมพัลส์ (impulse responses)

$$\bar{E}(\vec{r}) = \iiint [\bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) + \bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))] dx' dy' dz' \quad (3.3)$$

$$\bar{H}(\vec{r}) = \iiint [\bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) + \bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))] dx' dy' dz' \quad (3.4)$$

เมื่อ $\bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}'))$ และ $\bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))$ เป็นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่จุดสังเกต \vec{r} ที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กแบบอิมพัลส์ (impulsive current) และ $\bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}'))$ และ $\bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))$ เป็นเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กแบบอิมพัลส์ จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่กระชับขึ้นได้คือ

$$\bar{E}(\vec{r}) = \iint [\bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) + \bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))] dV' \quad (3.5)$$

$$\bar{H}(\vec{r}) = \iint [\bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) + \bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))] dV' \quad (3.6)$$

เมื่อ $dV' = dx' dy' dz'$, \vec{r} เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดสังเกต, \vec{r}' เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิด, $\bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}'))$, $\bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))$, $\bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}'))$ และ $\bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}'))$ เป็นสนามที่เกิดจากการแบ่งชั้กตัวอย่างของกระแสที่อยู่บนพื้นผิวตัวสะท้อนที่ตำแหน่ง \vec{r}' , ตัวห้อย I ในสมการ (3.5) และ (3.6) แสดงถึงฟังก์ชันการตอบสนองอิมพัลส์ เพื่อใช้ในการระบุการชั้กตัวอย่างของกระแส ตำแหน่งของจุดสังเกต และตำแหน่งของแหล่งกำเนิด

ฟังก์ชันไคเรลเดลตา (dirac delta function) ได้ถูกนำมาใช้ในการชั้กตัวอย่างของแหล่งกำเนิดที่กระจายอยู่บนพื้นผิวตัวสะท้อน ซึ่งเขียนอยู่ในรูปอินทิกรัลได้คือ

$$\iiint \delta(r) dx dy dz = 1$$

เมื่อ r คือ ความยาวของเวกเตอร์รัศมี $r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

ฟังก์ชัน $\delta(\vec{r} - \vec{r}') = \delta(x - x')\delta(y - y')\delta(z - z')$ เป็นฟังก์ชันไคเรลเดลตาแบบสามมิติ และมีค่าเป็นศูนย์ทุก ๆ ที่ ยกเว้นที่ตำแหน่ง $\vec{r} = \vec{r}'$ สามารถเขียนในรูปอินทิกรัลได้คือ

$$\int \delta(\vec{r} - \vec{r}') dV' = \iiint \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') dx' dy' dz' = 1$$

ดังนั้นเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดกระแสอิมพัลส์ สามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้คือ

$$j\omega \varepsilon \bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) - \nabla \times \bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) = -\bar{J}(\vec{r}') \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (3.7)$$

$$j\omega \mu \bar{H}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) + \nabla \times \bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) = 0 \quad (3.8)$$

$$j\omega \varepsilon \bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}')) - \nabla \times \bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}')) = 0 \quad (3.9)$$

$$j\omega \mu \bar{H}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}')) + \nabla \times \bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}')) = -\bar{M}(\vec{r}') \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (3.10)$$

2.1 ฟังก์ชันกรีน

ฟังก์ชันกรีนเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ฟังก์ชันขับเป็นฟังก์ชันอิมพัลส์หรือฟังก์ชันไดเรคเดลตา เพื่อหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งสามารถหาคำตอบของฟังก์ชันขับจริงได้โดยการทับซ้อนของฟังก์ชันกรีนกับฟังก์ชันขับ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่รู้จักกันว่าฟังก์ชันกรีนเป็นฟังก์ชันตอบสนองอิมพัลส์ หรือฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ในทฤษฎีระบบหรือทฤษฎีวงจร

ฟังก์ชันกรีนเป็นสนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดขนาดหนึ่งหน่วยหรือการตอบสนองอิมพัลส์ของอวกาศว่าง (Harrington, 1961) ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งกำเนิดและสนาม การทับซ้อนของฟังก์ชันกรีนไดเรคติกจากแหล่งกำเนิดกระแสแต่ละจุดที่กระจายอยู่จะทำให้ได้การแผ่กระจายของสนามรวม ดังนั้นการกระจายของกระแสจากแหล่งกำเนิดจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่จะต้องรู้

การหาเวกเตอร์การแผ่กระจายของสนามสามารถหาได้จากการคูณฟังก์ชันกรีนกับเวกเตอร์ของจุดแหล่งกำเนิดกระแส (Felsen and Marcuvitz, 1973) (Balanis, 1989) ดังนั้นจะได้สนามที่เกิดจากการชักตัวอย่างแหล่งกำเนิดกระแสคือ

$$\bar{E}_{lc}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{J}(\vec{r}')) = -\bar{G}_{El}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \bar{J}(\vec{r}') \quad (3.11)$$

$$\bar{E}_{lm}(\vec{r}, \vec{r}', \bar{M}(\vec{r}')) = -\bar{G}_{EM}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \bar{M}(\vec{r}') \quad (3.12)$$

$$\bar{H}_{le}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{J}(\bar{r}')) = -\bar{G}_{Hl}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') \quad (3.13)$$

$$\bar{H}_{lm}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{M}(\bar{r}')) = -\bar{G}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{M}(\bar{r}') \quad (3.14)$$

โดยที่ \bar{G}_{EJ} คือ ฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า
 \bar{G}_{EM} คือ ฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็ก
 \bar{G}_{HJ} คือ ฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า
 \bar{G}_{HM} คือ ฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็ก

ตัวอย่างสำหรับฟังก์ชันกรีนซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

$$\bar{G}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') = \begin{bmatrix} G_{EJxx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJxy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJxz}(\bar{r}, \bar{r}') \\ G_{EJyx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJyy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJyz}(\bar{r}, \bar{r}') \\ G_{EJzx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJzy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJzz}(\bar{r}, \bar{r}') \end{bmatrix}$$

ซึ่งฟังก์ชันกรีนตัวอื่นก็อยู่ในรูปแบบเดียวกัน ผลคูณเชิงสเกลาร์ (dot product) ของไดแอดและเวกเตอร์จะให้ผลลัพธ์จากการคูณเป็นปริมาณเวกเตอร์แสดงได้คือ

$$\bar{G}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') = \begin{bmatrix} G_{EJxx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJxy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJxz}(\bar{r}, \bar{r}') \\ G_{EJyx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJyy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJyz}(\bar{r}, \bar{r}') \\ G_{EJzx}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJzy}(\bar{r}, \bar{r}') & G_{EJzz}(\bar{r}, \bar{r}') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{J}_x(\bar{r}') \\ \bar{J}_y(\bar{r}') \\ \bar{J}_z(\bar{r}') \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

องค์ประกอบของไดแอดสามารถแสดงอยู่ในรูปแบบขององค์ประกอบเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{aligned} \bar{G} &= \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix} \\ &= G_{xx} \hat{a}_x \hat{a}_x + G_{xy} \hat{a}_x \hat{a}_y + G_{xz} \hat{a}_x \hat{a}_z \\ &\quad + G_{yx} \hat{a}_y \hat{a}_x + G_{yy} \hat{a}_y \hat{a}_y + G_{yz} \hat{a}_y \hat{a}_z \\ &\quad + G_{zx} \hat{a}_z \hat{a}_x + G_{zy} \hat{a}_z \hat{a}_y + G_{zz} \hat{a}_z \hat{a}_z \end{aligned} \quad (3.16)$$

เมื่อองค์ประกอบ เช่น $\hat{a}_x\hat{a}_x, \hat{a}_x\hat{a}_y$ แสดงถึงเมตริกซ์ขนาด 3×3 ซึ่งองค์ประกอบภายในเมตริกซ์จะเป็นศูนย์ทุกตำแหน่งยกเว้นที่ตำแหน่งที่มีค่าตรรกะนี้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\hat{a}_x\hat{a}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ และ } \hat{a}_x\hat{a}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยถูกกำหนดโดย

$$\hat{i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \hat{a}_x\hat{a}_x + \hat{a}_y\hat{a}_y + \hat{a}_z\hat{a}_z$$

เวกเตอร์ศูนย์ถูกกำหนดโดย

$$\hat{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.11) ถึง (3.14) ลงในสมการที่ (3.5) และ (3.6) เพื่อหาการแผ่กระจายพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการกระจายของแหล่งกำเนิดกระแส (Felsen and Marcuvitz, 1973) จะได้

$$\bar{E}(\bar{r}) = -\int \bar{G}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') dV' - \int \bar{G}_{EM}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{M}(\bar{r}') dV' \quad (3.17)$$

$$\bar{H}(\bar{r}) = -\int \bar{G}_{HJ}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') dV' - \int \bar{G}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{M}(\bar{r}') dV' \quad (3.18)$$

ดังนั้นถ้ารู้ฟังก์ชันกรีนไดโอดิกในสมการที่ (3.17) และ (3.18) จะสามารถหาการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งฟังก์ชันกรีนจะหาได้จากเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดกระแสที่ได้มีการชักตัวอย่างและรวมกันทางเวกเตอร์ และฟังก์ชันกรีนไดโอดิกจะหาได้จากผลเฉลยของสมการแมกเวลล์สำหรับการกระตุ้นด้วยอิมพัลส์

2.2 ฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์

ในส่วนนี้จะแสดงถึงการหาที่มาของฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ เนื่องจากฟังก์ชันกรีนไดโอดิกจะใช้กับการชักตัวอย่างของกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กเพื่อหาการแผ่กระจายพลังงานของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชันกรีนสามารถหาได้จากการแทนสมการที่ (3.11) ถึง (3.14) ในสมการ (3.7) ถึง (3.10) คือ

$$j\omega\varepsilon\overline{\overline{G}}_{EJ}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{J}}(\vec{r}')-\nabla\times\overline{\overline{G}}_{HJ}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{J}}(\vec{r}')=\overline{\overline{J}}(\vec{r}')\delta(\vec{r}-\vec{r}') \quad (3.19)$$

$$j\omega\mu\overline{\overline{G}}_{HJ}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{J}}(\vec{r}')+\nabla\times\overline{\overline{G}}_{EJ}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{J}}(\vec{r}')=0 \quad (3.20)$$

$$j\omega\varepsilon\overline{\overline{G}}_{EM}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{M}}(\vec{r}')-\nabla\times\overline{\overline{G}}_{HM}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{M}}(\vec{r}')=0 \quad (3.21)$$

$$j\omega\mu\overline{\overline{G}}_{HM}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{M}}(\vec{r}')+\nabla\times\overline{\overline{G}}_{EM}(\vec{r},\vec{r}')\cdot\overline{\overline{M}}(\vec{r}')=\overline{\overline{M}}(\vec{r}')\delta(\vec{r}-\vec{r}') \quad (3.22)$$

เมื่อเทอมของ 0 ของสมการ (3.20) ถึง (3.21) แทนเวกเตอร์ศูนย์ และสมการ (3.19) ถึง (3.22) สามารถกำจัดเวกเตอร์แหล่งกำเนิดได้คือ

$$j\omega\varepsilon\overline{\overline{G}}_{EJ}(\vec{r},\vec{r}')-\nabla\times\overline{\overline{G}}_{HJ}(\vec{r},\vec{r}')=\overline{\overline{1}}\delta(\vec{r}-\vec{r}') \quad (3.23)$$

$$j\omega\mu\overline{\overline{G}}_{HJ}(\vec{r},\vec{r}')+\nabla\times\overline{\overline{G}}_{EJ}(\vec{r},\vec{r}')=\overline{\overline{0}} \quad (3.24)$$

$$j\omega\varepsilon\overline{\overline{G}}_{EM}(\vec{r},\vec{r}')-\nabla\times\overline{\overline{G}}_{HM}(\vec{r},\vec{r}')=\overline{\overline{0}} \quad (3.25)$$

$$j\omega\mu\overline{\overline{G}}_{HM}(\vec{r},\vec{r}')+\nabla\times\overline{\overline{G}}_{EM}(\vec{r},\vec{r}')=\overline{\overline{1}}\delta(\vec{r}-\vec{r}') \quad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) จะได้ความสัมพันธ์

$$\overline{\overline{G}}_{HJ}(\vec{r},\vec{r}')=-\frac{1}{j\omega\mu}\nabla\times\overline{\overline{G}}_{EJ}(\vec{r},\vec{r}') \quad (3.27)$$

$$\bar{\bar{G}}_{EM}(\bar{r}, \bar{r}') = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{\bar{G}}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') \quad (3.28)$$

จากนั้นนำสมการ (3.27) แทนลงใน (3.23) และแทนสมการ (3.28) แทนลงใน (3.26) และใช้เวกเตอร์เอกลักษณ์ $\nabla \times \nabla \times A = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ จะได้

$$\nabla \nabla \cdot \bar{\bar{G}}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') - \nabla^2 \bar{\bar{G}}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') - k^2 \bar{\bar{G}}_{EJ}(\bar{r}, \bar{r}') = j\omega\mu \bar{\bar{I}} \delta(\bar{r} - \bar{r}') \quad (3.29)$$

$$\nabla \nabla \cdot \bar{\bar{G}}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') - \nabla^2 \bar{\bar{G}}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') - k^2 \bar{\bar{G}}_{HM}(\bar{r}, \bar{r}') = j\omega\epsilon \bar{\bar{I}} \delta(\bar{r} - \bar{r}') \quad (3.30)$$

จากสมการที่ (3.29) และ (3.30) สามารถแก้สมการได้คือ

$$\bar{\bar{G}}_{EJ} = -j\omega\mu \left(\bar{\bar{I}} + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right) \frac{\delta(\bar{r} - \bar{r}')}{(\nabla^2 + k^2)} \quad (3.31)$$

$$\bar{\bar{G}}_{HM} = -j\omega\epsilon \left(\bar{\bar{I}} + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right) \frac{\delta(\bar{r} - \bar{r}')}{(\nabla^2 + k^2)} \quad (3.32)$$

จะสังเกตได้ว่าสมการที่ (3.31) และ (3.32) จะประกอบด้วย $-\frac{\delta(\bar{r} - \bar{r}')}{(\nabla^2 + k^2)}$ ซึ่งจะเรียกแฟกเตอร์นี้ว่า

ฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ (scalar Green's function) โดยกำหนดเป็น

$$g(\bar{r} - \bar{r}') = -\frac{\delta(\bar{r} - \bar{r}')}{(\nabla^2 + k^2)} \quad (3.33)$$

จากสมการ (3.33) จะได้

$$(\nabla^2 + k^2)g(\bar{r} - \bar{r}') = -\delta(\bar{r} - \bar{r}') \quad (3.34)$$

ซึ่งคำตอบของสมการ (3.34) ในอวกาศว่างคือ

$$g(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (3.35)$$

เมื่อ $\bar{R} = \bar{r} - \bar{r}'$ เป็นเวกเตอร์ระหว่างจุดกำเนิดและจุดของสนาม และ $R = |\bar{R}| = |\bar{r} - \bar{r}'| \neq 0$

2.3 ฟังก์ชันกรีนไดแอติก

การหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (3.17) และ (3.18) ซึ่งจะต้องรู้ฟังก์ชันกรีนไดแอติก โดยฟังก์ชันกรีนไดแอติกรูปแบบเต็มในอวกาศว่างหาที่มาจากภาคผนวก ก คือ

$$\bar{G}_{EJ}(\bar{R}) = j\omega\mu \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \left[(\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \left(1 - \frac{1}{k^2 R^2} - j \frac{1}{kR} \right) + \hat{R}\hat{R} \left(\frac{2}{k^2 R^2} + j \frac{2}{kR} \right) \right] \quad (3.36)$$

$$\bar{G}_{HM}(\bar{R}) = j\omega\varepsilon \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \left[(\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \left(1 - \frac{1}{k^2 R^2} + j \frac{1}{kR} \right) + \hat{R}\hat{R} \left(\frac{2}{k^2 R^2} + j \frac{2}{kR} \right) \right] \quad (3.37)$$

$$\bar{G}_{HJ}(\bar{R}) = \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{1} \quad (3.38)$$

$$\bar{G}_{EM}(\bar{R}) = - \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{1} \quad (3.39)$$

เมื่อไดแอติก $\hat{R}\hat{R}$ กำหนดโดย

$$\hat{R}\hat{R} = \begin{bmatrix} R_{ux}^2 & R_{ux}R_{uy} & R_{ux}R_{uz} \\ R_{uy}R_{ux} & R_{uy}^2 & R_{uy}R_{uz} \\ R_{uz}R_{ux} & R_{uz}R_{uy} & R_{uz}^2 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $R_{ux} = (x - x')/R$, $R_{uy} = (y - y')/R$ และ $R_{uz} = (z - z')/R$ เป็นองค์ประกอบพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉากของ \hat{R} ส่วนขยายของ (3.36) ถึง (3.39) ถูกแสดงในภาคผนวก ก

สนามที่แผ่กระจายโดยแหล่งกำเนิดกระแสฮิมพัลส์สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกตคือ

$$\bar{E}_{lc}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{J}(\bar{r}')) = \bar{E}_{lc}(\bar{R}, \bar{J}) = -\bar{G}_{EJ}(\bar{R}) \cdot \bar{J} \quad (3.40)$$

$$\bar{H}_{lm}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{M}(\bar{r}')) = \bar{H}_{lm}(\bar{R}, \bar{M}) = -\bar{G}_{HM}(\bar{R}) \cdot \bar{M} \quad (3.41)$$

$$\bar{H}_{lc}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{J}(\bar{r}')) = \bar{H}_{lc}(\bar{R}, \bar{J}) = -\bar{G}_{HJ}(\bar{R}) \cdot \bar{J} \quad (3.42)$$

$$\bar{E}_{lm}(\bar{r}, \bar{r}', \bar{M}(\bar{r}')) = \bar{E}_{lm}(\bar{R}, \bar{M}) = -\bar{G}_{EM}(\bar{R}) \cdot \bar{M} \quad (3.43)$$

ดังนั้นสามารถหาผลเฉลยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กได้คือ

$$\begin{aligned} \bar{E}_e(\bar{r}, \bar{J}) &= -\int \bar{G}_{EJ}(\bar{R}) \cdot \bar{J}(\bar{r}') dS' \\ &= -j\omega\mu \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{J}(\bar{r}') \left(1 - \frac{1}{k^2 R^2} - j\frac{1}{kR}\right) dS' \\ &\quad - j\omega\mu \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R}\hat{R} \cdot \bar{J}(\bar{r}') \left(\frac{2}{k^2 R^2} + j\frac{2}{kR}\right) dS' \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} \bar{H}_m(\bar{r}, \bar{M}) &= -\int \bar{G}_{HM}(\bar{R}) \cdot \bar{M}(\bar{r}') dS' \\ &= -j\omega\varepsilon \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{M}(\bar{r}') \left(1 - \frac{1}{k^2 R^2} - j\frac{1}{kR}\right) dS' \\ &\quad - j\omega\varepsilon \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R}\hat{R} \cdot \bar{M}(\bar{r}') \left(\frac{2}{k^2 R^2} + j\frac{2}{kR}\right) dS' \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\bar{H}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -\int \bar{G}_{HJ}(\bar{R}) \cdot \bar{J}(\bar{r}') dS' = -\int \left(\frac{1}{R} + jk\right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.46)$$

$$\bar{E}_m(\bar{r}, \bar{M}) = -\int \bar{G}_{EM}(\bar{R}) \cdot \bar{M}(\bar{r}') dS' = \int \left(\frac{1}{R} + jk\right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.47)$$

โดยที่แหล่งกำเนิดถูกสมมติว่ากระจายอยู่บนพื้นผิว และทำการอินทิเกรตแหล่งกำเนิดที่อยู่บนพื้นผิว S' เนื่องจากสมการ (3.44) และ (3.45) มีความยุ่งยาก จึงเลือกใช้สมการ (3.46) และ (3.47)

ในการเริ่มต้นหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและจากนั้นจะใช้สมการแมกซ์เวลล์เพื่อให้ได้คำตอบของสมการ (3.44) และ (3.45)

2.4 การหาสนามที่บริเวณสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล

ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าโดยใช้วิธีทศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ หาได้จาก การนำฟังก์ชันกรีนไดโอดิกคูณกับกระแสทุก ๆ จุดบนพื้นผิว ดังแสดงในสมการ (3.44) ถึง (3.47) โดยสมการนี้สามารถหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุก ๆ บริเวณ จะสังเกตได้ว่าจากสมการ (3.44) ถึง (3.47) ทางด้านขวาของสมการจะมีเลขยกกำลังของ R ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นส่วนที่กำหนดขอบเขตของการแผ่กระจายสนาม ได้แก่ ส่วนของ $1/R$, $1/R^2$, $1/R^3$ กับ $(1-\hat{R}\hat{R})\cdot\bar{M}$, $(1-\hat{R}\hat{R})\cdot\bar{J}$, $\hat{R}\hat{R}\cdot\bar{M}$ และ $\hat{R}\hat{R}\cdot\bar{J}$ และส่วนของ $1/R$, $1/R^2$ กับ $\hat{R}\times\bar{J}$ และ $\hat{R}\times\bar{M}$

ถ้าขอบเขต ($\pi R < \lambda/2$) ส่วนของ $1/R^3$ ในสมการ (3.44) และ (3.45) จะยังคงมีอยู่ เรียกบริเวณนี้ว่า สนามระยะใกล้จินตภาพ (reactive near field) เพราะว่าผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีส่วนที่เป็นจินตภาพอยู่ สนามในบริเวณสนามระยะใกล้จินตภาพจะพิจารณาเฉพาะ ส่วนของ $1/R^3$ ในสมการที่ (3.44) และ (3.45) และกำจัด $1/R$ ในสมการที่ (3.46) และ (3.47) ดังนั้นจะได้

$$\bar{E}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -j\omega\mu \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi k^2 R^3} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.48)$$

$$\bar{H}_m(\bar{r}, \bar{M}) = -j\omega\varepsilon \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi k^2 R^3} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.49)$$

$$\bar{H}_e(\bar{r}, \bar{J}) = - \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R^2} \hat{R} \times \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.50)$$

$$\bar{E}_m(\bar{r}, \bar{M}) = \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R^2} \hat{R} \times \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.51)$$

เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น จะปรากฏส่วนของ $1/R$ ในสมการ เรียกบริเวณนี้ว่า สนามระยะไกล ซึ่ง $\lambda/(2\pi) < R < 2D^2/\lambda$ จะได้

$$\bar{E}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -j\omega\mu \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.52)$$

$$\bar{H}_m(\bar{r}, \bar{M}) = -j\omega\varepsilon \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.53)$$

$$\bar{H}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -jk \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.54)$$

$$\bar{E}_m(\bar{r}, \bar{M}) = jk \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.55)$$

ถ้าระยะทาง $R > 2D^2 / \lambda$ จะเรียกว่า สนามระยะไกล (far field) แสดงถึงตำแหน่งที่ความยาวทางไฟฟ้าของระยะทาง จะต้องใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศจะได้

$$\bar{E}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -j\omega\mu (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.56)$$

$$\bar{H}_m(\bar{r}, \bar{M}) = -j\omega\varepsilon (\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.57)$$

$$\bar{H}_e(\bar{r}, \bar{J}) = -jk\hat{R} \times \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \bar{J}(\bar{r}') dS' \quad (3.58)$$

$$\bar{E}_m(\bar{r}, \bar{M}) = jk\hat{R} \times \int \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \bar{M}(\bar{r}') dS' \quad (3.59)$$

บริเวณสนามระยะไกลนับว่าเป็นบริเวณที่มีความสำคัญมากที่สุดในการออกแบบสายอากาศเพราะว่าเป็นย่านที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศมากที่สุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในย่านสนามระยะไกลจำเป็นที่จะต้องมีความถูกต้องเพราะจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ

สนามระยะไกลเป็นย่านที่ต้องให้ความสำคัญในการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนเช่นกัน เพราะว่าตัวป้อนของสายอากาศจะอยู่ในบริเวณสนามระยะไกลของตัวสะท้อนหลัก

2.5 เวกเตอร์ตัวแม่กระจายคลื่น

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้ทราบถึงผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ บริเวณต่าง ๆ ได้แก่ บริเวณสนามระยะใกล้จินตภาพ บริเวณสนามระยะใกล้ และบริเวณสนามระยะไกล ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงได้นำสมการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละบริเวณมาแสดงเป็นฟังก์ชันหรือชุดคำสั่งย่อ โดยเรียกฟังก์ชันนี้ว่า เวกเตอร์ตัวแม่กระจายคลื่น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาการแผ่กระจายของสนามจากแหล่งกำเนิด

จากสมการที่ (3.44) ถึง (3.47) เวกเตอร์ฟังก์ชันจะหาได้โดยการใช้เอกลักษณ์คือ

$$\hat{R} \times \bar{M} = \begin{bmatrix} R_{yy} M_z - R_{uz} M_y \\ R_{uz} M_x - R_{ux} M_z \\ R_{ux} M_y - R_{yy} M_x \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$(\bar{1} - \hat{R}\hat{R}) \cdot \bar{M} = \begin{bmatrix} (1 - R_{ux}^2) M_x - R_{ux} R_{yy} M_y - R_{ux} R_{uz} M_z \\ -R_{yy} R_{ux} M_x + (1 - R_{uy}^2) M_y - R_{yy} R_{uz} M_z \\ -R_{uz} R_{ux} M_x - R_{uz} R_{yy} M_y + (1 - R_{uz}^2) M_z \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

ฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (\bar{G}_{HJ}) และฟังก์ชันกรีนสำหรับสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็ก (\bar{G}_{EM}) เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบที่ง่ายกว่าสมการของฟังก์ชันกรีนอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการที่ (3.46) ในการคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า และใช้สมการที่ (3.47) ในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสแม่เหล็ก จากนั้นจะใช้สมการแมกเวลล์เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสแม่เหล็กในสมการที่ (3.44) และ (3.45) ตามลำดับ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือ

$$\bar{E} = -\frac{1}{\omega\epsilon} \bar{k} \times \bar{H} = -Z_0 \hat{k} \times \bar{H} \quad (3.62)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{\omega\epsilon} \bar{k} \times \bar{E} = Y_0 \hat{k} \times \bar{E} \quad (3.63)$$

เมื่อ \vec{k} คือ เวกเตอร์คลื่น มีแอมพลิจูดเป็น $k = |\vec{k}| = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = 2\pi/\lambda$ และมีทิศทางเป็น $\hat{k} = \hat{R}$ ซึ่งอยู่ในทิศทางของการแผ่กระจายคลื่นระหว่างแต่ละจุดของแหล่งกำเนิดและแต่ละจุดของสนาม และ $Z_0 = 1/Y_0 = \sqrt{\mu\varepsilon}$ เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของอวกาศว่าง

ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นสำหรับสนามทุก ๆ บริเวณหาได้จากสมการที่ (3.46) และ (3.47) เนื่องจากสมการทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันจึงสามารถเขียนรูปแบบฟังก์ชันเพื่อใช้ในการหาสนามให้อยู่ในฟังก์ชันเดียวกันได้คือ

$$f(\vec{r}', \vec{J}, \vec{r}, k) = \frac{1}{4\pi} \int \left(\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} + jk \right) \frac{e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \vec{J} dS' \quad (3.64)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (3.46) และ (3.47) กับสมการ (3.64) สามารถหาเวกเตอร์การแผ่กระจายของสนามได้คือ

$$\vec{H}(\vec{r}) = -f(\vec{r}', \vec{J}, \vec{r}, k) \quad (3.65)$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = f(\vec{r}', \vec{M}, \vec{r}, k) \quad (3.66)$$

สนามที่เหลือ สามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.62) และ (3.63)

ในการหาฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะใกล้จินตภาพ สนามระยะใกล้ และสนามระยะไกลสามารถหาได้ดังนี้

ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะใกล้จินตภาพโดยพิจารณาจากสมการที่ (3.50) และ (3.51) คือ

$$f_{\text{XNF}}(\vec{r}', \vec{J}, \vec{r}, k) = \frac{1}{4\pi} \int \frac{e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \vec{J} dS' \quad (3.67)$$

ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะใกล้โดยพิจารณาจากสมการที่ (3.54) และ (3.55) คือ

$$f_{\text{NF}}(\vec{r}', \vec{J}, \vec{r}, k) = j \frac{k}{4\pi} \int \frac{e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \vec{J} dS' \quad (3.68)$$

ฟังก์ชันตัวแปรกระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกลโดยพิจารณาจากสมการที่ (3.58) และ (3.59) คือ

$$f_{\text{FF}}(\vec{r}', \bar{J}, \vec{r}, k) = jk \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \int \bar{J} \frac{e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}'|} dS' \quad (3.69)$$

เมื่อใช้การประมาณของสนามระยะไกล สำหรับองค์ประกอบของเฟสจะประมาณให้

$$R = |\vec{r} - \vec{r}'| \approx r - \frac{\vec{r}}{r} \cdot \vec{r}' = r - \hat{r} \cdot \vec{r}'$$

และสำหรับองค์ประกอบของแอมพลิจูดจะประมาณให้ $\vec{r} - \vec{r}' \approx \vec{r}$ ในส่วนของเฟสจะกำจัดค่าคงที่ $\exp(-jkr)$ ออกไป (เพราะว่า $r = |\vec{r}| \rightarrow \infty$ เป็นค่าคงที่ของการแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกล) ดังนั้นฟังก์ชันตัวแปรกระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกลจะได้เป็น

$$f_{\text{FF}}(\vec{r}', \bar{J}, \hat{r}, k) = j \frac{k}{4\pi} \hat{r} \times \int \bar{J} e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} dS' \quad (3.70)$$

เมื่อองค์ประกอบของ $\hat{r} \cdot \vec{r}'$ ในสมการที่ (3.70) แสดงถึงระยะทางจากระบบพิกัดจุดกำเนิดไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและส่งต่อไปยังทิศทางของจุดสังเกต ในส่วนของเอกซ์โพเนนเชียลแสดงถึงความสัมพันธ์ของเฟสในการแผ่กระจายสนามในบริเวณสนามระยะไกล เมื่อ \hat{r} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยสำหรับคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในทิศทางของสนามระยะไกล

$$\hat{r} = \hat{a}_x \cos \phi \sin \theta + \hat{a}_y \sin \phi \sin \theta + \hat{a}_z \cos \theta$$

ฟังก์ชันตัวแปรกระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกลไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเวกเตอร์สามมิติ (องค์ประกอบของ x, y, z) แต่อยู่ในรูปแบบของสองมิติ คือ องค์ประกอบของ θ และ ϕ เพื่อให้ได้องค์ประกอบเชิงขั้วสามารถใช้เวกเตอร์เอกลักษณ์คือ

$$(\hat{r} \times \bar{J}) \cdot \hat{\theta} = -\hat{\phi} \cdot \bar{J}$$

$$(\hat{r} \times \bar{J}) \cdot \hat{\phi} = \hat{\theta} \cdot \bar{J}$$

ซึ่งพบว่าการใช้สมการ (3.67), (3.68) และ (3.70) แทนการใช้สมการที่ (3.64) จะสามารถปรับปรุงความเร็วในการคำนวณหาสนามได้ เนื่องจากเมื่อมีการแบ่งซีกตัวอย่างของแหล่งกำเนิดกระแสและสนามเป็นจำนวนหลายจุด จะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก

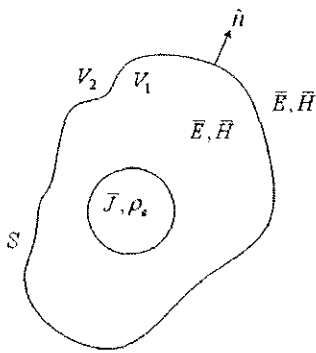
3. หลักการสมมูล

หลักการสมมูลได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการพิจารณาให้ระบบของแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า \bar{J} ρ_c ถูกบรรจุอยู่ในปริมาตร v_1 ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยผิวปิด S แพร์กระจายคลื่น \bar{E} และ \bar{H}

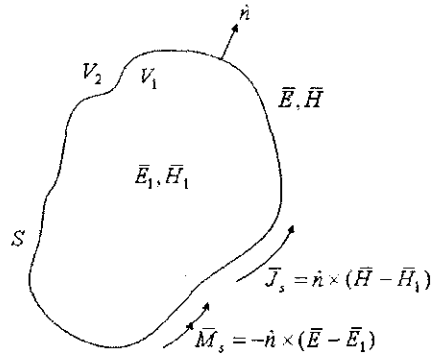
ดังแสดงในรูปที่ 3.2ก เราจะนำแหล่งกำเนิด \bar{J} และ ρ_c ออกไป แล้วสมมุติว่ามีสนามไร้แหล่งกำเนิด \bar{E}_1 และ \bar{H}_1 อยู่ภายใน S แทน ส่วนสนามดั้งเดิม \bar{E} และ \bar{H} ใน v_2 อยู่ภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.2ข สนามสมมูลรวมเป็นคำตอบที่เป็นจริงเฉพาะ ถ้ามันรวมกันอย่างเหมาะสมที่รอยต่อ S อันนี้ทำได้โดยชัดเจนความไม่ต่อเนื่องของส่วนประกอบของสนามในแนวสัมผัสด้วยกระแสที่ผิวจากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\bar{J}_s = \hat{n} \times (\bar{H} - \bar{H}_1) \quad (3.71ก)$$

$$\bar{M}_s = -\hat{n} \times (\bar{E} - \bar{E}_1) \quad (3.71ข)$$

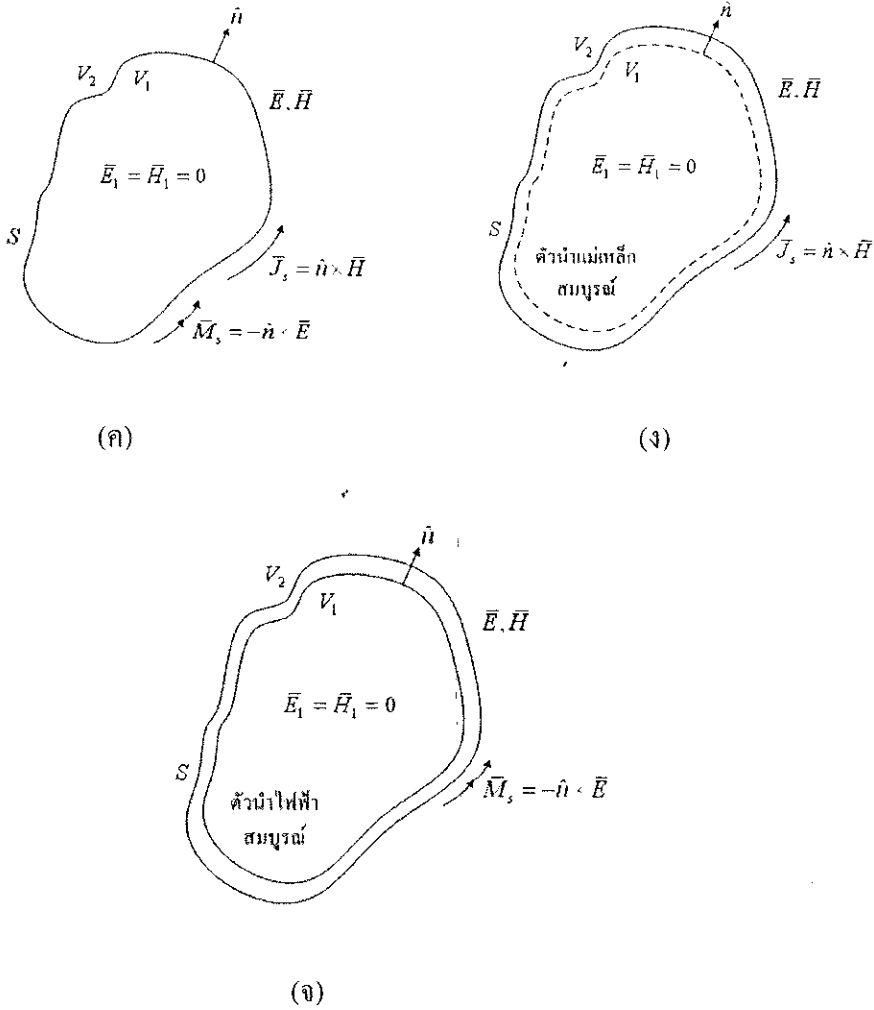


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 สนามสมมูลสำหรับสนาม \bar{E} และ \bar{H} ภายนอก



รูปที่ 3.2 สนามสมมูลสำหรับสนาม \vec{E} และ \vec{H} ภายนอก (ต่อ)

สมการ (3.71) เป็นเพียงเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กบริเวณแผ่นกระแส เพื่อให้ทำให้มีความไม่ต่อเนื่องของประจุในสนามไฟฟ้าที่สัมผัสรอยต่อ เมื่อ \hat{n} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว S สนาม \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 ใน v_1 และ \vec{E} และ \vec{H} ใน v_2 กับกระแสนบนผิว S เป็นคำตอบที่เป็นจริงของสมการแมกซ์เวลล์ทั่วไปที่ทุก ๆ แห่ง เนื่องจากมีคำตอบเพียงคำตอบเดียว เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต กระแสจากสมการ (3.71) จะต้องแพร่กระจายสนามที่สมมุติขึ้น ดังนั้นเราโคที่ยังเกี่ยวข้องกับสนามใน v_2 กระแสในสมการที่ (3.71) จึงสมมูลกับชุดของแหล่งกำเนิดเริ่มแรก ยิ่งไปกว่านั้น \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 อาจมีค่าเป็นค่าใด ๆ ได้ เพื่อความสะดวกเราจึงอาจเลือกให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสที่ผิวมีค่าดังต่อไปนี้

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H} \quad (3.72ก)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E} \quad (3.72ข)$$

ซึ่งกระแสเหล่านี้ถูกวางอยู่บนผิว S และกระจายสนามเริ่มแรกภายนอก S และสนามมีค่าเป็นศูนย์ภายใน S ดังแสดงในรูปที่ 3.2ค ที่กล่าวมานี้เป็นคณิตศาสตร์ของหลักการของฮอยแกน (Huygen's principle) กระแสที่แสดงในสมการ (3.71) และ (3.72) จะกระจายคลื่นในอวกาศว่าง ถ้าเราเลือกให้สนามมีค่าเป็นศูนย์ใน v_1 และแทน S ด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2ง ในกรณีนี้ กระแส \vec{J}_s จะลัดวงจรและไม่แพร่กระจายคลื่น ดังนั้นจะสามารถหาสนาม \vec{E} และ \vec{H} ใน v_2 ได้จากกระแสแม่เหล็ก $\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E}$ วางอยู่บนผิวดำนำไฟฟ้าสมบูรณ์ S นอกจากนี้เรายังแทน S ด้วยตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ (ผิวซึ่ง $\hat{n} \times \vec{H} = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 3.2จ ซึ่งสามารถหาสนาม \vec{E} และ \vec{H} ใน v_2 ได้จากกระแสไฟฟ้า $\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}$ วางอยู่บนผิวดำนำแม่เหล็กสมบูรณ์ S และสนามที่แพร่กระจายโดยกระแสสมมูลที่ผิว \vec{M}_s อย่างเดียวหรือ \vec{J}_s อย่างเดียว จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนตัวนำไฟฟ้าและตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ที่ถูกบิดล้อม

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเริ่มต้นที่อยู่ภายในพื้นผิวสมมูล กระแสสมมูลจะแทนที่สนามภายในตามหลักการของฮอยแกน ถ้าพื้นผิวสมมูลถูกสมมุติว่ามีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของอวกาศว่าง ดังนั้นจะสามารถหากระแสเหนี่ยวนำได้จาก

$$\vec{M}_{eq} = -\vec{M}_i = -Z_0 \vec{H}_{tan} = -Z_0 [\vec{H} - \hat{n}(\hat{n} \cdot \vec{H})] = Z_0 \hat{n} \times \hat{n} \times \vec{H} \quad (3.73)$$

$$\vec{J}_{eq} = -\vec{J}_i = -Y_0 \vec{E}_{tan} = -Y_0 [\vec{E} - \hat{n}(\hat{n} \cdot \vec{E})] = Y_0 \hat{n} \times \hat{n} \times \vec{E} \quad (3.74)$$

กระแสสมมูลจะมีค่าเป็นลบของกระแสเหนี่ยวนำ ซึ่งปริมาณเวกเตอร์ทั้งหมดถูกกำหนดให้อยู่บนพื้นผิวสมมูล ดังนั้น $\vec{H} = \vec{H}(\vec{r}_{eq})$ และ $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}_{eq})$ เมื่อ \vec{r}_{eq} กำหนดเป็นตำแหน่งบนพื้นผิวสมมูล \hat{n} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากออกไปจากพื้นผิวปิดสมมูล Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของอวกาศว่าง Y_0 แอดมิตแตนซ์คุณลักษณะโดยที่ $Y_0 = 1/Z_0$

จากสมการที่ (3.62) และ (3.63) ในส่วนของ $-Z_0 \hat{n} \times \vec{H}$ และ $Y_0 \hat{n} \times \vec{E}$ แสดงถึงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ของการแพร่กระจายคลื่นในโหมด TEM ในทิศทาง \hat{n} ซึ่งสามารถนำมาใช้กับสมการที่ (3.73) และ (3.74) ได้คือ

$$\bar{M}_{eq} = -\hat{n} \times \bar{E}(\bar{r}_{eq}) \quad (3.75)$$

$$\bar{J}_{eq} = \hat{n} \times \bar{H}(\bar{r}_{eq}) \quad (3.76)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (3.75) ลงในสมการที่ (3.74) ทำให้ได้

$$\bar{J}_{eq} = -Y_0 \hat{n} \times \bar{M}_{eq} \quad (3.77)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแทนสมการที่ (3.76) ลงในสมการที่ (3.73) ทำให้ได้

$$\bar{M}_{eq} = Z_0 \hat{n} \times \bar{J}_{eq} \quad (3.78)$$

4. แนวทางการวิเคราะห์หาสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการจำลองผลหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ซึ่งสนามที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กหาได้โดยใช้สมการที่ (3.44) ถึง (3.47) เพื่อให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้นจึงเริ่มต้นโดยการใช้สมการที่ (3.46) และ (3.47) เมื่อทำการอินทิเกรตเชิงปริมาตรสามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{H}'(\bar{r}, \bar{J}) = - \int_V \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{J}(\bar{r}') dV' \quad (3.79)$$

$$\bar{E}''(\bar{r}, \bar{M}) = \int_V \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \bar{M}(\bar{r}') dV' \quad (3.80)$$

เมื่อ $dV' = dx'dy'dz'$, $\bar{R} = \bar{r} - \bar{r}'$ เป็นเวกเตอร์บอกทิศทางจากแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง \bar{r}' ไปยังจุดสังเกตที่ตำแหน่ง \bar{r} เพื่อให้การพิจารณาได้สะดวกจะใช้สัญลักษณ์ (') แสดงสนามที่แพร่กระจายโดยกระแสไฟฟ้า และ (") แสดงสนามที่แพร่กระจายโดยกระแสแม่เหล็ก

ในการพิจารณาการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical calculation) จะสมมุติว่าพื้นผิวสมมูลถูกชักตัวอย่างเป็นจำนวน N จุด โดยกำหนดให้ n เป็นตัวบอกจุดของสนามที่เพิ่มขึ้น และทำการแบ่งชักตัวอย่างการกระจายของแหล่งกำเนิดเป็นจำนวน M จุด โดยกำหนดให้ m เป็นตัวบอกจุดของ

แหล่งกำเนิดที่เพิ่มขึ้น และเวกเตอร์บอกตำแหน่งที่ตำแหน่ง m ของแหล่งกำเนิดแทนด้วย \vec{r}_m โดยที่แหล่งกำเนิดอาจเป็นกระแสไฟฟ้า กระแสแม่เหล็ก หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายโดยแหล่งกำเนิดหาได้โดยอินทิเกรตสมการที่ (3.79) และ (3.80) ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของผลรวมได้คือ

$$\vec{H}'_n = -\frac{1}{4\pi} \sum_m^M \left(\frac{1}{R_{nm}} + jk \right) \frac{e^{-jkR_{nm}}}{R_{nm}} \hat{R}_{nm} \times \vec{J}_m \Delta S_m \quad (3.81)$$

$$\vec{E}''_n = \frac{1}{4\pi} \sum_m^M \left(\frac{1}{R_{nm}} + jk \right) \frac{e^{-jkR_{nm}}}{R_{nm}} \hat{R}_{nm} \times \vec{M}_m \Delta S_m \quad (3.82)$$

เมื่อเวกเตอร์ \vec{R}_{nm} เป็นเวกเตอร์ระหว่างจุดของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m และจุดของสนามที่ตำแหน่ง n , R_{nm} เป็นระยะทางระหว่างจุดของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m และจุดของสนามที่ตำแหน่ง n , \hat{R}_{nm} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยระหว่างจุดของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m และจุดของสนามที่ตำแหน่ง n , เวกเตอร์ \vec{H}'_n และ \vec{E}''_n แสดงถึงเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า และเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสแม่เหล็กที่จุดของสนามที่ตำแหน่ง n ในทำนองเดียวกัน \vec{J}_m และ \vec{M}_m เป็นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กที่จุดของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m

พื้นที่ประสิทธิภาพ (effective area) ของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m ถูกชักตัวอย่างเป็น ΔS_m ซึ่งแสดงถึงช่องเปิดประสิทธิภาพ (effective aperture) ของแหล่งกำเนิดที่ถูกชักตัวอย่าง สำหรับการหาสนามของสมการ (3.44) และ (3.45) จะหาได้โดยการใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.62) และ (3.63) ได้คือ

$$\vec{E}'(\vec{r}, \vec{J}) = Z_0 \int_V \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \hat{R} \times \vec{J}(\vec{r}') dV' \quad (3.83)$$

$$\vec{H}''(\vec{r}, \vec{M}) = Y_0 \int_V \left(\frac{1}{R} + jk \right) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{R} \times \hat{R} \times \vec{M}(\vec{r}') dV' \quad (3.84)$$

จากสมการ (3.83) และ (3.84) สามารถแสดงในรูปของผลรวมได้คือ

$$\bar{E}_n' = \frac{Z_0}{4\pi} \sum_m^M \left(\frac{1}{R_{nm}} + jk \right) \frac{e^{-jkR_{nm}}}{R_{nm}} \hat{R}_{nm} \times \hat{R}_{nm} \times \bar{J}_m \Delta S_m \quad (3.85)$$

$$\bar{H}_n'' = \frac{Y_0}{4\pi} \sum_m^M \left(\frac{1}{R_{nm}} + jk \right) \frac{e^{-jkR_{nm}}}{R_{nm}} \hat{R}_{nm} \times \hat{R}_{nm} \times \bar{M}_m \Delta S_m \quad (3.86)$$

ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายรวมหาได้จากสมการที่ (3.81), (3.82), (3.85) และ (3.86) ซึ่งจะได้สนามไฟฟ้ารวมคือ $\bar{E}_n = \bar{E}_n' + \bar{E}_n''$ และสนามแม่เหล็กรวมคือ $\bar{H}_n = \bar{H}_n' + \bar{H}_n''$

ทำการแตกสมการที่ (3.81) และ (3.82) ให้อยู่ในองค์ประกอบ x, y และ z โดยการพิจารณาจากสมการที่ (3.61) ได้คือ

$$\bar{E}_{xn}'' = \sum_m^M G_{nm} (\hat{y}_{nm} M_{zm} - \hat{z}_{nm} M_{ym}) \Delta S_m \quad (3.87)$$

$$\bar{E}_{yn}'' = \sum_m^M G_{nm} (\hat{z}_{nm} M_{xm} - \hat{x}_{nm} M_{zm}) \Delta S_m \quad (3.88)$$

$$\bar{E}_{zn}'' = \sum_m^M G_{nm} (\hat{x}_{nm} M_{ym} - \hat{y}_{nm} M_{xm}) \Delta S_m \quad (3.89)$$

$$\bar{H}_{xn}' = -\sum_m^M G_{nm} (\hat{y}_{nm} J_{zm} - \hat{z}_{nm} J_{ym}) \Delta S_m \quad (3.90)$$

$$\bar{H}_{yn}' = -\sum_m^M G_{nm} (\hat{z}_{nm} J_{xm} - \hat{x}_{nm} J_{zm}) \Delta S_m \quad (3.91)$$

$$\bar{H}_{zn}' = -\sum_m^M G_{nm} (\hat{x}_{nm} J_{ym} - \hat{y}_{nm} J_{xm}) \Delta S_m \quad (3.92)$$

เมื่อ

$$G_{nm} = \left(\frac{1}{R_{nm}} + jk \right) \frac{e^{-jkR_{nm}}}{4\pi R_{nm}} \quad (3.93)$$

สเกลาร์ $\hat{x}_{nm} = (x_n - x'_m) / R_{nm}$, $\hat{y}_{nm} = (y_n - y'_m) / R_{nm}$ และ $\hat{z}_{nm} = (z_n - z'_m) / R_{nm}$ เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางระหว่างจุดของแหล่งกำเนิดและจุดของสนาม, $\bar{R}_{nm} = \bar{r}_n - \bar{r}'_m$ และ (x_n, y_n, z_n) คือ พิกัดจุดของสนามที่ตำแหน่ง n, (x_m, y_m, z_m) คือ พิกัดจุดของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m, (M_{xm}, M_{ym}, M_{zm}) คือ องค์ประกอบของกระแสแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m และ (J_{xm}, J_{ym}, J_{zm}) คือ องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดที่ตำแหน่ง m

สมการที่ (3.87) ถึง (3.92) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบของสนามจำนวน N จุด ที่ทุก ๆ จุดบนพื้นผิว ดังนั้นสมการ (3.87) ถึง (3.93) จะถูกแสดงได้ในรูปเมตริกซ์ได้คือ

$$[E'_x] = \begin{bmatrix} \sum_m^M G_{1m} (\hat{y}_{1m} M_{zm} - \hat{z}_{1m} M_{ym}) \Delta S_m \\ \sum_m^M G_{2m} (\hat{y}_{2m} M_{zm} - \hat{z}_{2m} M_{ym}) \Delta S_m \\ \vdots \\ \sum_m^M G_{Nm} (\hat{y}_{Nm} M_{zm} - \hat{z}_{Nm} M_{ym}) \Delta S_m \end{bmatrix}$$

เมื่อ G_{nm} ในสมการที่ (3.93) เป็นเมตริกซ์ขนาด $N \times M$ คือ

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1M} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{N1} & G_{N2} & \cdots & G_{NM} \end{bmatrix}$$

ในทำนองเดียวกันองค์ประกอบของเวกเตอร์บอกตำแหน่งสามารถแสดงเป็นเมตริกซ์ขนาด $N \times M$ ได้คือ

$$[x] = \begin{bmatrix} x_1 - x'_1 & \cdots & x_1 - x'_M \\ \vdots & & \vdots \\ x_N - x'_1 & \cdots & x_N - x'_M \end{bmatrix} \quad [y] = \begin{bmatrix} y_1 - y'_1 & \cdots & y_1 - y'_M \\ \vdots & & \vdots \\ y_N - y'_1 & \cdots & y_N - y'_M \end{bmatrix}$$

$$[z] = \begin{bmatrix} z_1 - z'_1 & \cdots & z_1 - z'_M \\ \vdots & & \vdots \\ z_N - z'_1 & \cdots & z_N - z'_M \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการรวมเวกเตอร์ $[G]$ กับองค์ประกอบของเวกเตอร์บอกตำแหน่งทำให้ได้ฟังก์ชันกรีนสามมิติ ขนาด $N \times M$ คือ

$$[G_x] = \begin{bmatrix} (x_1 - x'_1)G_{11} & \cdots & (x_1 - x'_M)G_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ (x_N - x'_1)G_{N1} & \cdots & (x_N - x'_M)G_{NM} \end{bmatrix}$$

$$[G_y] = \begin{bmatrix} (y_1 - y'_1)G_{11} & \cdots & (y_1 - y'_M)G_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ (y_N - y'_1)G_{N1} & \cdots & (y_N - y'_M)G_{NM} \end{bmatrix}$$

$$[G_z] = \begin{bmatrix} (z_1 - z'_1)G_{11} & \cdots & (z_1 - z'_M)G_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ (z_N - z'_1)G_{N1} & \cdots & (z_N - z'_M)G_{NM} \end{bmatrix}$$

พื้นที่ผิวที่ถูกชักตัวอย่างเป็นเมตริกซ์ขนาด $M \times 1$ คือ

$$[\Delta S] = \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \vdots \\ \Delta S_M \end{bmatrix}$$

แหล่งกำเนิดกระแสจะเป็นเมตริกซ์ขนาด $M \times 1$ ประกอบด้วยองค์ประกอบ x, y และ z โดยแต่ละแหล่งกำเนิดกระแสจะถูกระบุด้วยค่าคงที่ (normalize) โดยพื้นที่ที่ถูกชักตัวอย่าง ซึ่งองค์ประกอบของกระแสแม่เหล็กที่ถูกระบุด้วยค่าคงที่จะมีหน่วยเป็น แอมป์·เมตร คือ

$$[\bar{M}_x] = \begin{bmatrix} M_{x1} \Delta S_1 \\ \vdots \\ M_{xN} \Delta S_M \end{bmatrix} \quad [\bar{M}_y] = \begin{bmatrix} M_{y1} \Delta S_1 \\ \vdots \\ M_{yN} \Delta S_M \end{bmatrix} \quad [\bar{M}_z] = \begin{bmatrix} M_{z1} \Delta S_1 \\ \vdots \\ M_{zN} \Delta S_M \end{bmatrix}$$

ดังนั้นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้คือ

$$\begin{aligned}
[E_x''] &= [G_y][\bar{M}_z] - [G_z][\bar{M}_y] & [H_x'] &= [G_z][\bar{J}_y] - [G_y][\bar{J}_z] \\
[E_y''] &= [G_z][\bar{M}_x] - [G_x][\bar{M}_z] & [H_y'] &= [G_x][\bar{J}_z] - [G_z][\bar{J}_x] \\
[E_z''] &= [G_x][\bar{M}_y] - [G_y][\bar{M}_x] & [H_z'] &= [G_y][\bar{J}_x] - [G_x][\bar{J}_y]
\end{aligned} \tag{3.94}$$

จากสมการที่ (3.87) ถึง (3.92) สามารถแสดงในรูปของเมตริกซ์ดังสมการที่ (3.94) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจะไม่มีองค์ประกอบในทิศทางของกระแสแม่เหล็ก และในทำนองเดียวกันสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายจะไม่มีองค์ประกอบในทิศทางของกระแสไฟฟ้า

5. ค่าลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน

5.1 อัตราขยายของสายอากาศ

เมื่อสายอากาศถูกนำมาใช้ในระบบใด ๆ เช่น ระบบการสื่อสาร สิ่งที่จะต้องให้ความสนใจในขั้นต้นคือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานที่ป้อนเข้า (input power) ไปเป็นพลังงานที่ถูกแผ่กระจายออกไปจากสายอากาศ อัตราขยายของสายอากาศเป็นค่าเชิงปริมาณในการใช้อธิบายว่า สายอากาศมีความสามารถในการรวมพลังงานแต่ละทิศทางใด ๆ ได้มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้า โดยอัตราขยายของสายอากาศแสดงในสมการ (3.95)

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U_{rad}(\theta, \phi)}{P_{in}} \tag{3.95}$$

โดยที่ P_{in} คือ พลังงานที่ป้อนให้สายอากาศมีหน่วยเป็น วัตต์ (Watt)

$U_{rad}(\theta, \phi)$ คือ ความเข้มของการแผ่กระจายพลังงานในแต่ละทิศทาง (θ, ϕ) ซึ่งหาได้จาก

$$U_{rad}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*) \cdot r^2 \hat{r} = \frac{|E(\theta, \phi)|^2 r^2}{2Z} \tag{3.96}$$

ความเข้มของการแผ่พลังงานเป็นพลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศในแต่ละทิศทางต่อหน่วยมุมตันมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเรเดียนยกกำลังสอง (หรือ สเตอเรเดียน, sr) ข้อดีของการใช้ความเข้มของการแผ่กระจายพลังงาน คือสามารถเขียนนิพจน์แยกเป็นอิสระจากระยะทาง r ได้ไม่เหมือนกับกำลังงานที่ระยะทาง r จะรวมอยู่ในปริพันธ์ด้วย

สำหรับสนามไฟฟ้าขั้วสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมและสนามไฟฟ้าขั้วสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้หาได้จากนิยามที่ 3 ของ Ludwig (Ludwig, 1973) ดังนี้

$$\bar{E}_{co}(\theta, \phi) = \bar{E}_\theta \cos(\phi) - \bar{E}_\phi \sin(\phi) \quad (3.97ก)$$

$$\bar{E}_{cross}(\theta, \phi) = \bar{E}_\theta \sin(\phi) + \bar{E}_\phi \cos(\phi) \quad (3.97ข)$$

เมื่อ \bar{E}_θ และ \bar{E}_ϕ คือ สนามไฟฟ้าขั้วสนามไกลในแนวองค์ประกอบ $\hat{\theta}$ และ $\hat{\phi}$ ของพิกัดทรงกลม อัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วมและในแนวโพลาริเซชันไขว้หาได้ดังนี้

$$G_{co}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |E_{co}(\theta, \phi)|^2}{2Z} \quad (3.98ก)$$

$$G_{cross}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{r^2 |E_{cross}(\theta, \phi)|^2}{2Z} \quad (3.98ข)$$

5.2 ประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์

ในการพิจารณาประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศโดยทั่วไปจะประกอบด้วย (balanis, 1997)

1) ส่วนของพลังงานรวมที่แพร่กระจายออกจากตัวป้อน การขัดขวางสัญญาณจากตัวป้อน และตำแหน่งของตัวป้อน โดยทำให้เกิดการสะท้อนบนพื้นผิว เรียกว่า ประสิทธิภาพของกำลังสิ้นออก (spillover efficiency ϵ_s)

2) การกระจายของแอมพลิจูดของตัวป้อนบนพื้นผิวของตัวสะท้อน เรียกว่า ประสิทธิภาพของความเรียว (taper efficiency ϵ_t)

3) การกระจายของเฟสของสนามที่อยู่บนระนาบอะเพอร์เจอร์ เรียกว่า ประสิทธิภาพของเฟส (phase efficiency ϵ_p)

4) ความสอดคล้องกันของการโพลาไรซ์ของสนามบนระนาบอะเพอร์เจอร์ เรียกว่า ประสิทธิภาพของการโพลาไรซ์ (polarization efficiency ϵ_x)

5) ประสิทธิภาพของการบล็อกคลื่น (blockage efficiency ϵ_b)

6) ประสิทธิภาพของความผิดพลาดการสุ่ม (random error efficiency ϵ_r) บนพื้นผิวตัวสะท้อน

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าเท่ากับ

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_s \varepsilon_t \varepsilon_p \varepsilon_x \varepsilon_b \varepsilon_r \quad (3.99)$$

สำหรับตัวป้อนที่มีแบบรูปสมมาตร

$$\varepsilon_s = \frac{\int_0^{\theta_0} G_f(\theta') \sin \theta' d\theta'}{\int_0^{\pi} G_f(\theta') \sin \theta' d\theta'} \quad (3.100)$$

$$\varepsilon_t = 2 \cot^2 \left(\frac{\theta_0}{2} \right) \frac{\left| \int_0^{\theta_0} \sqrt{G_f(\theta')} \tan \left(\frac{\theta'}{2} \right) d\theta' \right|^2}{\int_0^{\theta_0} G_f(\theta') \sin \theta' d\theta'} \quad (3.101)$$

ดังนั้น

1) $100(1 - \varepsilon_s)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเนื่องการพลังงานจากตัวป้อนมีการสิ้นออกจากในส่วนของตัวสะท้อนหลัก

2) $100(1 - \varepsilon_t)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการกระจายของแอมพิจูดของสนามไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวตัวสะท้อน

3) $100(1 - \varepsilon_p)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากสนามที่อยู่บนระนาบอะเพอร์เจอร์ไม่อยู่ในเฟสเดียวกัน

4) $100(1 - \varepsilon_x)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเมื่อเกิดการโพลาไรซ์ไขว้ของสนามบนระนาบอะเพอร์เจอร์

5) $100(1 - \varepsilon_b)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการบล็อกรังจากตัวป้อนหรือตัวยึดตัวป้อนเข้ากับตัวสะท้อน

6) $100(1 - \varepsilon_r)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการสูญเสียผลขาดบนพื้นผิวของตัวสะท้อน

นอกจากนั้นปัจจัยที่ทำให้อัตราขยายของสายอากาศลดลงคือการลดทอนในสายอากาศตัวป้อนและสายส่ง

สำหรับตัวป้อนที่มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- 1) การมีแบบรูปสมมาตร
- 2) การปรับเฟสให้ตรง
- 3) ไม่มีองค์ประกอบของสนามในการโพลาริไซซ์ไว
- 4) ไม่มีการบดล็อก
- 5) ไม่มีการสุมผิดพลาด

ดังนั้นสองปัจจัยหลักที่นำมาใช้หาประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์คือการสูญเสียกำลัง

งานเนื่องจากการล้นออกและการเสียดำลังงานเนื่องจากการกระจายของสนามไม่สม่ำเสมอ เนื่องการจากสูญเสียขึ้นอยู่กับแบบรูปของตัวป้อน ดังนั้นการประนีประนอมระหว่างประสิทธิภาพการล้นและประสิทธิภาพความเร็วจะต้องปรากฏออกมา ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพการล้นมีค่าสูงมากสามารถทำได้โดยแบบรูปของตัวป้อนต้องมีลำคลื่นแคบและมีพุกคลื่นเล็ก (minor lobe) ต่ำ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพของความเร็วมีค่าต่ำด้วย

6. สรุป

วิธีทัศนศาสตร์ฟิสิกส์เป็นกรรมวิธีที่นำมาใช้หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยการหาปริพันธ์ของกระแสสมมูลบนผิวตัวนำด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ เริ่มจากการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสที่อยู่บนผิวของตัวสะท้อน โดยกระแสเหนี่ยวนำบนผิวตัวสะท้อนจะหาได้จากองค์ประกอบของสนามตกกระทบในแนวสัมผัสแต่ละจุดที่กระทำบนผิว ตัวสะท้อน ซึ่งกระแสเหล่านี้จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปในสนามระยะไกลทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งสนามที่ได้จากวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ประกอบด้วย สนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสแม่เหล็ก ดังสมการที่ (3.44) ถึง (3.47) เพื่อความสะดวกในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้โปรแกรม Matlab จึงได้ใช้สมการที่ (3.46) และ (3.47) ในการเริ่มต้นวิเคราะห์ปัญหา จากนั้นใช้สมการของแมกซ์เวลล์สมการที่ (3.62) และ (3.63) ในการหาสนามในสมการที่ (3.44) และ (3.45) และเพื่อให้ประหยัดเวลาในการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงได้แยกวิเคราะห์สนามโดยแบ่งออกเป็นบริเวณต่าง ๆ ได้แก่ บริเวณสนามระยะใกล้ จินตภาพ บริเวณสนามระยะไกล และบริเวณสนามระยะไกล นอกจากนี้ยังใช้ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นเพื่อช่วยในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ โปรแกรมจำลองผลสามารถเขียนสมการที่ (3.46) และ (3.47) ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (3.94) เมื่อทราบสนามที่แผ่กระจายออกจากตัว

สะท้อนก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะการแผ่พลังงานของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายของสายอากาศ ประสิทธิภาพอะเพอร์เจอร์ เป็นต้น เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการแก้ไขปรับปรุงสายอากาศตัวสะท้อนต่อไป

บทที่ 4

การสังเคราะห์และออกแบบสายอากาศแบบตัวสะท้อน

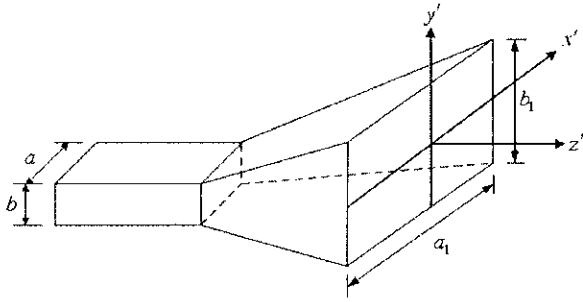
ในบทนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์หาคูณสมบัติของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนที่มีรูปทรงเป็นไปตามสมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ ควอดเรตติค ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยการนำผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ดังที่กล่าวในบทที่ 3 ในการจำลองผลเพื่อหาสนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสะท้อนแต่ละแบบ โดยเริ่มจากการกำหนดสายอากาศป้อน และสมการพื้นผิวของตัวสะท้อน จากนั้นทำการวิเคราะห์หาคูณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระดับความพลิว อัตราขยายสูงสุด ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของตัวสะท้อนแต่ละแบบ

1. สายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังตัวสะท้อน

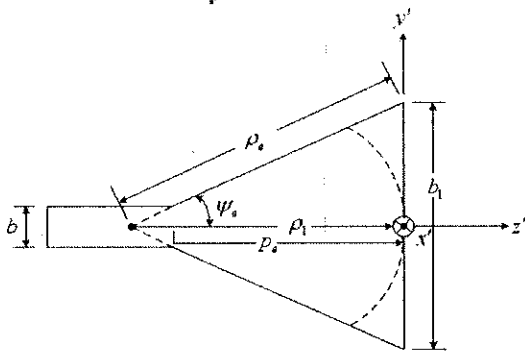
การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์นั้น จำเป็นต้องกำหนดชนิดของแหล่งกำเนิดหรือชนิดของตัวป้อน ความถี่ปฏิบัติการ รวมทั้งรายละเอียดของพื้นผิวตัวสะท้อน ได้แก่ สมการพื้นผิว เส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ตัวป้อนเป็น สายอากาศปากแตร ทรงพีระมิดมาตรฐาน ปฏิบัติงานในย่านความถี่ 10 GHz และพื้นผิวตัวสะท้อนที่นำมาสังเคราะห์หาคูณสมบัติ ได้แก่ พื้นผิวแบบควอดเรตติค ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10λ หรือเท่ากับ 30 เซนติเมตร

1.1 สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

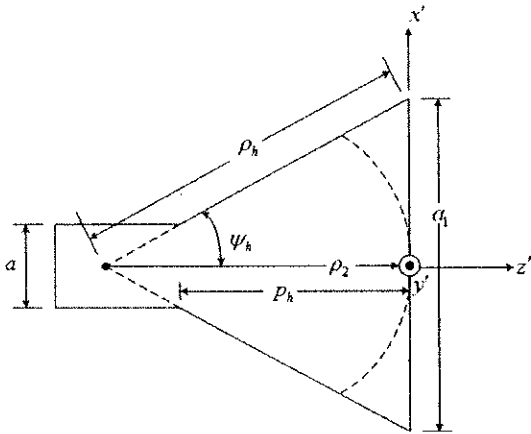
สายอากาศปากแตรทรงพีระมิด (Milligan, 1985) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.1 กล่าวคือมีการลู่ออกทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) การลู่ออกในลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่ในการกระจายคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราขยายสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการลู่ออกในทั้งสองระนาบนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏที่ปากแตรมีเฟสเปลี่ยนไปตามตำแหน่ง x' และ y'



(ก) ปากแตรทรงสี่เหลี่ยม



(จ) มุมมองในระนาบสนามไฟฟ้า



(ค) มุมมองในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.1 สายอากาศปากแตรทรงสี่เหลี่ยมและระบบพิกัด

ในการวิเคราะห์สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ จะสมมุติให้การกระจายของสนามอะเพอร์เจอร์ประกอบไปด้วยโหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์จะกำหนดให้สัญลักษณ์ของ (') แสดงถึงสนามในโหมด TM และสัญลักษณ์ (") แสดงถึงสนามในโหมด TE โดยที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นในโหมด TM และ TE คือ

$$Z' = \frac{1}{Y'} = \frac{\omega\mu}{k_z} = Z_0 \frac{k}{k_z} \quad (4.1)$$

$$Z'' = \frac{1}{Y''} = \frac{k_z}{\omega\varepsilon} = Z_0 \frac{k_z}{k} \quad (4.2)$$

ในสมการที่ (4.1) และ (4.2) $k_z = 2\pi/\lambda$ แสดงถึงเลขคลื่นในท่อนำคลื่น $\omega = 2\pi f$ เป็นความถี่เชิงรัศมี (radial frequency) μ และ ε เป็นความซาบซึมได้สมบูรณ์และเป็นสภาพยอมสมบูรณ์ของวัสดุที่ใช้เติมในท่อนำคลื่น ตามลำดับ $Z_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของอวกาศว่าง สำหรับสนามในโหมด TM ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่มีท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมแสดงได้ คือ (Diaz and Milligan, 1996)

$$H'_x = jYk_y V' \psi'_x \phi'_y e^{-jk_z z} \quad (4.3ก)$$

$$H'_y = -jYk_x V' \phi'_x \psi'_y e^{-jk_z z} \quad (4.3ข)$$

$$E'_x = -jk_x V' \phi'_x \psi'_y e^{-jk_z z} \quad (4.3ค)$$

$$E'_y = -jk_y V' \psi'_x \phi'_y e^{-jk_z z} \quad (4.3ง)$$

$$E'_z = \frac{k_c^2}{k_z} V' \psi'_x \psi'_y e^{-jk_z z} \quad (4.3จ)$$

สำหรับสนามในโหมด TE แสดงได้คือ

$$E_x'' = -jZ''k_y I'' \psi_x'' \varphi_y'' e^{-jk_z z} \quad (4.4ก)$$

$$E_y'' = jZ''k_x I'' \varphi_x'' \psi_y'' e^{-jk_z z} \quad (4.4ข)$$

$$H_x'' = -jk_x I'' \varphi_x'' \psi_y'' e^{-jk_z z} \quad (4.4ค)$$

$$H_y'' = -jk_y I'' \psi_x'' \varphi_y'' e^{-jk_z z} \quad (4.4ง)$$

$$H_z'' = \frac{k_c^2}{k_z} I'' \psi_x'' \psi_y'' e^{-jk_z z} \quad (4.4จ)$$

ฟังก์ชันของโหมดคือ

$$\psi_x' = \delta_x' \cos(k_x x) + (1 - \delta_x') \sin(k_x x)$$

$$\psi_y' = \delta_y' \cos(k_y y) + (1 - \delta_y') \sin(k_y y)$$

$$\varphi_x' = -\delta_x' \sin(k_x x) + (1 - \delta_x') \cos(k_x x)$$

$$\varphi_y' = -\delta_y' \sin(k_y y) + (1 - \delta_y') \cos(k_y y)$$

$$\psi_x'' = \delta_x'' \sin(k_x x) - (1 - \delta_x'') \cos(k_x x)$$

$$\psi_y'' = \delta_y'' \sin(k_y y) - (1 - \delta_y'') \cos(k_y y)$$

$$\varphi_x'' = \delta_x'' \cos(k_x x) + (1 - \delta_x'') \sin(k_x x)$$

$$\varphi_y'' = \delta_y'' \cos(k_y y) + (1 - \delta_y'') \sin(k_y y)$$

โดยที่

$$\delta_x = \frac{1}{2}(1 - (-1)^{m_x})$$

และ

$$\delta_y = \frac{1}{2}(1 - (-1)^{m_y})$$

เมื่อ δ_x และ δ_y เป็นการกำหนดการเปลี่ยนแปลงไซนูซอยด์ให้เป็นจำนวนคู่หรือคี่ เลขคลื่น $k_x = \pi m_x / a_1$ และ $k_y = \pi m_y / b_1$ เป็นตัวกำหนดเลขคลื่นตัด $k_z^2 = k_x^2 + k_y^2$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นของอวกาศว่าง เลขคลื่นตัด และเลขคลื่นของท่อนำคลื่นแสดงได้คือ $k^2 = k_c^2 + k_z^2$ เมื่อ a_1 และ b_1 เป็นขนาดของปากแตรทรงพีระมิดในแนวแกน x และแนวแกน y ตามลำดับ, V' คือ แรงดันการกระตุ้นให้เกิดโหมด TM, I'' คือ กระแสการกระตุ้นให้เกิดโหมด TE สำหรับการเปลี่ยนแปลงของโหมด TM และ TE ในทิศทาง x และ y ถูกแสดงโดยจำนวนเต็มบวก m'_x, m'_y, m''_x และ m''_y ซึ่งจะกำหนดจำนวนของการเปลี่ยนแปลงสนามในครึ่งความยาวคลื่นในแนวแกน x หรือ y ของปากแตรพีระมิด

กำลังงานเฉลี่ยของสนามถูกกำหนดโดย

$$P = \frac{1}{2} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} \int_{-a_1/2}^{a_1/2} |\hat{z} \cdot (\bar{E} \times \bar{H}^*)| dx dy = \frac{1}{2} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} \int_{-a_1/2}^{a_1/2} |\bar{E}_T \times \bar{H}_T^*| dx dy \quad (4.5)$$

เมื่อ $\bar{E}_T = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y$ และ $\bar{H}_T = \hat{x}H_x + \hat{y}H_y$ เป็นสนามตามขวาง ทำให้ได้

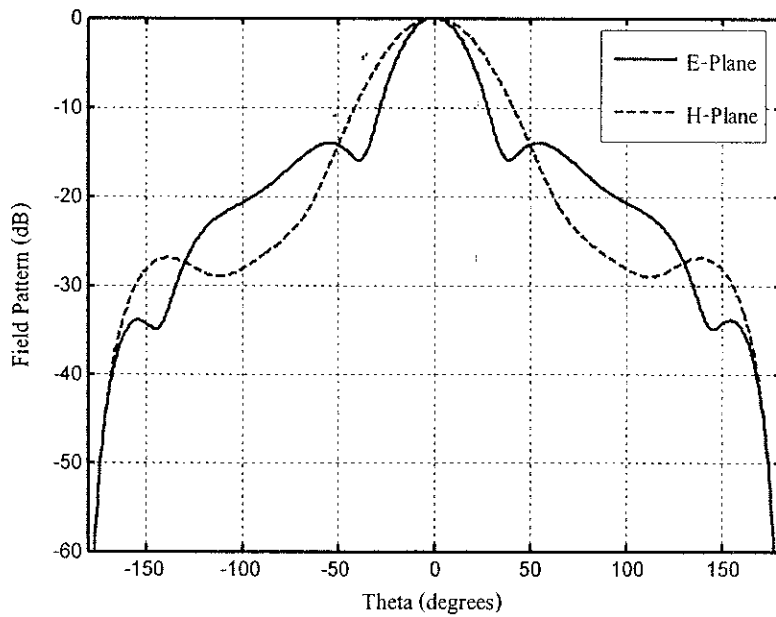
$$P = \frac{1}{2} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} \int_{-a_1/2}^{a_1/2} (E_x H_y^* - E_y H_x^*) dx dy \quad (4.6)$$

สนามบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดในสมการที่ (4.3) และ (4.4) มีความโค้งเฟสทอไรอยด์ (toroidal phase curvature) เป็น

$$-k(\sqrt{x^2 + \rho_h^2} + \sqrt{y^2 + \rho_e^2} - \rho_h - \rho_e)$$

เมื่อ ρ_h และ ρ_e เป็นความยาวของมุมกาง (จากอะเพอร์เจอร์ถึงยอดแหลม) ในแนวราบและแนวตั้ง x และ y เป็นระบบพิกัดของจุดบนอะเพอร์เจอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเป็นสายอากาศป้อนซึ่งมีขนาด $\rho_1 = \rho_2 = 2.3\lambda$ (6.9 cm), $a_1 = 1.5\lambda$ (4.5 cm), $b_1 = 1.6\lambda$ (4.8 cm), $a = 0.76\lambda$ (2.28 cm) และ $b = 0.34\lambda$ (1.02 cm) เมื่อทำการวิเคราะห์การแผ่กระจายของสนามโดยใช้สมการที่ (4.3) และ (4.4) ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) แสดงดังรูปที่ 4.2



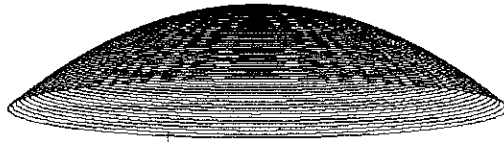
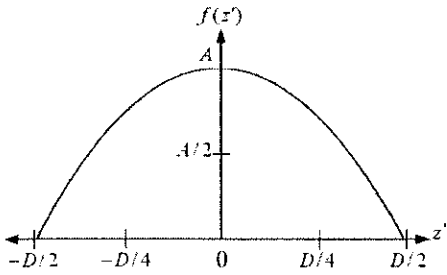
รูปที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

1.2 รูปทรงทางเรขาคณิตของตัวสะท้อน

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้สังเคราะห์ตัวสะท้อนที่มีพื้นผิวตามสมการทางเรขาคณิตแบบต่างๆ ได้แก่ พื้นผิวแบบควอดเรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก ซึ่งสมการทางเรขาคณิตและรูปทรงของพื้นผิวดังกล่าวแต่ละแบบถูกกำหนดดังต่อไปนี้

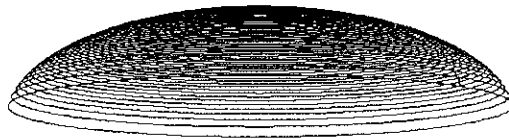
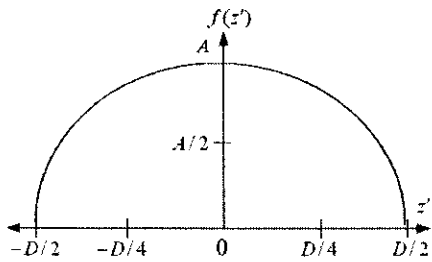
(1) พื้นผิวตัวสะท้อนแบบควอดเรติก

$$f(x, y) = A \left[1 - \left(\frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$



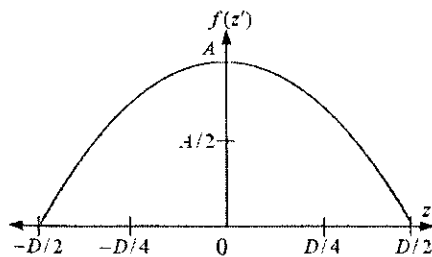
(2) พื้นผิวตัวสะท้อนแบบทรงกลม

$$f(x, y) = A \sqrt{1 - \left(\frac{2}{D} \sqrt{x^2 + y^2} \right)^2} \quad (4.8)$$



(3) พื้นผิวตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก

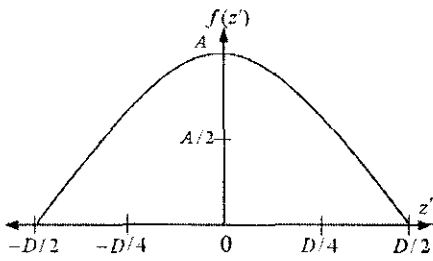
$$f(x, y) = \left(\sqrt{x^2 + y^2} \right)^2 / 4f \quad (4.9)$$



เมื่อ f คือ ระยะจุดโฟกัสของพาราโบลา

(4) พื้นผิวตัวสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลิก

$$f(x, y) = a\sqrt{1 + \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b}} \quad (4.10)$$

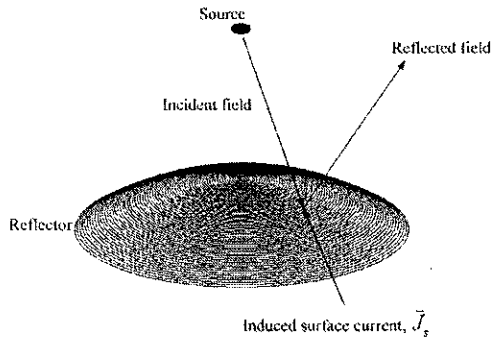


เมื่อ a และ b คือ ตัวแปรที่กำหนดเส้น Asymptote ของไฮเพอร์โบลิก

จากสมการเรขาคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ จะกำหนดให้ $-D/2 \leq z' \leq D/2$ โดยที่ $z' = \sqrt{x^2 + y^2}$ และ A คือ ความลึกหรือความหนาของตัวสะท้อน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าลักษณะความโค้งของสมการทางเรขาคณิตแตกต่างกัน นั่นคือความโค้งของตัวสะท้อนแต่ละแบบก็จะแตกต่างกันด้วย จึงได้ตั้งสมมุติฐานว่าเมื่อลักษณะผิวโค้งของตัวสะท้อนต่างกันก็จะทำให้คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนมีข้อดีและข้อด้อยต่างกันออกไป

2. การสังเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

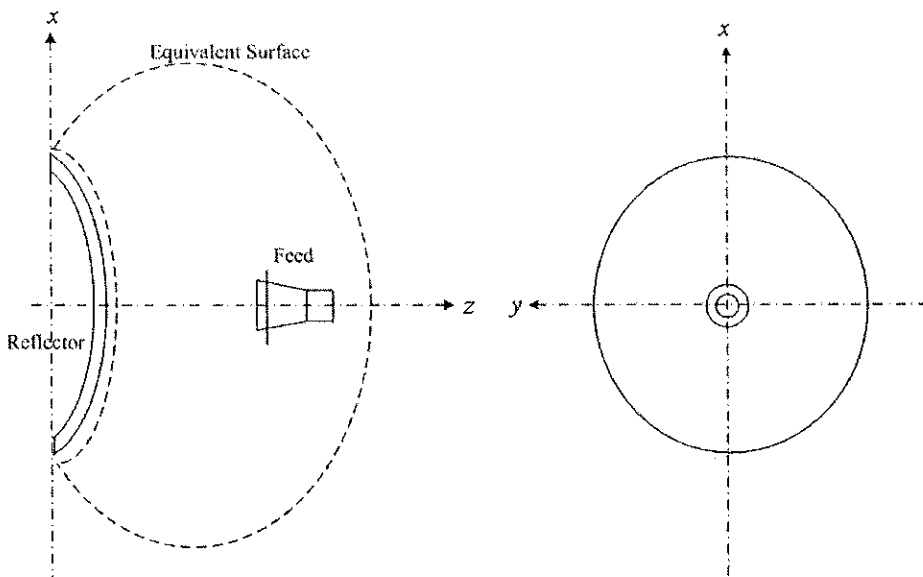
วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน โดยสนามที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อนหาได้จากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวตัวสะท้อนที่ทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นกลับออกไปดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งในการหากระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวตัวสะท้อนจำเป็นต้องทราบพื้นผิวสมมูลที่พื้นผิวตัวสะท้อนก่อน



รูปที่ 4.3 วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

2.1 พื้นผิวสมมูลที่พื้นผิวของตัวสะท้อน

การหากระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของตัวสะท้อนที่เกิดจากสายอากาศป้อนสามารถหาได้โดยการนำพื้นผิวสมมูลให้อยู่ด้านหน้าของตัวสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมีการกำหนดกระแสตกกระทบบ่อนที่คลื่นจะมาถึงตัวสะท้อน



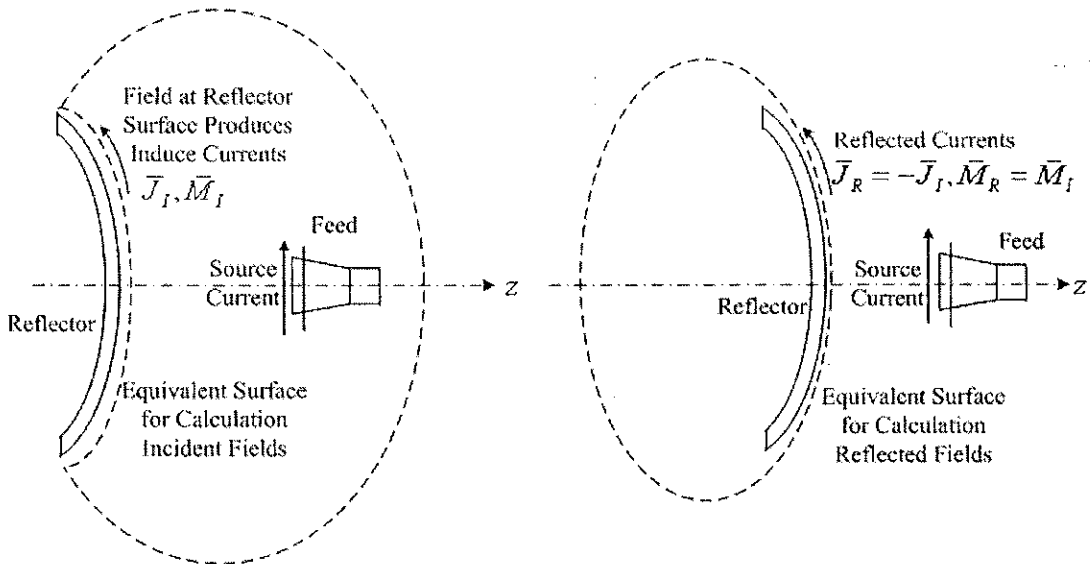
รูปที่ 4.4 สายอากาศตัวสะท้อนและพื้นผิวสมมูล

พื้นผิวสมมูลจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิด เช่น สายอากาศป้อน เพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามภายนอกพื้นผิวดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 เนื่องจากสนามภายในพื้นผิวจะถูกกำหนดคุณลักษณะจากองค์ประกอบพื้นผิวทำให้เกิดกระแสสมมูลเพื่อให้ได้สนามที่แพร่กระจายออกไป ในการคำนวณหาสนามที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อนจะต้องมีการกำหนดพื้นผิวสมมูลที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดย

พื้นผิวสมมูลจะล้อมรอบที่ด้านหน้าและด้านหลังของตัวสะท้อน สำหรับกรณีที่พื้นผิวสมมูลอยู่ด้านหน้าตัวสะท้อน จะทำการพิจารณาทั้งพื้นผิวของตัวสะท้อนและพื้นผิวสมมูลการตกกระทบของคลื่น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสอยู่บนพื้นผิวสมมูลและทำให้เกิดสนามสะท้อนกลับออกไป โดยที่กระแสจะถูกกำหนดเป็น

$$\bar{J}_R = -\bar{J}_I \quad \text{และ} \quad \bar{M}_R = \bar{M}_I \quad (4.11)$$

เมื่อตัวห้อย R แสดงถึงกระแสที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับบนพื้นผิวสมมูล และ I แสดงถึงกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวสมมูล เมื่อกระแสแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าสมมูลหาได้โดยใช้สมการที่ (3.75) และ (3.76)

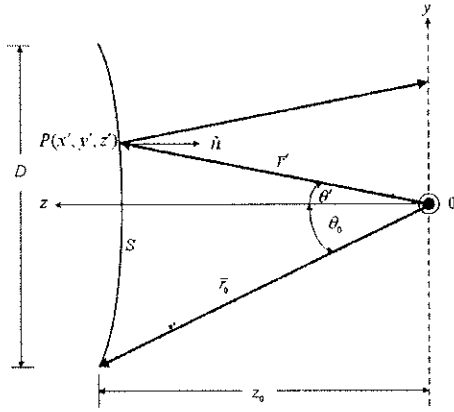


รูปที่ 4.5 พื้นผิวสมมูลเพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อน

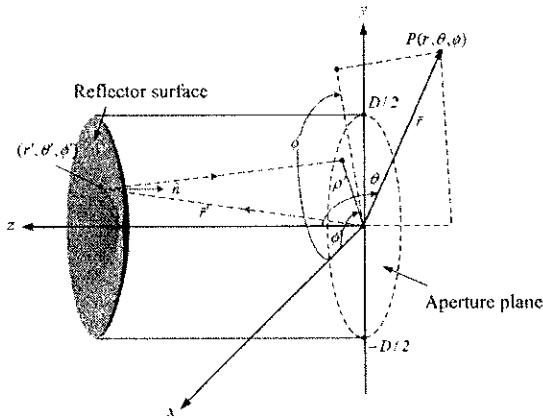
2.2 กระบวนการในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

ในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนได้มีการกำหนดการส่องของสนามที่ออกจากสายอากาศป้อนมาปรากฏบนตัวสะท้อนให้เหมาะสมที่สุด (optimal illumination) โดยความกว้างลำคลื่นของสายอากาศป้อนจะต้องแคบเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดการล้นออกจากตัวสะท้อนและกว้างเพียงพอเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณา

การวางตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด รูปที่ 4.6 แสดงเรขาคณิตของสายอากาศตัวสะท้อนในสองมิติและสามมิติ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 เรขาคณิตของสายอากาศตัวสะท้อนในสองมิติและสามมิติ

กระบวนการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนสามารถแสดงเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

(1) กำหนดข้อมูลเริ่มต้นของสายอากาศ ได้แก่

ความถี่ของสายอากาศป้อนเท่ากับ 10 GHz ขนาดของสายอากาศป้อนปากแตรทรงพีระมิดดังแสดงในหัวข้อ 2.1 สมการพื้นผิวของตัวสะท้อนแบบต่าง ๆ ได้แก่ พื้นผิวแบบควอดเรติก

ทรงกลม พาราโบลิค และไฮเพอร์โบลิค ดังแสดงในสมการที่ (4.7) ถึง (4.10) โดยที่ตัวสะท้อนแต่ละแบบมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 10λ หรือเท่ากับ 30 เซนติเมตร ตำแหน่งมุมเลี้ยงของสายอากาศป้อน กำหนดให้สายอากาศป้อนอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวสะท้อนและมีการส่องของสนามที่ออกจากสายอากาศป้อนมาปรากฏบนตัวสะท้อนที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

(2) คำนวณหาเรขาคณิตของอะเพอร์เจอร์และกระแสของสายอากาศป้อน

สายอากาศป้อนเป็นแบบปากแตรทรงพีระมิด มีอะเพอร์เจอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในการหากระแสเหนี่ยวนำจะทำการชักตัวอย่างหากระแสทุก ๆ จุด ที่อยู่บนอะเพอร์เจอร์ โดยที่พิกัด x และ y ของอะเพอร์เจอร์สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดแสดงในรูปที่ 4.7 ในการหากระแสแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (3.75) และ (3.76) คือ $\bar{M}_{eq} = -\hat{n} \times \bar{E}(\bar{r}_{eq})$ และ $\bar{J}_{eq} = \hat{n} \times \bar{H}(\bar{r}_{eq})$ เมื่อ $\bar{E}(\bar{r}_{eq})$ และ $\bar{H}(\bar{r}_{eq})$ เป็นสนามที่อยู่บนพื้นผิวสมมูลของสายอากาศป้อนปากแตรทรงพีระมิดซึ่งหาได้โดยใช้สมการที่ (4.3) สำหรับโหมด TM หรือสมการที่ (4.4) สำหรับโหมด TE เมื่อ \hat{n} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด กำลังงานที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กที่ยังไม่ได้ทำการนอร์มัลไลซ์กำหนดได้คือ

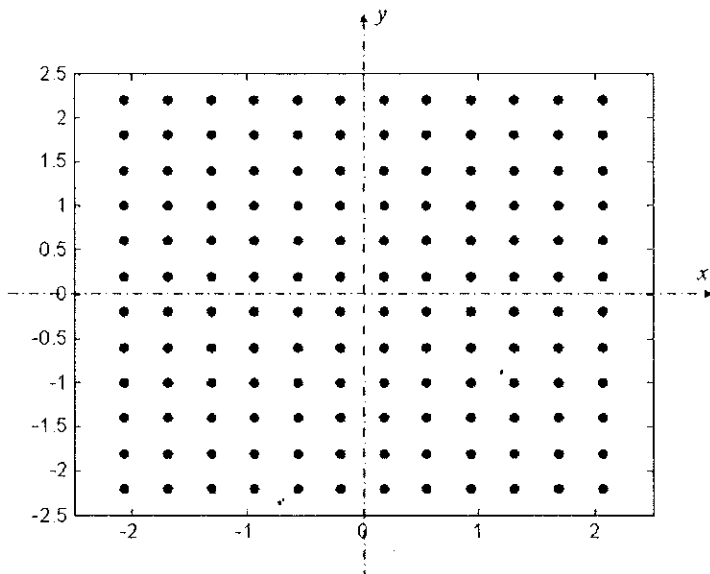
$$P_c = \frac{1}{2} Z_0 \iint_S |\bar{J}|^2 dS \quad (4.12)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \iint_S |\bar{M}|^2 dS \quad (4.13)$$

ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำสามารถนอร์มัลไลซ์ด้วยกำลังงานรวมจึงทำให้อยู่ในหน่วยแอมป์·เมตร สำหรับกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และในหน่วย โวลต์·เมตร สำหรับกระแสแม่เหล็กเหนี่ยวนำ คือ

$$\bar{J}_n = \bar{J} \sqrt{P_c} \quad (4.14)$$

$$\bar{M}_n = \bar{M} \sqrt{P_m} \quad (4.15)$$



รูปที่ 4.7 พิกัด x และ y บนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

(3) คำนวณหาพื้นที่ผิวสมมูลของตัวสะท้อน

เนื่องจากตัวสะท้อนมีพื้นผิวเปลี่ยนไปตามสมการคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกันจึงทำให้พื้นที่ผิวสมมูลแตกต่างกันด้วย ซึ่งจะเป็นไปตามสมการทางเรขาคณิตดังแสดงในสมการที่ (4.7) ถึง (4.10) และตัวสะท้อนมีอะเพอร์เจอร์เป็นวงกลมมีขอบเขตแสดงดังสมการ (4.16)

$$x^2 + y^2 = (D/2)^2 \quad (4.16)$$

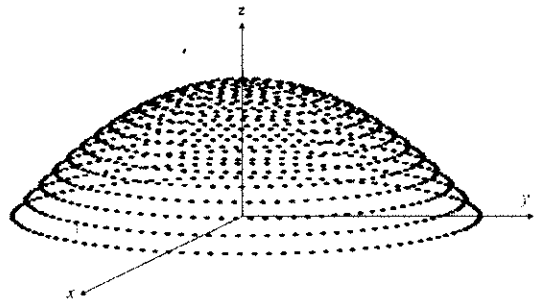
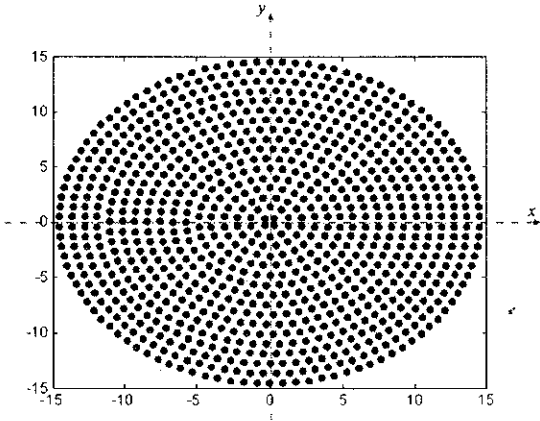
เมื่อ x และ y เป็นพิกัดบนอะเพอร์เจอร์ของตัวสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 4.8ก และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อน เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4.7) ถึง (4.10) จะทำให้ได้พิกัดต่าง ๆ บนพื้นผิวของตัวสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 4.8ข

พื้นที่ผิวของการชักตัวอย่างที่พิกัด x และ y สามารถประมาณได้โดย

$$\Delta S \approx \rho \Delta x \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + 1} \quad (4.17)$$

เมื่อ f ในสมการ (4.17) เป็นฟังก์ชันพื้นผิวของตัวสะท้อนคือ $z - f(x, y) = 0$ ซึ่ง $f(x, y)$ เป็นสมการพื้นผิวของตัวสะท้อนแต่ละแบบดังแสดงในสมการที่ (4.7) ถึง (4.10) ค่า ρ เป็นรัศมีชี้ขึ้นอยู่กับ

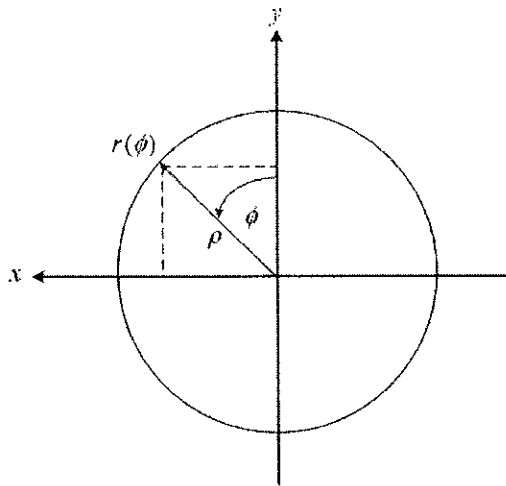
ค่า x และ y แสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับพิกัดสี่เหลี่ยม รัศมี ρ ตำแหน่ง x และ y ใดๆ มีค่า
$$\Delta\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$



(ก) พิกัด x และ y บนอะเพอร์เจอร์ของตัวสะท้อน

(ข) พิกัดบนพื้นผิวตัวสะท้อน

รูปที่ 4.8 การชักตัวอย่างบนพื้นผิวตัวสะท้อน



รูปที่ 4.9 ระบบพิกัดเชิงขั้ว

(4) คำนวณหากระแสสมมูลบนอะเพอร์เจอร์ของตัวสะท้อน

ในการคำนวณหากระแสเหนี่ยวนำบนอะเพอร์เจอร์ของตัวสะท้อนสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (3.75) และ (3.76) เมื่อ $\bar{E}(\bar{r}_{cq})$ และ $\bar{H}(\bar{r}_{cq})$ เป็นสนามที่อยู่บนพื้นผิวสมมูลของตัวสะท้อน โดย $\bar{E}(\bar{r}_{cq})$ และ $\bar{H}(\bar{r}_{cq})$ สามารถหาโดยใช้สมการที่ (3.52) ถึง (3.55) หรือสามารถใช้ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกลในสมการที่ (3.68)

ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นผิวสมมูลของตัวสะท้อนคือ $\bar{E}(\bar{r}_{cq}) = \bar{E}_e + \bar{E}_m$ และ $\bar{H}(\bar{r}_{cq}) = \bar{H}_e + \bar{H}_m$ ดังนั้นสามารถหากระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่อยู่บนพื้นผิวของตัวสะท้อนได้คือ $\bar{J}_{cq} = \hat{n} \times \bar{H}(\bar{r}_{cq})$ และ $\bar{M}_{cq} = -\hat{n} \times \bar{E}(\bar{r}_{cq})$ เมื่อ \hat{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากและมีทิศที่พุ่งออกจากพื้นผิวของตัวสะท้อนแต่ละแบบสามารถหาได้จาก

$$\hat{n} = \frac{\nabla f}{|\nabla f|} = \frac{\nabla(z - f(x, y))}{|\nabla(z - f(x, y))|}$$

โดยที่ $\nabla = \hat{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{a}_y \frac{\partial}{\partial y} + \hat{a}_z \frac{\partial}{\partial z}$

กระแสที่ทำให้เกิดสนามที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อนหาได้โดยใช้สมการที่ (4.11) คือ $\bar{J}_R = -\bar{J}_I$, $\bar{M}_R = \bar{M}_I$ เมื่อ $\bar{J}_I = \bar{J}_{cq}$ และ $\bar{M}_I = \bar{M}_{cq}$ คือกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลที่อยู่บนพื้นผิวตัวสะท้อน

(5) คำนวณหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน

เมื่อทราบกระแสที่เหนี่ยวนำบนพื้นผิวของตัวสะท้อนแล้ว ดังนั้นสามารถหาสนามที่แผ่กระจายออกไปในบริเวณสนามระยะไกลได้โดยใช้สมการที่ (3.56) ถึง (3.59) หรือสามารถใช้ฟังก์ชันตัวแผ่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะไกลในสมการที่ (3.70) คือ

$$f_{FF}(\bar{r}', \bar{J}, \hat{r}, k) = j \frac{k}{4\pi} \hat{r} \times \int \bar{J} e^{jk\hat{r} \cdot \bar{r}'} dS'$$

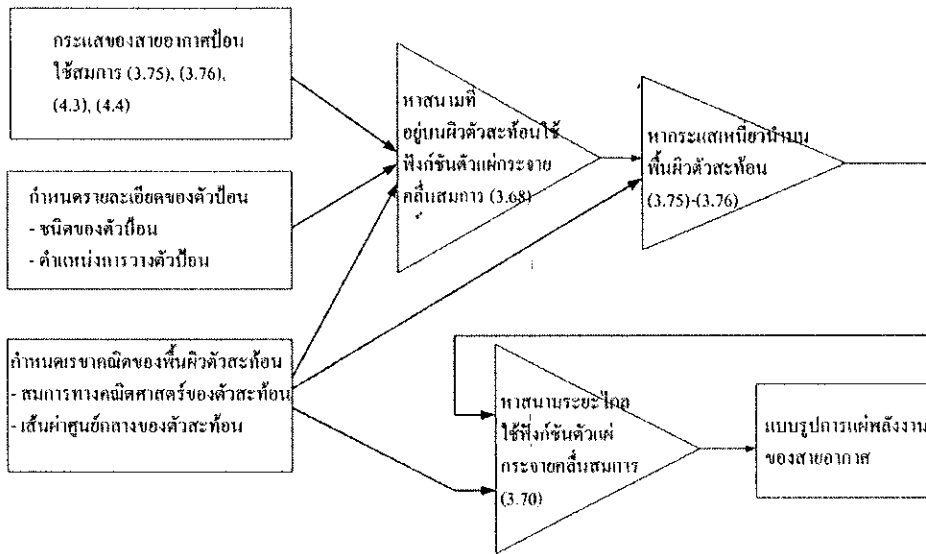
สนามที่แผ่กระจายสามารถหาได้จาก

$$\bar{H}(\bar{r}) = -f(\bar{r}', \bar{J}, \hat{r}, k)$$

$$\bar{E}(\bar{r}) = f(\bar{r}', \bar{M}, \hat{r}, k)$$

เมื่อ $\vec{r} = \hat{a}_x \cos \phi \sin \theta + \hat{a}_y \sin \phi \sin \theta + \hat{a}_z \cos \theta$, \vec{r} เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่ง (x', y', z') บนพื้นผิวตัวสะท้อน \vec{J} และ \vec{M} เป็นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กที่ทำให้เกิดสนามสะท้อนออกจากตัวสะท้อนดังแสดงในขั้นตอนที่สี่ $k = 2\pi / \lambda$ เป็นเลขคลื่น

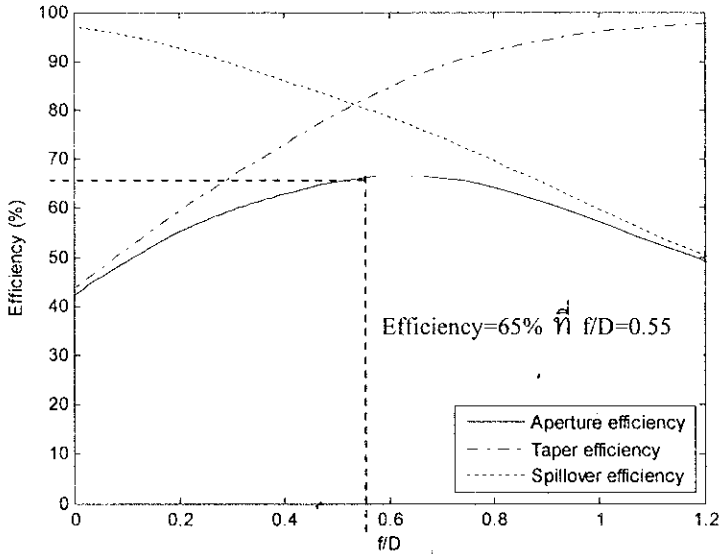
จากขั้นตอนทั้งหมดสามารถเขียนเป็นผังงานในการเขียนโปรแกรมได้คือ



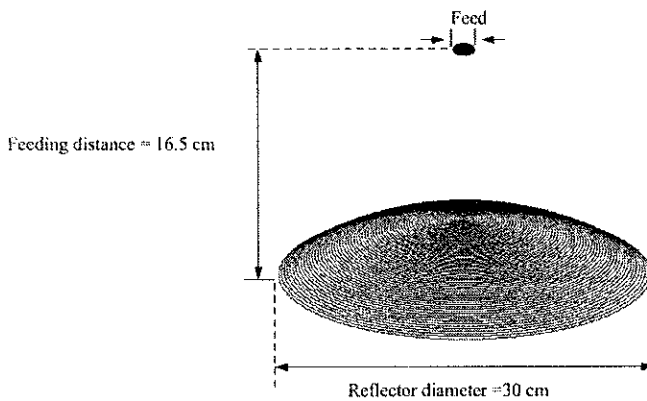
รูปที่ 4.10 ผังงานในการวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อน

3. ค่าคุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนที่สำคัญ ๆ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระดับความพลั่ว ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง อัตราขยายสูงสุด ซึ่งการวางตำแหน่งของสายอากาศป้อนจะมีผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของสายอากาศ ในงานวิจัยนี้สายอากาศป้อนจะถูกลวางที่ตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงที่สุด ซึ่งสองปัจจัยหลักที่นำมาใช้หาประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์คือ การสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการล้นออกและการเสียกำลังงานเนื่องจากการกระจายของสนามไม่สม่ำเสมอ ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 โดยรูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศตัวสะท้อน เมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าที่ตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุดคือที่อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับตัวสะท้อน (J) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสะท้อน (D) หรือ J/D มีค่าเท่ากับ 0.55 นั่นคือระยะห่างระหว่างตัวป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งที่ตำแหน่งของตัวป้อนนี้จะให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์เท่ากับ 65%



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศตัวสะท้อน



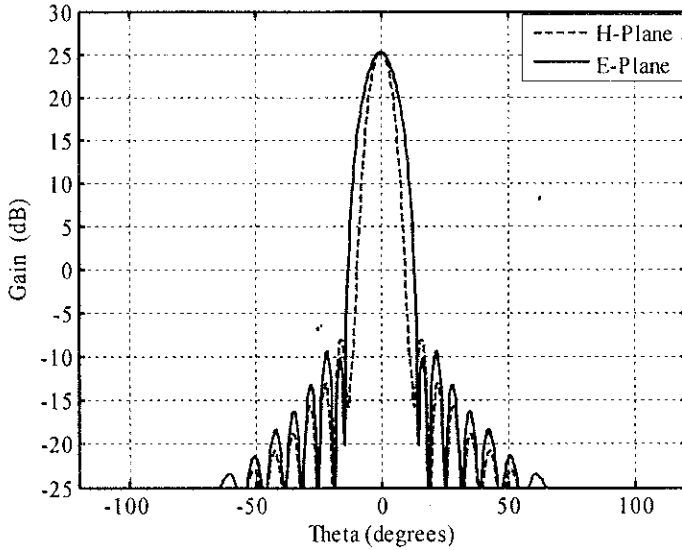
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการวางของตัวป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด

3.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

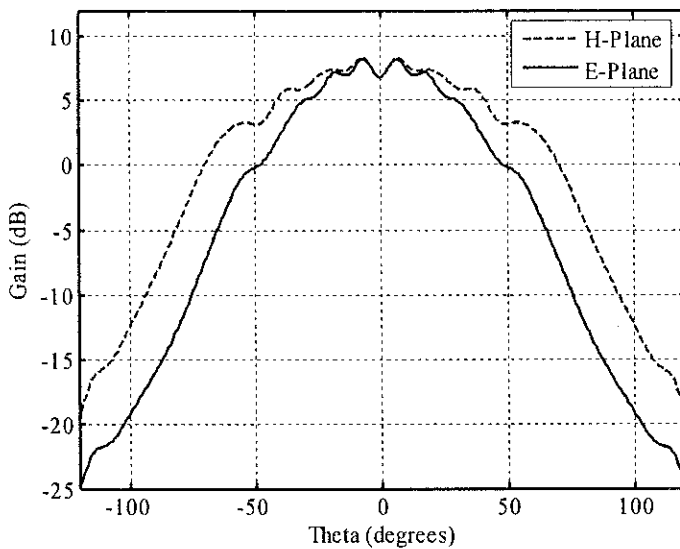
แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นวิธีการแสดงความสามารถในการแผ่พลังงานของสายอากาศออกไปในทิศทางต่าง ๆ หรือรับพลังงานที่ส่งมาจากทิศทางต่าง ๆ แบบรูปการแผ่พลังงานมีหลายลักษณะ เช่น แบบรูปขนาดยอดของสนาม แบบรูปการโพลาไรเซชัน แบบรูปวิภาค แบบรูปสภาพเจาะจงทิศทาง และแบบรูปอัตราขยาย แบบรูปเหล่านี้เป็นประโยชน์ในการใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อประยุกต์ใช้งานสายอากาศในลักษณะงานเฉพาะต่าง ๆ

รูปที่ 4.13 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลาที่มี การป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อน (Front-Feed Parabolic Reflector Antenna) สำหรับแบบ

รูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน (Back-Feed Reflector Antenna) ที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.14

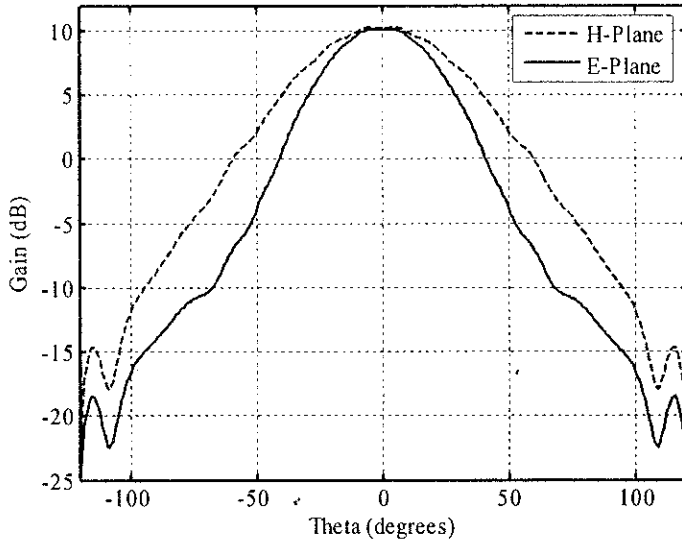


รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหน้าของตัวสะท้อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และ $f/D = 0.5$

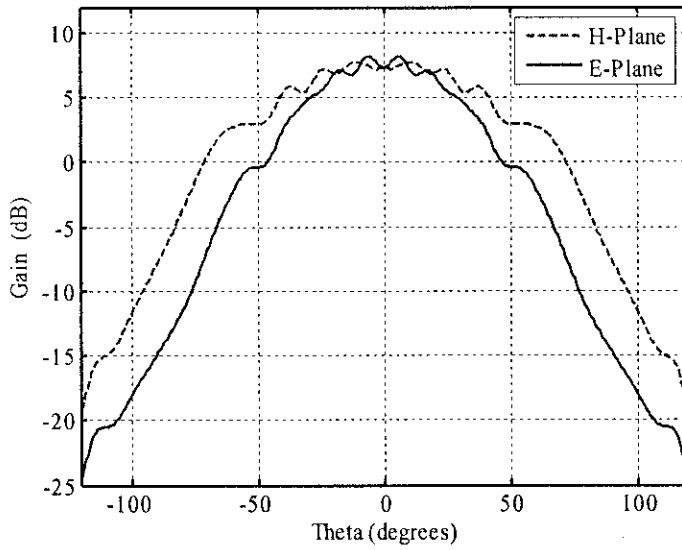


(ก) ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบควอดเรติก

รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน

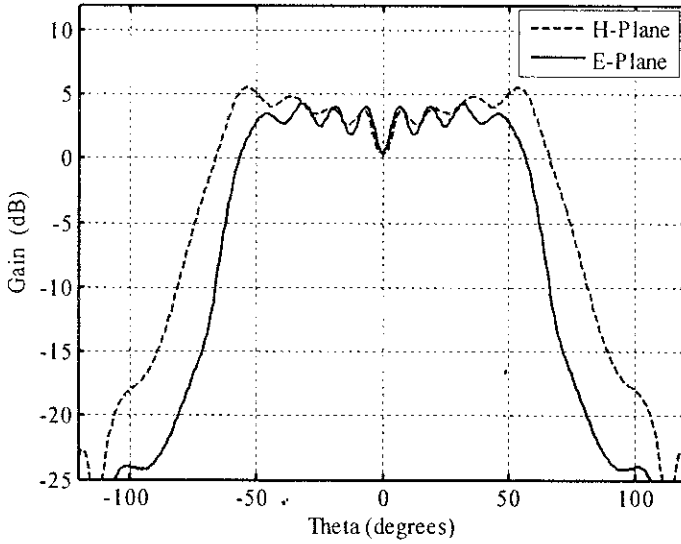


(ข) ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบทรงกลม



(ค) ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบพาราโบลิก

รูปที่ 4. 14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อน (ต่อ)

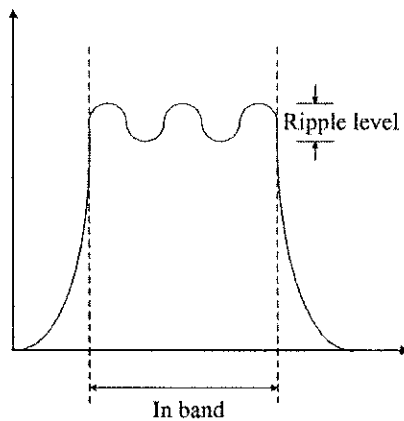


(ง) ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบไฮเพอร์โบลิก

รูปที่ 4. 14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่
ด้านหลังของตัวสะท้อน (ต่อ)

3.2 ระดับความพลิว

ระดับความพลิว คือ ระดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ หาได้จากความแตกต่าง
ระหว่างระดับของสัญญาณสูงสุดและระดับของสัญญาณที่มีค่าต่ำสุด ในย่านที่ทำการพิจารณาดัง
รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ระดับความพลิว

ความพลัวที่ปรากฏบนแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในรูปที่ 4.14 เกิดจากสายอากาศตัวสะท้อนเมื่อทำการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนจะไม่มีจุดโฟกัสในการวางตำแหน่งตัวป้อน จึงทำให้เกิดคลื่นกระจัดกระจายออกไปโดยขึ้นอยู่กับคลื่นที่มาตกกระทบลงบนสะท้อน ดังนั้นเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนวางที่ตำแหน่งที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด ระดับความพลัวในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบไฮเพอร์โบลิกมีระดับความพลัวสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก ควอดเรติก และตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบทรงกลมมีระดับความพลัวต่ำที่สุด โดยมีระดับความพลัวในระนาบสนามไฟฟ้าเป็น 3.65 dB, 1.43 dB, 1.24 dB และ 0 dB ตามลำดับ และมีระดับความพลัวในระนาบสนามแม่เหล็กเป็น 2.64 dB, 0.84 dB, 0.83 dB และ 0 dB ตามลำดับ

จากข้อมูลของระดับความพลัวในตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อต้องการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนที่ให้ระดับของสัญญาณค่อนข้างคงที่ ตัวสะท้อนที่มีพื้นผิวแบบทรงกลมจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากไม่มีความพลัวเลย รองลงมาได้แก่ แบบควอดเรติก และแบบพาราโบลิก

ตารางที่ 4.1 ระดับความพลัวเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด

สมการพื้นผิวของตัวสะท้อน	ระดับความพลัว (dB) ในระนาบสนามไฟฟ้า	ระดับความพลัว (dB) ในระนาบสนามแม่เหล็ก
ควอดเรติก	1.24	0.83
ทรงกลม	0.00	0.00
พาราโบลิก	1.43	0.84
ไฮเพอร์โบลิก	3.65	2.64

3.3 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศเป็นคุณลักษณะที่ใช้ในการอธิบายว่าสายอากาศมีความสามารถในการแผ่กระจายหรือรับพลังงานในทิศทางต่าง ๆ ได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งอัตราขยายสูงสุดของตัวสะท้อนแต่ละแบบเมื่อวางตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด อัตราขยายสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้าอัตราขยายของตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบทรงกลมมีอัตราขยายสูงสุด รองลงมาได้แก่ควอดเรติก พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยมีอัตราขยาย 10.16 dB, 8.20 dB, 7.84 dB และ 4.31 dB ตามลำดับ โดยในระนาบสนามแม่เหล็ก ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบทรงกลมมีอัตราขยายสูงสุด

รองลงมาได้แก่ ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบ ควอดเรติก พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยมีอัตราขยายเป็น 10.28 dB, 7.76 dB, 7.25dB และ 5.54 dB ตามลำดับ

การที่สายอากาศมีอัตราขยายสูงหมายความว่ากรณีที่ใช้เป็นสายอากาศส่งจะสามารถแพร่กระจายพลังงานไปยังภาครับได้สูงขึ้นนั่นคือสามารถส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการสายอากาศตัวสะท้อนที่มีอัตราขยายสูงตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบทรงกลมจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีอัตราขยายสูงสุด รองลงมาได้แก่ แบบควอดเรติก และพาราโบลิก

ตารางที่ 4.2 อัตราขยายสูงสุดเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด

สมการพื้นผิวของตัวสะท้อน	อัตราขยายสูงสุด (dB) ในระนาบสนามไฟฟ้า	อัตราขยายสูงสุด (dB) ในระนาบสนามแม่เหล็ก
ควอดเรติก	8.20	7.76
ทรงกลม	10.16	10.28
พาราโบลิก	7.84	7.25
ไฮเพอร์โบลิก	4.31	5.54

3.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็นคุณลักษณะที่ใช้ในการวิเคราะห์การให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการของสายอากาศ โดยนิยามของความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังคือ ขนาดเชิงมุมของพูประธานที่วัดตรงช่วงระหว่างตำแหน่งที่กำลังของสัญญาณสูงสุดหรือลดลงมา 3 dB

ในการหาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของตัวสะท้อนแต่ละแบบหาได้โดยการเฉลี่ยสนามในบริเวณที่เกิดความพลัว จากนั้นจึงหาความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของตัวสะท้อน เมื่อวางตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้าตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบไฮเพอร์โบลิกมีความกว้างครึ่งกำลังมากที่สุด รองลงมาได้แก่แบบควอดเรติก พาราโบลิก และแบบทรงกลม โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 103° , 87° , 85° และ 45° ตามลำดับ ในระนาบสนามแม่เหล็กตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบไฮเพอร์โบลิกมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมากที่สุด รองลงมาได้แก่ แบบควอดเรติก พาราโบลิก และแบบทรงกลม โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเป็น 120° , 98° , 96° และ 58° ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงสุด

สมการพื้นผิวของตัวสะท้อน	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ในระนาบสนามไฟฟ้า	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ในระนาบสนามแม่เหล็ก
ควอดเรติก	87°	98°
ทรงกลม	45°	58°
พาราโบลิก	85°	96°
ไฮเพอร์โบลิก	103°	120°

สำหรับในการเลือกตัวสะท้อนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานจำเป็นที่จะต้องมีการประนีประนอมระหว่างความกว้างครึ่งกำลังกับอัตราขยายของสายอากาศ กล่าวคือเมื่อสายอากาศมีอัตราขยายสูง แต่สิ่งที่ตามมาคือความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังต่ำ ดังนั้นผู้ออกแบบสายอากาศต้องพิจารณาหลาย ๆ ปัจจัย ทั้งระดับความพลิว อัตราขยาย ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่ ที่ให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง (ความกว้างลำคลื่นมาก) ดังนั้น ตัวสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลิกจะเหมาะสมที่สุด แต่ถ้าต้องการสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง สายอากาศตัวสะท้อนแบบทรงกลมจะเหมาะสมที่สุด เป็นต้น

4. สรุป

จากการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวสะท้อนที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แตกต่าง กันไปตามสมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ พบว่าจะให้คุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ ระดับความพลิว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่แตกต่างกัน ทำให้ทราบข้อดีและข้อด้อยของตัวสะท้อนแต่ละแบบจึงสามารถเลือกนำไปใช้ได้ ในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การนำไปประยุกต์ใช้งาน ว่าต้องการคุณลักษณะสายอากาศเป็นเช่นไร เช่น ในกรณีที่ต้องการสายอากาศเพื่อใช้เป็นจุดเข้าถึงเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายในห้องขนาดใหญ่ ซึ่งคุณลักษณะที่ต้องการคือ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ค่อนข้างมากเพื่อที่จะได้กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นตัวสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลิกจะถูกนำมาพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก เพราะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมาก แต่ถ้าต้องการสายอากาศที่มีค่าอัตราขยายสูงสุดที่กึ่งกลางของห้องก็จะเลือกใช้ตัวสะท้อนแบบทรงกลม เป็นต้น เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานจากรูปที่ 4.14 พบว่าถึงแม้ตัวสะท้อนจะมีคุณสมบัติตัวหนึ่งตามที่ต้องการ แต่ก็จะมีคุณสมบัติตัวอื่นที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการตามมา เช่น ตัวสะท้อนแบบ

ไฮเพอร์โบลิก ถึงแม้จะมีความกว้างลำคลื่นครั้งกำลังมาก แต่ก็จะมีระดับความพลิวของสัญญาณที่สูงด้วย ทั้งนี้ผู้ออกแบบต้องมีการประนีประนอมจะเลือกว่าต้องการคุณสมบัติใดและละทิ้งคุณสมบัติใด เพื่อที่จะให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการมากที่สุด ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกตัวสะท้อนแบบควอดเรติก เนื่องจากได้พิจารณาจากระดับความพลิว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่น ครั้งกำลังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างเหมาะสม จึงได้ทำการออกแบบ และสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา ทดสอบซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ในโครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังของตัวสะท้อนแบบควอดเรติก โดยจะอธิบายถึงวิธีการออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ จากนั้นนำสายอากาศต้นแบบมาวัดทดสอบคุณลักษณะ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก อัตราขยายของสายอากาศ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เป็นต้น และนำคุณลักษณะไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองผลด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

1. วิธีการสร้างสายอากาศต้นแบบ

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบควอดเรติกในการนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ เนื่องจากคุณลักษณะของตัวสะท้อนแบบควอดเรติก ได้แก่ ระดับความพลั้ว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างเหมาะสม อีกทั้งสมการพื้นผิวแบบควอดเรติกเป็นสมการที่ง่ายต่อการออกแบบและสร้างขึ้นมาทดสอบ คุณลักษณะต่าง ๆ ของตัวสะท้อนแบบควอดเรติกแสดงในตารางที่ 5.1 ในการออกแบบตัวสะท้อนแบบควอดเรติกได้ใช้โปรแกรม SolidWorks ในการจัดตั้งรูปร่างตัวสะท้อนให้มีผิวโค้งเป็นแบบควอดเรติก ต่อจากนั้นใช้โปรแกรม SolidCAM ดังรูปที่ 5.1 เพื่อให้ได้ G-code ซึ่งมีนามสกุลเป็นจุด H ดังรูปที่ 5.2 ในการกำหนดเส้นทางวิ่งของการกัด (Milling) เพื่อสร้างสายอากาศต้นแบบด้วยโปรแกรม EZ-CAM ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องจักร CNC (Computer Numerical Control) ทำให้ได้ตัวสะท้อนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร มีความลึก 3.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.3 และค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศเป็นดังนี้

(1) ความถี่ปฏิบัติการ 10 GHz

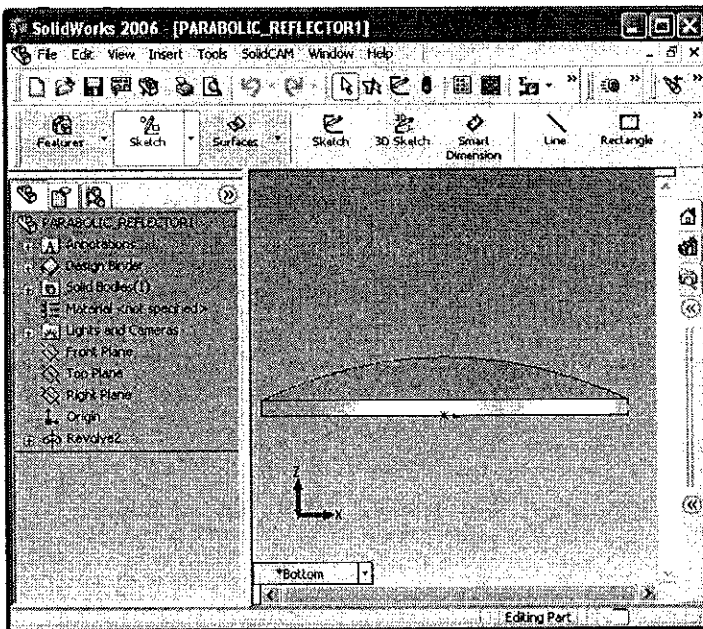
(2) สายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นดังนี้ $\rho_1 = \rho_2 = 2.3\lambda$ (6.9 cm) $a_1 = 1.5\lambda$ (4.5 cm) $b_1 = 1.6\lambda$ (4.8 cm) $a = 0.76\lambda$ (2.28 cm) และ $b = 0.34\lambda$ (1.02 cm)

(3) สายอากาศตัวสะท้อนเป็นแบบควอดเรติกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความลึก 3.5 เซนติเมตร

(4) ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อน จะพิจารณาดำแหน่งของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะเพอร์เจอร์สูงที่สุด (ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร)

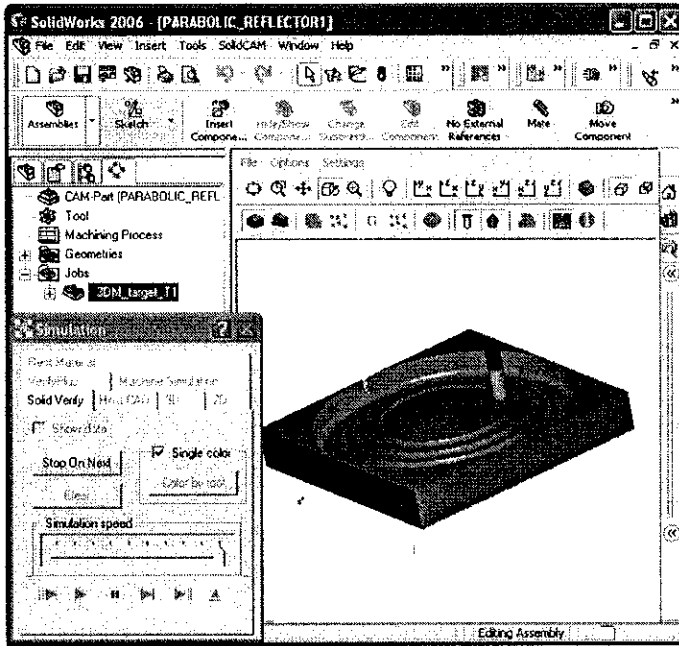
ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 19.905 เซนติเมตร โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

คุณลักษณะของสายอากาศ	ระนาบสนามไฟฟ้า	ระนาบสนามแม่เหล็ก
ระดับความพลั่ว (dB)	1.24	0.83
อัตราขยายสูงสุด (dB)	8.20	7.76
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	66°	98°



(ก)

รูปที่ 5.1 โปรแกรม SolidWorks และ SolidCAM ในการออกแบบตัวสะท้อนแบบควอดเรติก



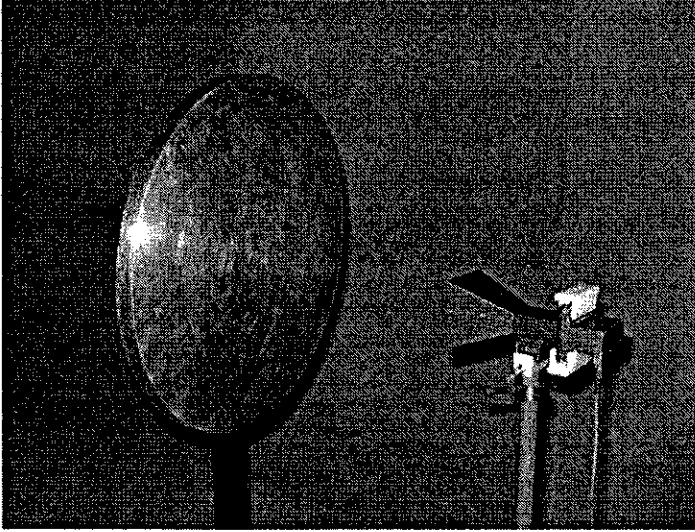
(๗)

รูปที่ 5.1 โปรแกรม SolidWorks และ SolidCAM ในการออกแบบตัวสะท้อนแบบควอดเรตริก (ต่อ)

```

P01 - Notepad
File Edit Format View Help
0 BEGIN PGM P01 MM
1 BLK FORM 0.1 Z X+0.000 Y+0.000 Z+0.000
2 BLK FORM 0.2 X+0.000 Y+0.000 Z+0.000
3 TOOL DEF 1 L+24.000 R+9.400
4 L Z+100.000 R0 F9998 M05
5 L Z+438.000 Y-23.000 R F M91
6 L R F M06
7 TOOL CALL 1 Z S 1000
8 L X-44.313 Y+2.167 Z+70.000 R0 F9998 M13
9 L X-44.313 Y+2.167 Z+50.000 R F9998 M
10 L Z+2.000 R F9998 M
11 L Z-2.500 R F33 M
12 CR X+44.174 Y-4.061 R44.364 DR+ R F1000 M
13 L X+44.267 Y-2.858 R F M
14 L X+44.313 Y-2.256 R F M
15 L X+44.359 Y-0.452 R F M
16 L X+44.363 Y-0.151 R F M
17 CR X-44.313 Y+2.167 R44.364 DR+ R F M
18 L X-48.422 Y+2.368 R F M
  
```

รูปที่ 5.2 G-code เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางวิ่งของการกัดโดยใช้เครื่องจักร CNC



รูปที่ 5.3 สายอากาศตัวสะท้อนต้นแบบ

2. ผลการทดลองวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อน

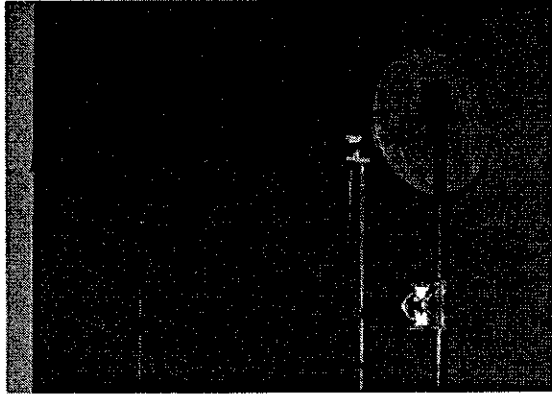
แบบรูปการแผ่พลังงานนั้นได้ทดสอบในระยะสนามระยะไกล คือ $R \geq 2D^2 / \lambda$ เมื่อ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบ และสายอากาศอ้างอิง ในการทดสอบนี้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ความถี่ 10 GHz เท่ากับ 6 เมตร และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อนมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ ได้ใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดที่ความถี่ 10 GHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 5.5 โดยแบบรูปการแผ่พลังงานนี้จะแสดงในรูปของอัตราขยาย ดังสมการพื้นฐาน (Friis transmission equation)

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (5.1)$$

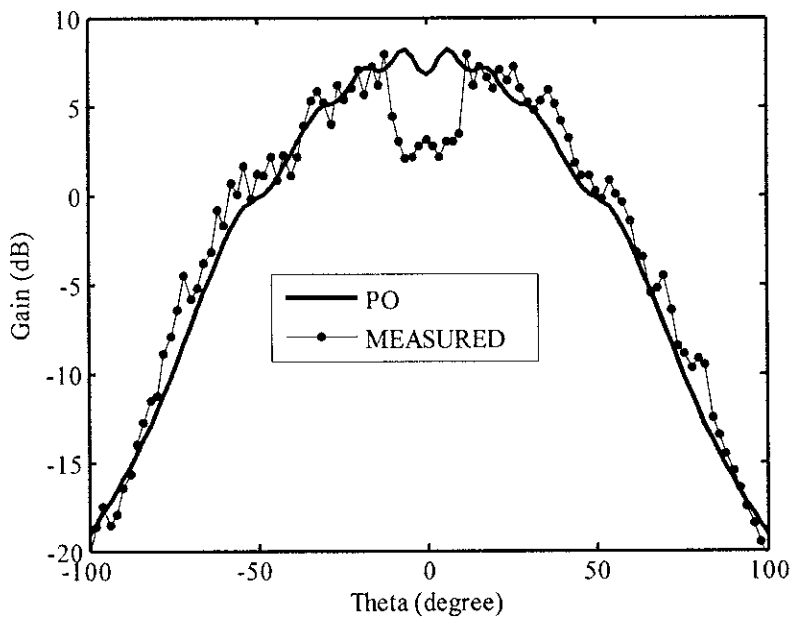
เมื่อ P_t คือ กำลังงานอินพุตที่ป้อนให้สายอากาศส่ง G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง P_r คือ กำลังงานเอาต์พุตของสายอากาศรับ G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ เมื่อนำไปหาอัตราขยายของสายอากาศรับในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$G_{r,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) - G_{t,dB} \quad (5.2)$$

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร

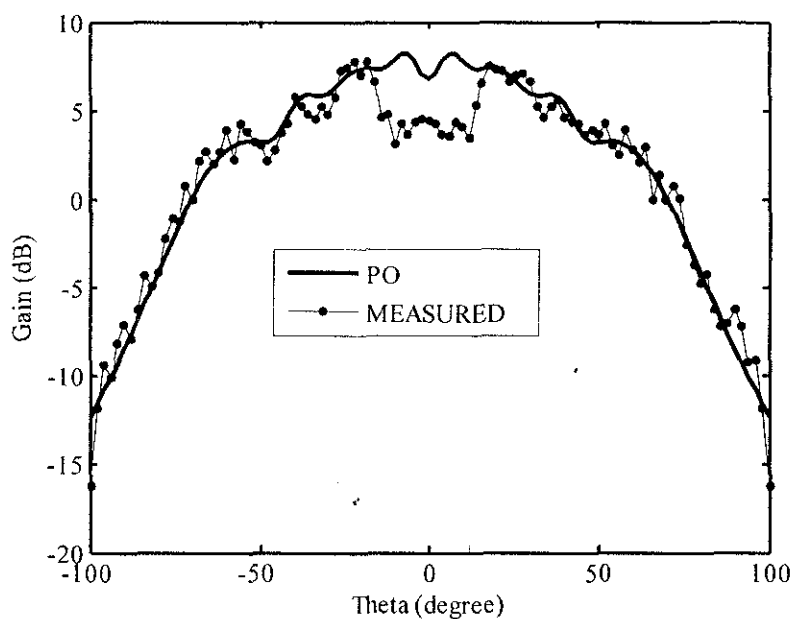


รูปที่ 5.4 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในห้อง anechoic chamber



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร (ต่อ)

ตารางที่ 5.2 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติกเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร โดยการวัดทดสอบ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ระบายสนามไฟฟ้า	ระบายสนามแม่เหล็ก
อัตราขยายสูงสุด (dB)	7.92	7.74
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (degree)	72°	102°

จากรูปที่ 5.5 เป็นการเปรียบเทียบกราฟระหว่างวิธีทฤษฎีเชิงฟิสิกส์กับการวัดทดสอบพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานมีความสอดคล้องกันทั้งในระบายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมากจะส่งผลให้อัตราขยายมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ณ ตำแหน่ง $-15^{\circ} < \theta < 15^{\circ}$ พบว่าอัตราขยายมีค่าต่ำกว่าผลการจำลองด้วยวิธีทฤษฎีเชิงฟิสิกส์ประมาณ 5 dB เนื่องจากตัวป้อนได้เกิดขบวนการสะท้อนของคลื่นที่ออกจากสายอากาศตัวสะท้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดอะพอร์เจอร์ของตัวป้อน

3. สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการออกแบบ การสร้าง และการวัดทดสอบสายอากาศ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการวัดทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณที่ด้านหลังตัวสะท้อนแบบควอดเรติก โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร พบว่าผลที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อความกว้างครึ่งกำลังมาก จะส่งผลให้อัตราขยายลดลง ซึ่งผลการวัดอัตราขยายสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 7.92 dB และ 7.74 dB ตามลำดับ อัตราขยายสูงสุดที่ได้จากการจำลองผลด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มีค่าเท่ากับ 8.20 dB และ 7.76 dB นั่นคืออัตราขยายสูงสุดจากการวัดมีค่าต่ำกว่าการจำลองผลประมาณ 0.28 dB ในระนาบสนามไฟฟ้า และ 0.02 dB ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับผลการวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 72° และ 101° ตามลำดับ ผลการจำลองด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มีค่าเท่ากับ 66° และ 98° โดยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ได้จากการวัดมีค่ามากกว่าการจำลองประมาณ 6° ในระนาบสนามไฟฟ้า และ 3° ในระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผลคือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและสายอากาศป้อนจะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน และผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

1. บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ดำเนินการศึกษา และสังเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีการป้อนสัญญาณเข้าที่ด้านหลังตัวสะท้อนที่มีผิวโค้งเป็นไปตามสมการเรขาคณิตแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบควอดเรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิก โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์มาใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศตัวสะท้อน ทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวสะท้อนแต่ละแบบ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระดับความพลั่ว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ตัวสะท้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การสื่อสารระบบเครือข่ายท้องถิ่น แบบไร้สาย ระบบเซลลูลาร์ และระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น

ในการสังเคราะห์หาคุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบต่าง ๆ โดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์นั้น เริ่มต้นจากการกำหนดข้อมูลเริ่มต้นของตัวสะท้อน ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง สมการพื้นผิวของตัวสะท้อน กำหนดชนิด ขนาด และตำแหน่งการวางของสายอากาศป้อน และความถี่ปฏิบัติการ จากนั้นหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสที่อยู่บนผิวของตัวสะท้อน โดยกระแสเหนี่ยวนำบนผิวตัวสะท้อนจะหาได้จากองค์ประกอบของสนามตกกระทบในแนวสัมผัสแต่ละจุดที่กระทำบนผิวตัวสะท้อน ซึ่งกระแสเหล่านี้จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปในสนามระยะไกลทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นจึงนำค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไปทำการวิเคราะห์หาคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ระดับความพลั่ว อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง พบว่าตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวที่ต่างกันจะให้คุณลักษณะที่เด่นและด้อยแตกต่างกันออกไป ถึงแม้ว่าตัวสะท้อนจะมีคุณลักษณะหนึ่งเป็นไปตามที่ต้องการ แต่ก็จะมีคุณลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการตามมา เช่น ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบไฮเพอร์โบลิก ถึงแม้จะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมาก แต่ก็จะมีระดับความพลั่วของสัญญาณที่สูงด้วย ทั้งนี้ผู้ออกแบบต้องมีการประนีประนอมว่าต้องการคุณสมบัติใดและละทิ้งคุณสมบัติใด เพื่อที่จะให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการมากที่สุด รายละเอียดของการจำลองผล รวมทั้งผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้โดยละเอียดในบทที่ 4 จากนั้นได้เลือกใช้ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบควอดเรติกในการนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ เนื่องจากคุณลักษณะของตัวสะท้อนแบบควอดเรติกอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างเหมาะสม อีกทั้งสมการพื้นผิวแบบควอดเรติกเป็นสมการที่ง่ายต่อการออกแบบและสร้างขึ้นมาทดสอบ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของ

สายอากาศตัวสะท้อนต้นแบบได้พิจารณาตำแหน่งการวางของสายอากาศป้อนที่ให้ประสิทธิภาพของอะพอร์เจอร์สูงสุด (ระยะห่างระหว่างสายอากาศป้อนกับตัวสะท้อนเท่ากับ 16.5 เซนติเมตร) พบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานมีความสอดคล้องกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยผลของการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 6.1 ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสะท้อนและสายอากาศป้อนจะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน และผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 6.1 คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบควอดเรติก

คุณลักษณะของสายอากาศ	ตำแหน่งตัวป้อนห่างจากตัวสะท้อน 16.5 เซนติเมตร	
	E-plane	H-plane
อัตราขยายสูงสุด (ผลวัด)	7.92	7.74
อัตราขยายสูงสุด (PO)	8.20	7.76
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (ผลวัด)	72°	101°
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (PO)	66°	98°

2. ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปที่ผ่านมามองเห็นได้ว่า นอกจากการสังเคราะห์คุณสมบัติของตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบควอดเรติก ทรงกลม พาราโบลิก และไฮเพอร์โบลิกแล้ว สามารถที่จะวิเคราะห์ตัวสะท้อนที่มีสมการพื้นผิวแบบอื่น ๆ เพิ่ม เช่น แบบสามเหลี่ยม เกาส์ โคไซน์ โคไซน์กำลังสอง เป็นต้น เพื่อที่จะได้สายอากาศตัวสะท้อนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับการสื่อสารแบบไร้สาย นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการพัฒนาอัตราขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น อาจทำได้โดยการเพิ่มตัวสะท้อนรอง (subreflector) ซึ่งสามารถเลือกตัวสะท้อนจากที่ได้สังเคราะห์หาคุณลักษณะมาแล้วว่าตัวสะท้อนแบบใดที่น่าจะเหมาะสมในการนำมาทำเป็นตัวสะท้อนรอง สายอากาศตัวสะท้อนต้นแบบในงานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้สายอากาศปากแตรทรงพีระมิดเป็นสายอากาศป้อนทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความไม่สมมาตร สามารถปรับปรุงได้โดยใช้สายอากาศป้อนแบบอื่น เช่น สายอากาศปากแตรรูปกรวย หรือสายอากาศปากแตรลูกฟูกรูปกรวย เป็นต้น จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวสะท้อนโดยใช้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ มีข้อจำกัดเรื่องของการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องก็ต่อเมื่อขนาดของตัวสะท้อนต้องมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น และจะสามารถ

ทำนายสนามได้แม่นยำเฉพาะช่วงลำคลื่นพหุหลักและพหุข้างแรก ๆ เท่านั้น นอกจากนี้วิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ยังไม่ได้คิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ (edge diffraction effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติของสายอากาศตัวสะท้อน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเพิ่มวิธีการในการวิเคราะห์สายอากาศโดยรวมผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของตัวสะท้อนด้วย เช่น ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงฟิสิกส์ เป็นต้น

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงการวิเคราะห์และผลการทดลองจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้สนใจศึกษาและค้นคว้า ในเรื่องของสายอากาศแบบตัวสะท้อน และวิธีการวิเคราะห์เชิงเลขของวิธีทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ทั้งในโครงสร้างในงานวิจัยนี้ รวมถึงโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

ภาคผนวก

รายละเอียดของสมการทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์

1. การใช้ประโยชน์ของเอกลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้ $g = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$ เป็นฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ ซึ่งมีระยะทาง

$$R = |\bar{R}| = |\bar{r} - \bar{r}'| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

เมื่อ $\bar{r}' = \hat{a}_x x' + \hat{a}_y y' + \hat{a}_z z'$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิด และ $\bar{r} = \hat{a}_x x + \hat{a}_y y + \hat{a}_z z$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดสังเกต ซึ่งเกรเดียนต์ของกรีนฟังก์ชันแบบสเกลาร์กำหนดโดยสมการ

$$\nabla g = -\hat{R} \left(\frac{1}{R} + jk \right) g \quad (1)$$

เมื่อ $k = 2\pi/\lambda$ เป็นเลขคลื่น เกรเดียนต์ของระยะทางคือ

$$\nabla R = \hat{R} \quad (2)$$

ไดเวอร์เจนซ์ของเวกเตอร์บอกระยะทาง \bar{R} คือ

$$\nabla \cdot \bar{R} = R_{ux} + R_{uy} + R_{uz} \quad (3)$$

เมื่อองค์ประกอบของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยคือ

$$R_{ux} = \bar{R} \cdot \hat{a}_x = \frac{x-x'}{R} \quad R_{uy} = \bar{R} \cdot \hat{a}_y = \frac{y-y'}{R} \quad R_{uz} = \bar{R} \cdot \hat{a}_z = \frac{z-z'}{R} \quad (4)$$

โดยที่ $\hat{R} = \hat{a}_x R_{ux} + \hat{a}_y R_{uy} + \hat{a}_z R_{uz} = \frac{\bar{R}}{R}$

ถ้า \bar{E} เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ดังนั้น

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = \nabla \nabla \cdot \bar{E} - \nabla^2 \bar{E} \quad (5)$$

2. อนุพันธ์ของฟังก์ชันกรีนไดโอดิก

อนุพันธ์ของกรีนฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าและอนุพันธ์ของกรีนฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กซึ่งอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ที่กำหนดในสมการที่ (3.31) (3.32) และ (3.33) คือ

$$\bar{\bar{G}}_{EJ} = -j\omega\mu \left(\bar{1} + \frac{\nabla\nabla}{k^2} \right) g \quad \bar{\bar{G}}_{HM} = -j\omega\varepsilon \left(\bar{1} + \frac{\nabla\nabla}{k^2} \right) g \quad (6)$$

เมื่อส่วนของ $\nabla\nabla g$ เป็นไดแอด ซึ่งแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \nabla\nabla g &= \begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{bmatrix} \left(-\left(\frac{1}{R} + jk \right) g \begin{bmatrix} R_{ux} & R_{uy} & R_{uz} \end{bmatrix} \right) \\ &= g \left(\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{R} + jk \right)^2 \right) \begin{bmatrix} R_{ux} \begin{bmatrix} R_{ux} & R_{uy} & R_{uz} \end{bmatrix} \\ R_{uy} \begin{bmatrix} R_{ux} & R_{uy} & R_{uz} \end{bmatrix} \\ R_{uz} \begin{bmatrix} R_{ux} & R_{uy} & R_{uz} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R} + jk \right) g \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 - R_{ux}^2 & -R_{ux}R_{uy} & -R_{ux}R_{uz} \end{bmatrix} \\ -\left(\frac{1}{R} + jk \right) g \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -R_{ux}R_{uy} & 1 - R_{uy}^2 & -R_{uy}R_{uz} \end{bmatrix} \\ -\left(\frac{1}{R} + jk \right) g \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -R_{ux}R_{uz} & -R_{uy}R_{uz} & 1 - R_{uz}^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \\ &= \frac{g}{R^2} \hat{R}\hat{R} + g \left(\frac{1}{R} + jk \right)^2 \hat{R}\hat{R} - \frac{g}{R} \left(\frac{1}{R} + jk \right) \left(\bar{1} - \hat{R}\hat{R} \right) \\ &= g\hat{R}\hat{R} \left(\frac{2}{R^2} + j\frac{2k}{R} - k^2 \right) - g \left(\bar{1} - \hat{R}\hat{R} \right) \left(\frac{1}{R^2} + j\frac{k}{R} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อนำสมการ (7) แทนในสมการ (5) ทำให้ได้ $\bar{\bar{G}}_{EJ}$ และ $\bar{\bar{G}}_{HM}$ ซึ่งฟังก์ชันกรีนไดโอดิกอื่น ๆ $\bar{\bar{G}}_{HJ}$ และ $\bar{\bar{G}}_{EM}$ เป็น

$$\begin{aligned} \bar{\bar{G}}_{HJ}(\vec{r}, \vec{r}') &= -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \bar{\bar{G}}_{EJ}(\vec{r}, \vec{r}') = -\nabla \times \left(\bar{1} g + \frac{\nabla\nabla}{k^2} g \right) \\ &= -\nabla \times \left(\bar{1} g \right) = -(\nabla g) \times \bar{1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{G}_{EM}(\bar{r}, \bar{r}') = (\nabla g) \times \bar{1} \quad (9)$$

โดยที่ $\nabla \times (\nabla \nabla g) = 0$

บรรณานุกรม

- Balanis, C. A. (1989). Advanced Engineering Electromagnetics. John Wiley & Sons. New York.
- Balanis, C. A. (1997). Antenna Theory Analysis and Design. John Wiley & Sons. New York.
- Bergmann, J.R., Hasselmann, F.J.V., Branco, M.G.C. (2002). MoM Analysis of a Reflector Antenna Design for Omnidirectional Coverage. Antennas and Propagation Society International Symposium. 4: 148-151.
- Bergmann, J.R., Hasselmann, F.J.V., Pereira, L.C.P., Castello Branco, M.G. (1998). Reflector Antenna Configurations for Radio Base Stations in Cellular Communications. IEEE-APS Conference on Antennas and Propagation for Wireless Communications. 1-4: 61-64.
- Diaz, L., and Milligan, T. (1996). Antenna Engineering Using Physical Optics: Practical CAD Techniques and Software. Boston London Artech House.
- Felsen, L. B. and Marcuvitz, N. (1973). Radiation and Scattering of Waves. Prentice-Hall. Englewood Cliffs.
- Gennarelli, C., Pelosi, G., Riccio. (1998). Physical Optics Analysis of the Field Backscattered by a Depolarizing Trihedral Corner Reflector. IEE Proceedings Microwaves on Antennas and Propagation. 145: 213-218.
- Griesser, T. and Constantine Balanis, A. (1985). Backscatter Analysis of Triangular Corner Reflectors Using Geometrical Theory of Diffraction and Physical optics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-35(10): 650-660.
- Griesser, T. and Constantine Balanis, A.(1987). Backscatter Analysis of Dihedral Corner Reflectors Using Physical Optics and Physical Theory of Diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-35(10): 1137-1147.
- Harrington, R. F. (1961). Time-Harmonic Electromagnetic Fields. McGraw-Hill. New York.
- I-Fong Chen, Chia-Mei Peng, Sheng-Chieh Liang. (2005). Single Layer Printed Monopole Antenna for Dual ISM-Band Operation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 53(2): 1270-1273.
- James G.L. and Kerdelmidis V. (1973). Reflector Antenna radiation Pattern Analysis by Equivalent Edge Current. IEEE Trans. on Antenna and Propagation. AP-21: 19-24.
- James, J.D., and Hall, P.S. (1989). Handbook of Microstrip Antenna. Vol.1. London.

- Lorenzo, J.A.M., Pino, A.G., Vega, I., Arias, M., Rubinos, O. (2005). ICARA: Induced-Current Analysis of Reflector Antennas. IEEE Antennas and Propagation Magazine. (47): 92-100.
- Ludwig, A. C. (1973). The Definitions of Cross Polarisation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 21(1): 116-119.
- Milligan, T. A. (1985). Modern Antenna Design. McGraw-Hill. New York.
- Rahmat-Samii, Y., Galindo-Israel, V. (1980). Shaped Reflector Antenna Analysis using the Jacobi-Bessel Series. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 28(4): 425-435.
- Rahmat-Samii Y. (1984). A Comparison between GO/Aperture-Field and Physical Optics Methods for Offset Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-32: 301-306.
- Rusch, W. V. T. (1974). A Comparison of Geometrical and Integral Fields from High-Frequency Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 62: 1603-1604.
- Rusch, W. V. T. and Potter, P. D. (1970). Analysis of Reflector Antennas. Academic Press Inc. New York.
- Scott, C. (1990). Modern Methods of Reflector Antenna Analysis and Design. Artech House. Norwood.
- Silva, L. C., Bermann, J. R., Hasselmann, F. J. V. (2001). Synthesis and Analysis of Microwave Reflector Antennas and Waveguide Feed System-Some Recent Developments. Microwave and Optoelectronics Conference. (1): 85-91.
- Silver, S., Ed. (1949). Microwave Antenna Theory and Design. New York. McGraw-Hill.
- Sim, D.-U., Choi, J.-I. (2006). A Compact Wideband Modified Planar Inverted F Antenna (PIFA) for 2.4/5-GHz WLAN Applications. Antennas and Wireless Propagation Letters. 5(1): 391-394.
- Smulders, P.F.M., Khusial, S., Herben, M.H.A.J. (2001). A Shaped Reflector Antenna for 60-GHz Indoor Wireless LAN Access Points. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 50(2): 584-591.
- Taguchi, M., Egashira, S., Tanaka, K. (1991). Sleeve Antenna with Ground Wires. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 39(1):1-7.

ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2507 เกิดที่ ตำบลปากน้ำ ประแสร์ อำเภอแกลง จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์ เมื่อปี 2532 จากนั้น ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ เมื่อปี 2537 จากนั้น ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี 2546 ประวัติการทำงานในอดีต เมื่อปี 2532 เป็นอาจารย์ประจำแผนกอิเล็กทรอนิกส์ ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ เมื่อปี 2532 ถึงปี 2533 เป็นอาจารย์พิเศษคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีประทุม กรุงเทพมหานคร นอกจากนี้ เมื่อปี 2535 ถึงปี 2536 เป็นที่ปรึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และได้เป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี 2546 ถึงปี 2548 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี เป็นผู้อำนวยการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี เป็นหัวหน้าโครงการพัฒนาและผลิตสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หัวหน้าโครงการการศึกษาไร้พรมแดน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นอาจารย์พิเศษ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น นายกส โมสรพนักงานสายวิชาการและสายปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (วาระที่ 3)