รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

แท็ก RFID แบบบางชนิดใหม่สำหรับติดกับวัสดุผิวโค้ง

New Thin RFID Tag for Curved Surface

นายชูวงค์ พงค์เจริญพาณิชย์

นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

นางสาวกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน

นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

แท็ก RFID แบบบางชนิดใหม่สำหรับติดกับวัสดุผิวโค้ง

New Thin RFID Tag for Curved Surface

นายชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

นางสาวกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน

นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

RCH
ช681ท
2555

เลขหมู่.......
เลขทะเบียน 143559
วัน.เดือน.ปี 17 ส.ค. 2559

b 12793255
i

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)//แท็ก RFID แบบบางชนิดใหม่สำหรับติดกับวัสดุผิวโค้ง

แหล่งเงิน// (ระบุแหล่งทุน) แหล่งเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 72,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

นางสาวกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน

นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าบนวัสดุอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้ง โดยใช้ผลเฉลยไอเกนฟังค์ชั่นของคลื่น เพื่อนำไปใช้กับแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งเมื่อแท็กติดอยู่บนทรงกระบอกโลหะที่เคลือบด้วยพื้นผิววัสดุ ซึ่งจะมีการศึกษาถึงข้อจำกัดการใช้งานผลเฉลยไอเกนฟังชั่นของคลื่นในการใช้งานในการคำนวณการแพร่กระจายคลื่น โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของการคำนวณจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองโดยการใช้โปรแกรมคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Microwave Studio) นอกจากนั้นขนาดของทรงกระบอกโลหะและค่าคงที่ไดอิเล็กของพื้นผิววัสดุที่เคลือบได้ถูกนำมาพิจารณา ในส่วนสุดท้ายสายอากาศแท็กสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐานภายในประเทศ (920-925 MHz) ที่มีโครงสร้างเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับวัสดุโลหะที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวโค้ง เช่น ทรงกระบอก ที่เคลือบด้วยพื้นผิววัสดุได้ถูกนำเสนอ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีของการนำแท็กไปใช้งานกับวัสดุดังกล่าวยังได้ถูกแสดงในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: New Thin RFID Tag for Curved Surface

Researcher: Mr. Chuwong Phongcharoenpanich, Miss Pitchanun Wongsiritorn, Miss Kittima Lertsakwimarn, Mr. Nattaset Mhudtongon

Faculty: Engineering **Department:** Telecommunications Engineering

ABSTRACT

Analysis of electromagnetic (EM) wave radiation by electric and magnetic sources on curved impedance surface using wave eigent function in order to use for a UHF RFID tag located at the coated metallic cylinder is proposed in this paper. The limitation for calculating the radiation pattern of the wave eigent function is also illustrated which it is investigated by using mean square error of the calculation from using wave eigent function and the simulation result from CST Microwave studio. The metallic cylinder size and the dielectric constant of the surface impedance are also studied. Lastly, the design of the UHF RFID tag using in the national standard of UHF RFID (920-925 MHz) is presented to apply for a curved metallic object such as coated cylinder. The simulation radiation pattern for the proposed tag is demonstrated.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบทุนวิจัยประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ กิตติศักดิ์ แพบัว สำหรับความช่วยเหลือในการออกแบบแท็ก RFID แบบบางชนิดใหม่สำหรับติดกับวัสดุผิวโค้ง

นายชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร
นางสาวกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน
นายณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	8
2.1 กำเนิดคลื่นชนิดเส้น	2
1.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น	2
1.1.2 แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้น	8
2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก	9
2.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก	10
2.2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก	13
2.3 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency RFID Systems)	15
2.3.1 แท็กระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag)	16
บทที่ 3 ผลการทดลอง	19
3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น	19
3.1.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)	19
3.1.1.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)	19
3.1.1.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

3.1.1.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 27

3.1.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 32

3.1.2.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 32

3.1.2.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 35

3.1.2.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 37

3.1.3 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 40

3.1.3.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 40

3.1.3.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 43

3.1.3.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 45

3.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้น 48

3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 48

3.1.1.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 48

3.1.1.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

3.1.1.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 53

3.2.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 55

3.2.2.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 55

3.2.2.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 58

3.2.2.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 60

3.2.3 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 62

3.2.3.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 62

3.2.3.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 65

3.2.3.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) 67

บทที่ 4 การออกแบบสายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิดและผลการจำลอง 74

4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิด 74

4.2 ผลการจำลอง 76

4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 76

4.2.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 76

4.2.3 ค่า $|S_{11}|$ (dB) และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 78

4.2.4 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.3 สายอากาศแท็กบนวัสดุทรงกระบอก	79
บทที่ 5 สรุปผล	81
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	83
ประวัตินักวิจัย	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างและพิกัดของแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นยาวอนันต์........ 2
รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นที่วางตัวอยู่ใกล้ทรงกระบอก (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านบน.... 9
รูปที่ 2.3 สายอากาศแท็กย่านความถี่สูงยิ่ง [8]-[9]........ 17
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก........ 17
รูปที่ 2.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในช่วงความถี่ที่ใช้งาน........ 18
รูปที่ 3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น........ 19
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)........ 20
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)........ 20
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)........ 20
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)........ 20
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.10\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.12\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.14\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.16\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.18\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.20\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.22\lambda$)........ 21
รูปที่ 3.14 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)........ 23
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)........ 24
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)........ 24
รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)........ 24
รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)........ 24
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)........ 25
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$)........ 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.12\lambda$) 25
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.14\lambda$) 25
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.16\lambda$) 26
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.18\lambda$) 26
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.20\lambda$) 26
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.22\lambda$) 26
รูปที่ 3.27 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 2 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 27
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 28
รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$) 28
รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$) 28
รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$) 28
รูปที่ 3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$) 29
รูปที่ 3.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.10\lambda$) 29
รูปที่ 3.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.12\lambda$) 29
รูปที่ 3.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.14\lambda$) 29
รูปที่ 3.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.16\lambda$) 30
รูปที่ 3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.18\lambda$) 30
รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.20\lambda$) 30
รูปที่ 3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.22\lambda$) 30
รูปที่ 3.40 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 3 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 31
รูปที่ 3.41 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3. 31
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$) 33
รูปที่ 3.43 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$) 33
รูปที่ 3.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$) 33
รูปที่ 3.45 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$) 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.46 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)........................ 34

รูปที่ 3.47 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)........................ 34

รูปที่ 3.48 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)................ 34

รูปที่ 3.49 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)...................... 35

รูปที่ 3.50 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)...................... 35

รูปที่ 3.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)...................... 36

รูปที่ 3.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)...................... 36

รูปที่ 3.53 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)...................... 36

รูปที่ 3.54 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$)...................... 36

รูปที่ 3.55 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 5 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$).............. 37

รูปที่ 3.56 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)...................... 38

รูปที่ 3.57 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)...................... 38

รูปที่ 3.58 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)...................... 38

รูปที่ 3.59 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)...................... 38

รูปที่ 3.60 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)...................... 39

รูปที่ 3.61 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)...................... 39

รูปที่ 3.62 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 6 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$).............. 39

รูปที่ 3.63 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 และกรณีที่ 6. 40

รูปที่ 3.64 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)........................ 41

รูปที่ 3.65 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)........................ 41

รูปที่ 3.66 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)........................ 41

รูปที่ 3.67 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)........................ 41

รูปที่ 3.68 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)........................ 42

รูปที่ 3.69 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)........................ 42

รูปที่ 3.70 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$)................ 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.71 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$) 43
รูปที่ 3.72 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$) 43
รูปที่ 3.73 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$) 43
รูปที่ 3.74 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$) 43
รูปที่ 3.75 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$) 44
รูปที่ 3.76 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$) 44
รูปที่ 3.77 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$) 44
รูปที่ 3.78 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 45
รูปที่ 3.79 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$) 45
รูปที่ 3.80 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$) 46
รูปที่ 3.81 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$) 46
รูปที่ 3.82 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$) 46
รูปที่ 3.83 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 46
รูปที่ 3.84 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 9 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$) 47
รูปที่ 3.85 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 8 และกรณีที่ 9. 47
รูปที่ 3.86 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$) 48
รูปที่ 3.87 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$) 48
รูปที่ 3.88 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$) 49
รูปที่ 3.89 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$) 49
รูปที่ 3.90 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$) 49
รูปที่ 3.91 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$) 49
รูปที่ 3.92 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 50
รูปที่ 3.93 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$) 51
รูปที่ 3.94 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$) 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.95 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$) 51
รูปที่ 3.96 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$) 51
รูปที่ 3.97 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$) 52
รูปที่ 3.98 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$) 52
รูปที่ 3.99 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) 52
รูปที่ 3.100 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 53
รูปที่ 3.101 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$) 53
รูปที่ 3.102 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$) 53
รูปที่ 3.103 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$) 53
รูปที่ 3.104 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$) 54
รูปที่ 3.105 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 54
รูปที่ 3.106 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 9 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$) 54
รูปที่ 3.107 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 55
รูปที่ 3.108 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$) 56
รูปที่ 3.109 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$) 56
รูปที่ 3.110 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$) 56
รูปที่ 3.111 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$) 56
รูปที่ 3.112 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$) 57
รูปที่ 3.113 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$) 57
รูปที่ 3.114 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 57
รูปที่ 3.115 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$) 58
รูปที่ 3.116 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$) 58
รูปที่ 3.117 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$) 58
รูปที่ 3.118 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$) 58
รูปที่ 3.119 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$) 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.120 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$) 59
รูปที่ 3.121 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 5 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 59
รูปที่ 3.122 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 60
รูปที่ 3.123 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$) 60
รูปที่ 3.124 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$) 60
รูปที่ 3.125 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$) 60
รูปที่ 3.126 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$) 61
รูปที่ 3.127 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 61
รูปที่ 3.128 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 6 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) 61
รูปที่ 3.129 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 และกรณีที่ 6 62
รูปที่ 3.130 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$) 63
รูปที่ 3.131 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$) 63
รูปที่ 3.132 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$) 63
รูปที่ 3.133 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$) 63
รูปที่ 3.134 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$) 64
รูปที่ 3.135 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$) 64
รูปที่ 3.136 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$) 64
รูปที่ 3.137 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$) 65
รูปที่ 3.138 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$) 65
รูปที่ 3.139 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$) 65
รูปที่ 3.140 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$) 65
รูปที่ 3.141 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$) 66
รูปที่ 3.142 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.10\lambda$) 66
รูปที่ 3.143 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$) 66
รูปที่ 3.144 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

รูปที่ 3.145 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$) 67

รูปที่ 3.146 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$) 67

รูปที่ 3.147 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$) 67

รูปที่ 3.148 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$) 68

รูปที่ 3.149 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$) 68

รูปที่ 3.150 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 9 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$)........ 68

รูปที่ 3.151 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 8 และกรณีที่ 9 69

รูปที่ 3.152 ตัวอย่างเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY-plane ของกรณีที่ 2 ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำ 69

รูปที่ 4.1 สายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิด 75

รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 76

รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 77

รูปที่ 4.4 ค่า และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 78

รูปที่ 4.5 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก 78

รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบสนามแม่เหล็ก ( ) ในระนาบ XY (XY-plane) 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ 16

ตารางที่ 3.1สรุปผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าบนวัสดุอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้งที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio 65

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio กรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากโดยเฉพาะระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งซึ่งในปัจจุบันได้มีรูปแบบการนำไปใช้งานที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้กับกล่องสินค้า ตู้คอนเทนเนอร์ ลังไม้ ถังแก๊ส และอื่นๆ โดยทั่วไปสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุจะมีลักษณะการทำงานเป็นเสมือนแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดไฟฟ้า[1]-[2] ดังนั้นค่ากำลังงานทางด้านหลังของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อนำแท็กดังกล่าวไปติดบนวัสดุโลหะพื้นผิวโค้งที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์ ตัวอย่างเช่นถังแก๊ส ถังน้ำมันรถยนต์ ถังน้ำมัน และอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้งานกับวัสดุดังกล่าวอาจก่อให้เกิดผลกระทบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแท็กที่นำไปติด[3] ดังนั้นการทำนายสนามแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดบนพื้นผิวโค้งที่ประกอบไปด้วยพื้นผิววัสดุจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบสายอากาศแท็ก นอกจากนั้นสำหรับปัญหาการจำลองเมื่อสายอากาศติดอยู่บนวัสดุที่มีขนาดใหญ่ มักจะมีปัญหาในการใช้ระยะเวลาในการจำลองที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการทำนายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้ผลเฉลยไอเกนฟังค์ชั่นของคลื่น[4]-[5] จากนั้นการแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยพื้นผิวไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุเคลือบได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาขอบเขตการใช้งานจากการใช้ผลเฉลยไอเกนฟังค์ชั่นของคลื่น และจากการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กถูกลดทอนจากวัสดุทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์น้อยกว่าแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นเราจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการนำเอาแท็กไปใช้งานติดอยู่บนวัสดุตัวนำที่เคลือบด้วยพื้นผิวอิมพีแดนซ์โดยการเพิ่มบริเวณการใช้งานทางด้านหลังของวัสดุดังกล่าว จากการใช้แท็กที่เป็นลักษณะเสมือนกับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก ดังนั้นการออกแบบสายอากาศแท็กที่ทำงานเสมือนแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กในเบื้องต้นจึงเป็นอีกจุดประสงค์หนึ่งของงานวิจัยชิ้นนี้ โดยแท็กที่นำเสนอคือสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ

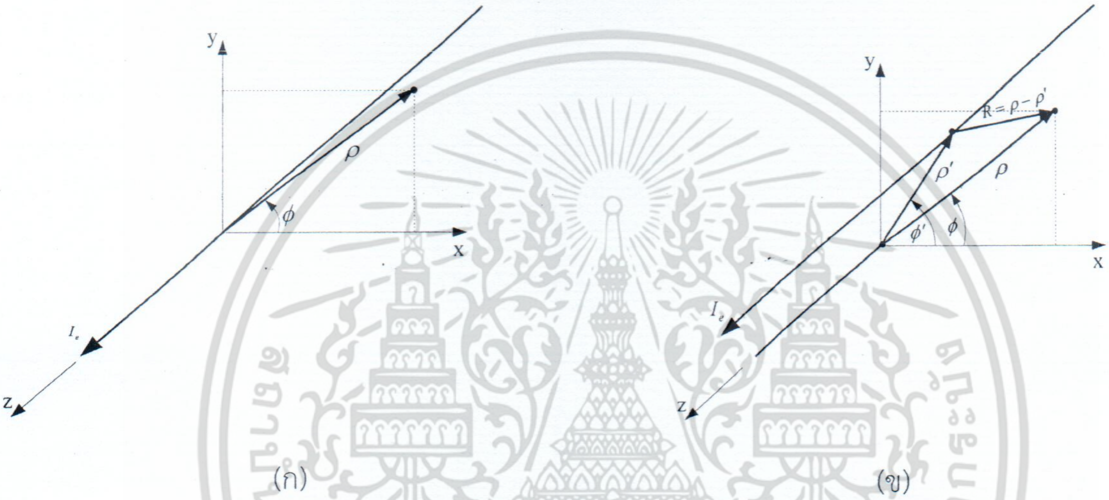
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 กำเนิดคลื่นชนิดเส้น

แหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นประเภทหนึ่งที่สามารถใช้เป็นตัวอย่างและอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น โดยแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นยาวอนันต์นี้จะสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ 1. แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้น และ 2. แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น



รูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างและพิกัดของแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นยาวอนันต์

1.1.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น

โครงสร้างของแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นแสดงดังรูป 2.1 (ก)-(ข) เมื่อกำหนดให้ความยาวของแหล่งกำเนิดคลื่นมีความยาวเป็นอนันต์ กระแสไฟฟ้าจะแสดงได้ดังสมการ

$$I_e(z') = \hat{a}_z I_e \qquad (1)$$

เมื่อ I_e เป็นค่าคงที่ เนื่องมาจากกระแสจะไหลไปตามแนวแกน z สนามจะแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดเป็นโหมด TM^Z ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก

$$F = 0$$

$$A = \hat{a}_z A_z(\rho,\phi,z)$$

$$= \hat{a}_z \left[C_1 H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho) \right]$$
$$\times \left[C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi) \right]\left(A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z} \right) \qquad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นนั้นมีความยาวเป็นอนันต์ สนามจะเป็นสองมิติ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตามแนวแกน z ดังนั้น

$$\beta_z = 0 \Rightarrow \beta_\rho^2 + \beta_z^2 = \beta^2 \Rightarrow \beta_\rho = \beta \tag{3}$$

นอกจากนี้ เนื่องมาจากคลื่นจะมีการแพร่กระจายออกจากตัวเท่านั้น จึงทำให้

$$C_1 = 0 \quad (4ก)$$

$$m = 0 \quad (4ข)$$

ดังนั้นสมการที่ (4-2) ถูกลดรูปเป็น

$$A = \hat{a}_z A_z(\rho) = \hat{a}_z A_0 H_0^{(2)}(\beta\rho) \tag{5}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$E_\rho = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho\partial z} = 0 \quad (6ก)$$

$$E_\phi = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 A_z}{\partial\phi\partial z} = 0 \quad (6ข)$$

$$E_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2\right)A_z = -j\omega A_0 H_0^{(2)}(\beta\rho) \quad (6ค)$$

$$H_\rho = \frac{1}{\mu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial A_z}{\partial\phi} = 0 \quad (6ง)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial\rho} = -\frac{A_0}{\mu}H_0^{(2)\prime}(\beta\rho) = A_0\frac{\beta}{\mu}H_1^{(2)}(\beta\rho) \quad (6จ)$$

$$H_z = 0 \quad (6ฉ)$$

เมื่อ $' \equiv \partial/\partial\rho$

ค่าคงที่ A_0 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$I_e = \lim_{\rho\to 0}\oint_C \mathbf{H}\cdot dl = \lim_{\rho\to 0}\int_0^{2\pi}\left(\hat{a}_\phi H_\phi\right)\cdot\left(\hat{a}_\phi \rho d\phi\right) = \lim_{\rho\to 0}\int_0^{2\pi} H_\phi \rho d\phi \tag{7}$$

เนื่องจากการอินติเกรทของสมการที่ (7) จะถูกแสดงในรูปของลิมิตเมื่อ $\rho \to 0$ จากสมการที่ (6จ) Hankel function จะถูกแสดงในรูปของ asymptotic expansion ของเงื่อนไขที่ $\beta\rho$ มีขนาดเล็กมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_1^{(2)}(\beta\rho) = J_1(\beta\rho) - jY_1(\beta\rho) \overset{\beta_\rho \cong 0}{} \; \frac{\beta\rho}{2} + j\frac{2}{\pi}\left(\frac{1}{\beta\rho}\right) \overset{\beta_\rho \cong 0}{} \; j\frac{2}{\pi}\left(\frac{1}{\beta\rho}\right) \tag{8}$$

ดังนั้นสมการที่ (7) จะสามารถลดรูปได้ จากการใช้สมการที่ (6จ) และ (8)

$$I_e = \lim_{\rho\to 0}\int_0^{2\pi}\left[A_0\frac{\beta}{\mu}H_1^{(2)}(\beta\rho)\right]\rho d\phi \simeq jA_0\frac{2}{\pi\mu}\int_0^{2\pi}\frac{1}{\rho}\rho d\phi = jA_0\frac{4}{\mu} \tag{9}$$

หรือ

$$A_0 = -j\frac{\mu}{4}I_e \tag{9ก}$$

ดังนั้นจากสมการที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นจะสามารถเขียนได้ในรูป

$$E_z = -I_e\frac{\omega\mu}{4}H_0^{(2)}(\beta\rho) = -I_e\frac{\beta^2}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}(\beta\rho) \tag{10ก}$$

$$H_\phi = -jI_e\frac{\beta}{4}H_1^{(2)}(\beta\rho) \tag{10ข}$$

ในแต่ละองค์ประกอบของสนามจะเป็นสัดส่วนกับ Hankel function ชนิดที่สอง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังจุดสังเกต เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นถูกย้ายจากจุดกำเนิดไปยังตำแหน่งซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1(ข) จากสมการที่ (10ก) และ (10ข) จะสามารถเขียนได้ในรูป

$$E_z = -I_e\frac{\omega\mu}{4}H_0^{(2)}(\beta R) = -I_e\frac{\beta^2}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}(\beta|\rho-\rho'|) \tag{11ก}$$

$$H_\phi = -jI_e\frac{\beta}{4}H_1^{(2)}(\beta R) = -jI_e\frac{\beta}{4}H_1^{(2)}(\beta|\rho-\rho'|) \tag{11ข}$$

เมื่อ

$$R = |\rho-\rho'| = \sqrt{\rho^2 + (\rho') - 2\rho\rho'\cos(\phi-\phi')} \tag{11ค}$$

$\phi =$ มุมในแนวของเส้นรอบวง (Circumferential angle around source)

ณ. จุดสังเกตระยะไกลจนกระทั่งเมื่อ $\beta\rho \to$ มีขนาดใหญ่ Hankel function ในสมการที่ (10ก) และ (10ข) สามารถที่จะประมาณค่าได้จาก asymptotic expansion สำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_0^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho \to large}{\simeq} \sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho}}e^{-j\beta\rho} \quad (12ก)$$

$$H_1^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho \to large}{\simeq} j\sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho}}e^{-j\beta\rho} \quad (12ข)$$

ดังนั้น (10ก) และ (10ข) สามารถที่จะทำให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายสำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

$$E_z = -I_e\frac{\beta^2}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho \to large}{\simeq} -\eta I_e\sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}}\frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (13ก)$$

$$H_\phi = -jI_e\frac{\beta}{4}H_1^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho \to large}{\simeq} I_e\sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}}\frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (13ข)$$

โดยอัตราส่วนของสมการที่ (13ก) ต่อ (13ข) จะสามารถอธิบายในฐานะของ wave impedance ซึ่งจะสามารถเขียนได้ในสมการดังนี้

$$Z_\omega^{+\rho} = \frac{E_z}{-H_\phi} = \eta \quad (14)$$

เนื่องมาจาก wave impedance มีค่าเท่ากับ intrinsic impedance โดยคลื่นที่แพร่กระจายโดยแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นเป็น TEM^z

จากสมการที่ (11ก) เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นถูกย้ายจากจุดกำเนิดไปยังตำแหน่ง ρ' ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1ข สนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นคือ

$$E_z\left(\rho,\phi\right) = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right) \quad (15)$$

เมื่อ $\left|\rho-\rho'\right|$ คือระยะทางจากแหล่งจ่ายไปยังจุดสังเกต จากรูปที่ 2.2 และกฎของ cosines สมการที่ (15) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปดังนี้

$$E_z\left(\rho,\phi\right) = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)$$

$$= -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2+\left(\rho'\right)-2\rho\rho'\cos\left(\phi-\phi'\right)}\right] \quad (16)$$

สมการที่ (16) อธิบายสนามไฟฟ้าในเทอมของ Hankel function ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่ $\left|\rho-\rho'\right|=0$ สำหรับปัญหาการกระจัดกระจายจะเป็นการสะดวกมากกว่าที่จะอธิบายสนามในเทอมของฟังชั่นคลื่นในทรงกระบอก ตัวอย่างเช่น Hankel function หรือ Bessel function ซึ่งระยะในแนวรัศมีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดกำเนิด $\rho = 0$ และเนื่องมาจากทฤษฎี reciprocity สนามจะต้องสมมาตรในเทอมของระยะพิกัดของแหล่งกำเนิดคลื่นและจุดสังเกต ดังนั้นฟังชันของคลื่น (ซึ่งระยะในแนวรัศมีเริ่มต้นมาจากจุดกำเนิดของระบบพิกัด) เพื่อที่จะใช้ในการอธิบาย Hankel function ของสมการที่ (16) จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\underline{\rho \le \rho'}$$

$$f(\beta\rho') J_n(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')}$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม และจะมีค่าจำกัดที่ $\rho = 0$ จะซ้ำคาบด้วยคาบเวลาทุกๆ 2π

$$\underline{\rho \ge \rho'}$$

$$g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')}$$

เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม และเนื่อง Hankel function ชนิดที่ 2 จะต้องแสดงถึงคลื่นที่มีการเคลื่อนที่ออกและจะซ้ำคาบด้วยคาบเวลาทุกๆ 2π ดังนั้น ของสมการที่ (16) จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$H_0^{(2)}(\beta|\rho-\rho'|) = \begin{cases} \sum_{-\infty}^{+\infty} c_n f(\beta\rho') J_n(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} \text{ for } \rho \le \rho' \text{ (a)} \\ \sum_{-\infty}^{+\infty} d_n g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} \text{ for } \rho \ge \rho' \text{ (b)} \end{cases} \tag{17}$$

ณ. ตำแหน่งที่ $\rho = \rho'$ สนามของทั้งสองบริเวณจะต้องมีความต่อเนื่องกันดังนั้นจากสมการที่ (17ก) และ (17ข) จะได้ว่า

$$c_n f(\beta\rho') J_n(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} = d_n g(\beta\rho') H_n^2(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} \tag{18}$$

ซึ่งจะสามารถกำหนดให้เป็นดังนี้

$$c_n = d_n = b_n \quad (19ก)$$

$$f(\beta\rho') = H_n^2(\beta\rho') \quad (19ข)$$

$$g(\beta\rho') = J_n(\beta\rho') \quad (19ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้สมการ (19ก)-(19ค) จะสามารถเขียนสมการที่ (17ก) และ (17ข) ได้ว่า

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)=\begin{cases}\sum_{-\infty}^{+\infty} b_n J_n(\beta\rho) H_n^{(2)}(\beta\rho') e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho\le\rho' \quad \text{(a)}\\ \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n J_n(\beta\rho') H_n^{(2)}(\beta\rho) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho\ge\rho' \quad \text{(b)}\end{cases} \tag{20}$$

โดยค่า b_n นั้นจะสามารถหาได้จากการใช้สมการที่ (16) กล่าวคือ

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)=H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2+(\rho')-2\rho\rho'\cos(\phi-\phi')}\right] \tag{21}$$

เมื่อย้ายแหล่งกำเนิดไปยังระยะอนันต์ $(\rho'\to\infty)$ โดย $\phi'=0$ ระยะ R ในสมการที่ (21) ที่ถูกแสดงในรูปของรากที่สองสามารถที่จะประมาณค่าได้โดยการใช้ทฤษฎี binomial

$$\begin{aligned}\sqrt{\rho^2+(\rho')-2\rho\rho'\cos(\phi-\phi')} &\overset{\phi'=0}{\underset{\rho'\to\infty}{\simeq}} \sqrt{(\rho')^2-2\rho\rho'\cos\phi}=\rho'\sqrt{1-2\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)\cos\phi}\\ &\overset{\phi'=0}{\underset{\rho'\to\infty}{\simeq}} =\rho'\left(1-2\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)\cos\phi\right)=\rho'-\rho\cos\phi\end{aligned} \tag{22}$$

จากสมการที่ (22) เราสามารถเขียนสมการที่ (21) ใหม่ได้ว่า

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)=H_0^{(2)}\left[\beta\sqrt{\rho^2+(\rho')-2\rho\rho'\cos(\phi-\phi')}\right]\overset{\phi'=0}{\underset{\rho'\to\infty}{\simeq}} H_0^{(2)}\left[\beta(\rho'-\rho\cos\phi)\right] \tag{23}$$

สำหรับ Asymptotic form ของ Hankel function ชนิดที่ 2 สำหรับองค์ประกอบขนาดใหญ่

$$H_0^{(2)}(\alpha x)\overset{\alpha x\to\infty}{\simeq}\sqrt{\frac{2j}{\pi\alpha x}}\,j^n e^{-j\alpha x} \tag{23}$$

สมการที่ (23) จะสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)\overset{\phi'=0}{\underset{\rho'\to\infty}{\simeq}}\sqrt{\frac{2j}{\pi\alpha x}}\,j^n e^{-j\alpha x}\cdot\sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(\beta\rho)e^{jn\phi} \tag{24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (23) .ในสมการที่ (20ก) สำหรับในกรณีที่ $\phi' = 0$ และ $\rho' \to \infty$

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right) \overset{\phi'=0}{\simeq} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n J_n\left(\beta\rho\right) H_0^{(2)}\left(\beta\rho'\right) e^{jn\phi}$$

$$\underset{\rho'\to\infty}{\overset{\phi'=0}{\simeq}} \sqrt{\frac{2j}{\pi\beta\rho'}} e^{-j\beta\rho'} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n j^n J_n\left(\beta\rho\right) e^{jn\phi} \qquad (25)$$

เมื่อนำสมการที่ (23) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ (20ก) จะพบว่า

$$b_n = 1 \qquad (26)$$

ดังนั้นรูปแบบของสมการ (20) ในรูปแบบสำเร็จคือ

$$H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right) = \begin{cases} \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n\left(\beta\rho\right) H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \le \rho' \quad (a) \\ \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n\left(\beta\rho'\right) H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \ge \rho' \quad (b) \end{cases} \qquad (27)$$

จากสมการที่ (27) สามารถนำไปแทนค่าในสมการที่ (15) ได้ดังนี้

$$E_z\left(\rho,\phi\right) = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon} H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)$$

$$= -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon} \begin{cases} \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n\left(\beta\rho\right) H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \le \rho' \quad (a) \\ \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n\left(\beta\rho'\right) H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for } \rho \ge \rho' \quad (b) \end{cases} \qquad (28)$$

1.1.2 แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้น

สนามที่แพร่กระจายโดยแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการ Maxwell หรือสมการคลื่น หรือจาก ทฤษฎี duality ซึ่งจากการใช้ทฤษฎี duality สนามที่เกิดจากแหล่งจ่ายแม่เหล็กชนิดเส้นที่มีความยาวอนันต์ ของกระแส I_m ที่คงที่ จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$E_\phi = +jI_m \frac{\beta}{4} H_1^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho\ \text{large}}{\simeq} -I_m \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \qquad (29ก)$$

$$H_z = -I_m \frac{\beta^2}{4\omega\varepsilon} H_0^{(2)}\left(\beta\rho\right) \overset{\beta_\rho\ \text{large}}{\simeq} -\frac{1}{\eta} I_m \sqrt{\frac{j\beta}{8\pi}} \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \qquad (29ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นถูกเปลี่ยนแปลงไปจากจุดกำเนิด สมการของสนามจะสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมการที่ (11ก) และ (11ข)

$$E_\phi = +jI_m \frac{\beta}{4} H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right) \qquad (30ก)$$

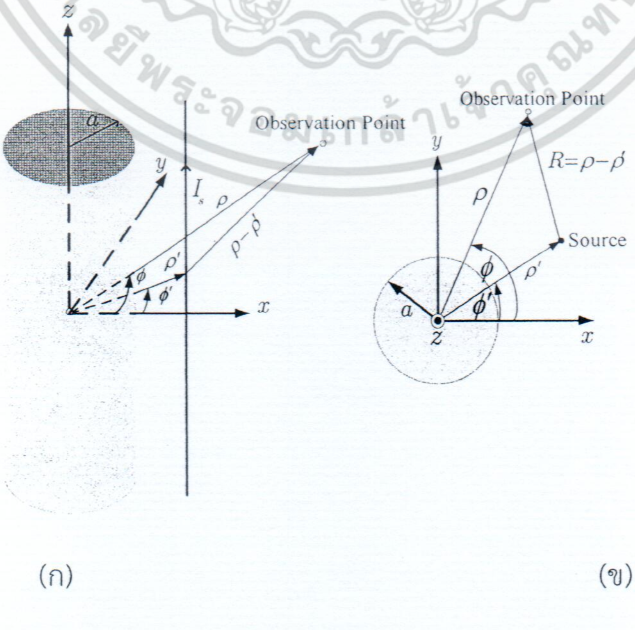
$$H_z = -I_m \frac{\beta^2}{4\omega\mu} H_0^{(2)}\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right) \qquad (30ข)$$

เช่นเดียวกันกับสมการที่ (28) เราจะสามารถเขียนสมการที่ (30ข) ได้ใหม่ดังนี้

$$H_z\left(\rho,\phi\right) = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu}\begin{cases}\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \le \rho' \quad \text{(a)} \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho'\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \ge \rho' \quad \text{(b)}\end{cases} \qquad (31)$$

2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

จากโจทย์ปัญหางานวิจัยสายอากาศแท็กบนถังเหล็กหรือบนถังน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ถังน้ำมันหรือถังเหล็กจะถูกกำหนดให้เป็นวัสดุทรงกระบอกที่เป็นตัวนำขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และแท็กถูกกำหนดให้เป็นกำหนดให้แหล่งกำเนิดคลื่นชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริกดังแสดงในรูปที่ 2.2



(ก) (ข)

รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นที่วางตัวอยู่ใกล้ทรงกระบอก (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

มีปัญหาจำนวนไม่น้อยที่เป็นปัญหาการกระจัดกระจายของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น (ทั้งไฟฟ้าและแม่เหล็ก) ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อเส้นความยาวอนันต์ของกระแสคงที่ (I_e สำหรับไฟฟ้าและ I_m สำหรับแม่เหล็ก) ซึ่งวางอยู่ใกล้กับทรงกระบอกตัวนำที่มีความยาวอนันต์ โดยเมื่อแหล่งจ่ายกระแสแบบเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นกระแสไฟฟ้าคงที่ I_e สนามจะถูกทำให้เกิดขึ้นได้ในทุกๆที่จากแหล่งกำเนิดคลื่นที่ปราศจากทรงกระบอกดังแสดงในสมการที่ 28

$$H_0^2\left(\beta\left|\rho-\rho'\right|\right)=\begin{cases}\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for}\quad \rho\le\rho' \\ \sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}J_n\left(\beta\rho'\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for}\quad \rho\ge\rho'\end{cases} \tag{32}$$

จากสมการที่ 28 ซึ่งจะแสดงถึงสนามตกกระทบ เมื่อทำการแทนสมการที่ได้มาจากทฤษฎีสำหรับฟังชันแฮงเกิลจากสมการที่ 2 ลงในสมการที่ 28 จะได้ว่า

$$E_z^i=-\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\begin{cases}\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for}\quad \rho\le\rho' & \text{(33a)} \\ \sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}J_n\left(\beta\rho'\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for}\quad \rho\ge\rho' & \text{(33b)}\end{cases} \tag{33}$$

ฟังชันเบสเซล $J_n\left(\beta\rho\right)$ ถูกเลือกเพื่อแสดงให้เห็นสนามเมื่อ $\rho\le\rho'$ เนื่องมาจากสนามจะต้องถูกจำกัดในทุกๆที่โดยรวมไปถึงเมื่อ $\rho=0$ และ ฟังชันแฮงเกิลจะถูกนำมาใช้เมื่อ $\rho\ge\rho'$ เพื่อแสดงให้เห็นธรรมชาติของการเดินทางของคลื่น แต่เมื่อสนามรวมนั้นเกิดจากสนามที่ตกกระทบและสนามกระจัดกระจาย

$$E_s^t=E_z^i+E_z^s \tag{34}$$

สนามกระจัดกระจายเกิดจากกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวของทรงกระบอกซึ่งจะทำตัวเหมือนกับว่าเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นอีกตัวหนึ่ง สนามกระจัดกระจายจะมีเพียงองค์ประกอบในทิศ Z (E_z) ซึ่งจะไม่มีองค์ประกอบที่เป็น cross polarize เกิดขึ้น โดยจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_z^s=-\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}c_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\quad \text{for}\quad \mathrm{a}\le\rho\le\rho',\ \rho\ge\rho' \tag{35}$$

จากงานวิจัยเมื่อกำหนดให้จุดสังเกตอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอก ($\rho=a$) เพื่อศึกษาถึงสนามตกกระทบที่ผิวของตัวนำทรงกระบอกดังนั้นเมื่อ $\rho\le\rho'$

สนามตกกระทบเมื่อ $\rho\le\rho'$ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)} \quad \text{for} \quad \rho \le \rho' \tag{36}$$

และสนามกระจัดกระจายเมื่อ $\rho \le \rho'$ คือ

$$E_z^s = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \quad \text{for} \quad \mathrm{a} \le \rho \le \rho' \tag{37}$$

โดยสนามรวมนั้นคือ $E_s^t = E_z^i + E_z^s$ จะได้ว่า

$$\boxed{E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn\left(\phi-\phi'\right)} + c_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right] \quad \text{for} \quad \rho \le \rho'} \tag{38}$$

สำหรับวัสดุใดๆ (ε_r, μ_r) ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวตัวนำ นั้นสามารถประมาณค่า Surface impedance (Z_s) [5] ดังนี้

$$\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H} \tag{39}$$

โดย

$$Z_s \approx -jZ_0 kd\left[\frac{1-\varepsilon_r\mu_r}{\varepsilon_r}\right]\left[1+\frac{\left(kd\right)^2}{2}\left(1-\varepsilon_r\mu_r\right)\right]^{-1} \tag{40}$$

เมื่อทำการพิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก

$$\bar{E} = E_\rho\hat{\rho} + E_\phi\hat{\phi} + E_z\hat{z} \tag{41}$$

ดังนั้นจากสมการ $\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H}$ จะได้ว่า

$$-Z_s\left(\hat{n} \times \bar{H}\right) = -Z_s H_\phi \hat{z} - Z_s H_z \hat{\phi} \tag{42}$$

$$\boxed{E_z \hat{z} = Z_s H_\phi \hat{z}} \tag{43ก}$$

และ

$$E_\phi \hat{\phi} = -Z_s H_z \hat{\phi} \tag{43ข}$$

เมื่อองค์ประกอบแม่เหล็กสามารถหาได้จากการใช้สมการ Maxwell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathrm{H}^t = -\frac{1}{j\omega\mu}\nabla\times\mathrm{E}^t = -\frac{1}{j\omega\mu}\left(\hat{a}_\rho\frac{1}{\rho}\frac{\partial E_z^t}{\partial\phi} - \hat{a}_\phi\frac{\partial E_z^t}{\partial\rho}\right) \tag{44}$$

$$\mathrm{H}^t = -\hat{a}_\rho\frac{1}{j\omega\mu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial E_z^t}{\partial\phi} + \hat{a}_\phi\frac{1}{j\omega\mu}\frac{\partial E_z^t}{\partial\rho} \tag{45}$$

หรือ

$$\mathrm{H}_\rho^t = -\frac{1}{j\omega\mu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial E_z^t}{\partial\phi} \tag{45a}$$

$$\boxed{\mathrm{H}_\phi^t = \frac{1}{j\omega\mu}\frac{\partial E_z^t}{\partial\rho}} \tag{45b}$$

จากสมการที่ 45b จะสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กในทิศ ϕ ได้ จากสนามไฟฟ้าในทิศ z โดยการแทนสมการที่ 36 ลงในสมการที่ 45b จะได้ว่า

$$\mathrm{H}_\phi^t = \frac{1}{j\omega\mu}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(-\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]\right)$$

$$\mathrm{H}_\phi^t = \frac{jI_e\beta}{4}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_n'\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} + c_n H_n'^{(2)}\left(\beta\rho\right) \tag{46}$$

หาสัมประสิทธิ์ c_n จากสมการที่ (43ก) $E_z\hat{z} = Z_s H_\phi\hat{z}$ ที่พื้นผิว สมการที่ 38 และสมการที่ 46

จากสมการที่ (38) และสมการที่ (48) ทำการจัดรูปสมการใหม่

$$c_n = -\frac{\left[J_n'\left(\beta\rho\right) - j\eta^{-1}J_n\left(\beta\rho\right)\right]}{\left[H_n'^{(2)}\left(\beta\rho\right) - j\eta^{-1}H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]} \tag{47}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถหาค่าสนามรวมได้ว่า

$$E_z^t = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[J_n\left(\beta\rho\right) - \frac{\left[J_n'\left(\beta\rho\right) - j\eta^{-1}J_n\left(\beta\rho\right)\right]}{\left[H_n'^{(2)}\left(\beta\rho\right) - j\eta^{-1}H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]}H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for} \quad \rho \le \rho' \tag{48}$$

2.2.2 แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นยาวอนันต์ที่วางอยู่บนพื้นผิวไดอิเล็กตริก

ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายแม่เหล็กจะไม่มีอยู่จริงทางกายภาพ แต่ก็ได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายเสมือนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศช่องเปิด จากรูปที่ 2.2 พบว่าถ้าหากแหล่งจ่ายชนิดเส้นเป็นแม่เหล็กด้วยกระแส I_m เราสามารถจะหาค่าสนามได้จากทฤษฎี duality จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu}H_0^2(\beta R) \quad \rightarrow \quad H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu}H_0^2(\beta\left|\rho - \rho'\right|) \tag{49}$$

$$H_0^2\left(\beta\left|\rho - \rho'\right|\right) = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \le \rho' \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho'\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \ge \rho' \end{cases} \tag{50}$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ 49 ใหม่ได้ว่า

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu}\begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \le \rho' \quad (51a) \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho'\right)H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right)e^{jn(\phi-\phi')} & \text{for} \quad \rho \ge \rho' \quad (51b) \end{cases} \tag{51}$$

สนามแม่เหล็กกระจัดกระจายจะสามารถเขียนได้ในรูปแบบที่คล้ายคลึงกับสมการที่ 35 ซึ่งจะสามารถเขียนได้ว่า

$$H_z^s = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu}\sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \quad \text{for} \quad \mathrm{a} \le \rho \le \rho', \;\; \rho \ge \rho' \tag{52}$$

เมื่อ d_n คือค่าสัมประสิทธิ์ของสนามที่กระจัดกระจาย

เมื่อสนามรวมนั้นเกิดจากสนามที่ตกกระทบและสนามกระจัดกระจาย

$$H_s^t = H_z^i + H_z^s \tag{53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยเมื่อกำหนดให้จุดสังเกตมาอยู่บนพื้นผิวทรงกระบอก ($\rho = a$) เพื่อศึกษาถึงสนามตกกระทบที่ผิวของตัวนำทรงกระบอกดังนั้นเมื่อ $\rho \leq \rho'$

สนามตกกระทบเมื่อ $\rho \leq \rho'$ คือ

$$H_z^i = -\frac{\beta^2 I_e}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(\beta\rho\right) H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right) e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for} \quad \rho \leq \rho' \tag{54}$$

และสนามกระจัดกระจายเมื่อ $\rho \leq \rho'$ คือ

$$H_z^s = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \quad \text{for} \quad \mathrm{a} \leq \rho \leq \rho' \tag{55}$$

โดยสนามรวมนั้นคือ $H_s^t = H_z^i + H_z^s$ จะได้ว่า

$$\boxed{H_z^t = -\frac{\beta^2 I_m}{4\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[H_n^{(2)}\left(\beta\rho'\right) J_n\left(\beta\rho\right) e^{jn(\phi-\phi')} + d_n H_n^{(2)}\left(\beta\rho\right) \right] \quad \text{for} \quad \rho \leq \rho'} \tag{56}$$

สำหรับวัสดุบาง (ε_r, μ_r) ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวตัวนำนั้นสามารถประมาณค่าอิมพีแดนซ์เชิงพื้นผิว (Z_s) จากสมการ (39), (40) และ (62) ดังนั้นจากสมการ $\hat{n} \times \hat{n} \times \bar{E} = -Z_s \hat{n} \times \bar{H}$ จะได้ว่า

$$E_z \hat{z} = Z_s H_\phi \hat{z} \tag{57}$$

และ

$$\boxed{E_\phi \hat{\phi} = -Z_s H_z \hat{\phi}} \tag{58}$$

เมื่อ องค์ประกอบแม่เหล็กสามารถหาได้จากการใช้สมการ Maxwell

$$E^t = \frac{1}{j\omega\varepsilon} \nabla \times H^t = \frac{1}{j\omega\varepsilon} \left(\hat{a}_\rho \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{\partial H_z^t}{\partial \rho} \right) \tag{59}$$

$$E^t = \hat{a}_\rho \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} - \hat{a}_\phi \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{\partial H_z^t}{\partial \rho} \tag{60}$$

หรือ

$$E_\rho^t = \frac{1}{j\omega\varepsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^t}{\partial \phi} \tag{61ก}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\phi}^{t} = -\frac{1}{j\omega\varepsilon}\frac{\partial H_{z}^{t}}{\partial\rho} \tag{61ข}$$

จากสมการที่ (61ข) จะสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กในทิศ ϕ ได้ จากสนามไฟฟ้าในทิศ z โดยการแทนสมการที่ 54 ลงในสมการที่ (61ข) จะได้ว่า

$$E_{\phi}^{t} = -\frac{1}{j\omega\varepsilon}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(-\frac{\beta^{2}I_{m}}{4\omega\mu}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[J_{n}\left(\beta\rho\right)H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} + d_{n}H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]\right)$$

$$E_{\phi}^{t} = -\frac{jI_{m}\beta}{4}\sum_{n=-\infty}^{\infty}J_{n}'\left(\beta\rho\right)H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} + d_{n}H_{n}'^{(2)}\left(\beta\rho\right) \tag{62}$$

หาสัมประสิทธิ์ d_{n} จากสมการที่ (58) $E_{\phi}\hat{\phi} = -Z_{s}H_{z}\hat{\phi}$ สมการที่ (40) และสมการที่ (62)

$$d_{n} = -\frac{\left[J_{n}'\left(\beta\rho\right) - j\eta J_{n}\left(\beta\rho\right)\right]}{\left[H_{n}'^{(2)}\left(\beta\rho\right) - j\eta H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]} \tag{63}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสนามรวมได้ว่า

$$H_{z}^{t} = -\frac{\beta^{2}I_{e}}{4\omega\varepsilon}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[J_{n}\left(\beta\rho\right) - \frac{\left[J_{n}'\left(\beta\rho\right) - j\eta J_{n}\left(\beta\rho\right)\right]}{\left[H_{n}'^{(2)}\left(\beta\rho\right) - j\eta H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]}H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho\right)\right]H_{n}^{(2)}\left(\beta\rho'\right)e^{jn(\phi-\phi')} \quad \text{for} \quad \rho \le \rho' \tag{64}$$

2.3 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency RFID Systems)

ระบบย่านความถี่สูงยิ่งนั้นจะมีการใช้งานในย่านความถี่ 860-960 MHz ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่นประมาณ 33 เซนติเมตร ระบบย่านความถี่สูงยิ่งถูกควบคุมโดยมาตรฐาน ISO/IEC 18000-6 และ Gen 2-จาก EPC global แท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ทำการผลิตจะถูกควบคุมภายใต้ EPC global สำหรับ class 0 class 1 และ class 2 ยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยในปัจจุบันราคาต่อหน่วยของแท็กยังคงมีราคาที่แพงอยู่แต่คาดว่าภายในอนาคตอันใกล้ราคาของแท็กต่อหน่วยจะมีราคาที่ลดลง การใช้งานของแท็กในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยส่วนมากจะถูกใช้งานในระบบการขนส่งสินค้า ห่วงโซ่อุปทาน สำหรับในการระบุกล่องหรือตู้สินค้า ซึ่งการใช้งานของแท็กจะเป็นการใช้งานทั้งแบบพาสซีฟแท็กและแอ็กทีฟแท็ก ช่วงการอ่านได้โดยปกติของแท็กที่ใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งนั้นจะอยู่ที่ 1-9 เมตร โดยการใช้งานช่วงค่าความถี่ที่ใช้งานก็จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ

ประเทศ	ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (MHz)	แบนด์วิดธ์ (MHz)	กำลังงาน (Watt)
นิวซีแลนด์	864-868	4	4
สหรัฐอเมริกา	902-928	26	4
เกาหลี	910-914	4	4
จีน	917-922	5	2
ไทย	920-925	5	4
ออสเตรเลีย	920-926	6	4
ไต้หวัน	922-928	6	1
ญี่ปุ่น	952-954	2	4

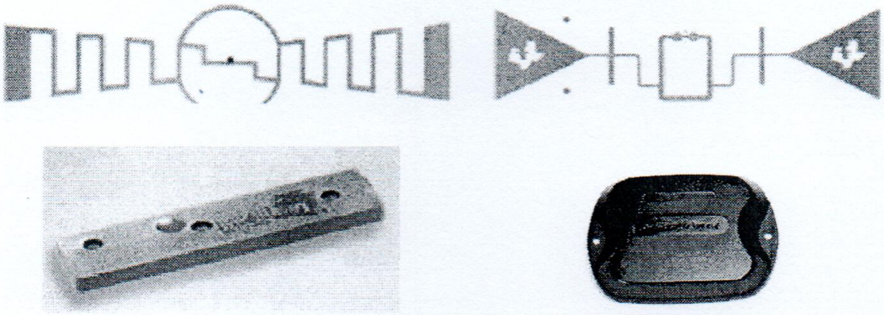
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้ในย่านความถี่สูงยิ่ง ยังคงมีปัญหาหนึ่งในการใช้งานคือความไม่แน่นอนของค่าความถี่ที่ใช้กันทั่วโลก ซึ่งค่าความถี่และแบนด์วิดธ์มีมาตรฐานที่ต่างกันไปตามแต่และข้อกำหนดของแต่ละประเทศ มาตรฐาน EPC global Gen-2 ซึ่งจะใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่สามารถอ่านแท็กได้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่สูงยิ่ง (UHF) อัตราการอ่านสำหรับการอ่านแท็กหลายๆตัวจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศเนื่องจากความไม่แน่นอนระหว่างแบนด์วิดธ์และวิธีการการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ถูกนำไปใช้งาน เมื่อแบนด์วิดธ์มีขนาดที่กว้างก็จะสามารถติดต่อสื่อสารกับกลุ่มของแท็กในบริเวณที่ใช้งานได้รวดเร็วมากกว่าการที่มีแบนด์วิดธ์แคบ ดังนั้นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีแบนด์วิดธ์ 26 MHz อัตราการอ่านแท็กจะมีค่าประมาณ 1600 แท็กต่อวินาที ในกลุ่มประเทศยุโรปที่มีแบนด์วิดธ์ 3 MHz จะมีอัตราการอ่านอยู่ที่ประมาณ 600 แท็กต่อวินาที แต่การใช้แบนด์วิดธ์ที่กว้างเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมากเช่นกัน

2.3.1 แท็กระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag)

แท็กย่านความถี่สูงยิ่งมีลักษณะการนำไปใช้งานที่หลากหลายเช่นการนำไปใช้งานทางด้านการแพทย์และสาธารณสุข สินค้าในซูเปอร์มาร์เก็ต การจัดการสินค้าในคลังสินค้า การใช้งานกับตู้สินค้าขนาดใหญ่ [6] อีกทั้งในปัจจุบันยังได้มีการนำเอาแท็กไปติดกับวัสดุต่างๆ อีกมากมายเช่น ถังน้ำมัน ตู้สินค้าหรือแม้กระทั่งการในไปใช้เป็นเซ็นเซอร์วัตถุต่างๆ [7] ดั้งนั้นจากการที่มีรูปแบบการนำไปใช้งานที่มากมายทำให้สายอากาศแท็กมีโครงสร้างหลากหลายรูปแบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับรูปแบบที่นำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

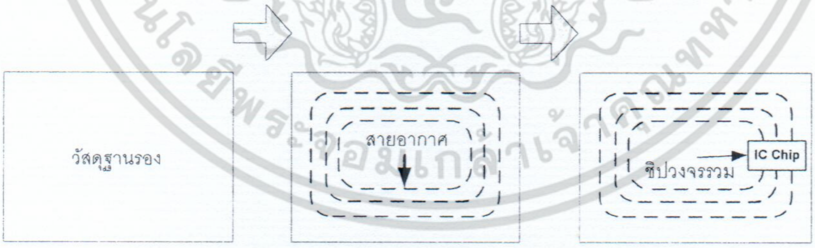
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.3 สายอากาศแท็กย่านความถี่สูงยิ่ง [8]-[9]

นอกจากนั้นสิ่งที่มีความสำคัญในการออกแบบแท็กนั้นคือ อิมพีแดนซ์ของแท็กที่ออกแบบจะต้องเป็นค่าสังยุคกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิป เพื่อที่จะทำให้สามารถรับค่าพลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูลได้มากที่สุด รวมถึงขนาดจะต้องมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เมื่อนำแท็กไปติดกับวัสดุ แล้วยังคงมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลง มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปตามความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน (แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวหรือแบบชี้เจาะจงทิศทาง) มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน และมีราคาต่อหน่วยการผลิตที่มีความเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามแท็กย่านความถี่สูงยิ่งจะมีความอ่อนไหวในการใช้งานร่วมกับวัตถุ โดยสมรรถนะในการทำงานของแท็กจะเปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันออกไป เช่น กล่องกระดาษที่มีสิ่งของภายในที่แตกต่างกัน และจะมีประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อติดอยู่บนวัสดุที่มีการสูญเสีย ตัวอย่างเช่นขวดน้ำพลาสติกที่มีน้ำหรือน้ำมันบรรจุอยู่ หรือกระป๋องโลหะ โดยสายอากาศแท็กจะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการจะนำไปติดเพื่อให้ได้สมรรถนะในการทำงานที่สูงที่สุด หรือทำการออกแบบให้แท็กมีความอ่อนไหวต่อการใช้งานร่วมกับวัสดุแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันให้น้อยที่สุด [10]

ส่วนประกอบของแท็กจะแสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแท็กจะประกอบไปด้วย 1. แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง 2. สายอากาศ 3. ชิปวงจรรวม

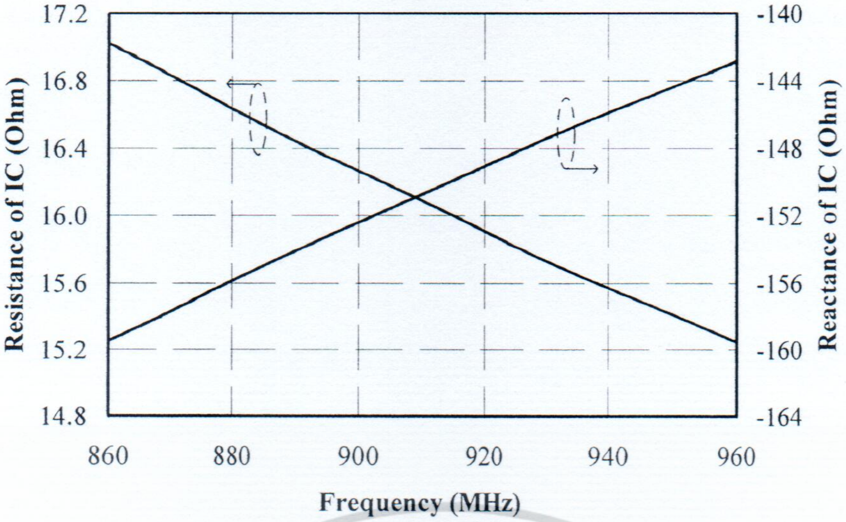


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก

ชิปวงจรรวมรุ่น G2XL ภายในรูปแบบของ TSSOP8 ค่า Q = 9.37 ค่าความจุไฟฟ้า = 1.16 พิโคฟารัด [11] เราจะสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143559



รูปที่ 2.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในช่วงความถี่ที่ใช้งาน

ที่ 922.5 MHz ชิปวงจรรวมมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15.87-j148.7 Ω การออกแบบสายอากาศแท็กให้สามารถส่งผ่านพลังงานได้สูงสุดนั้นสายอากาศแท็กควรมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15.87+j148.7 Ω

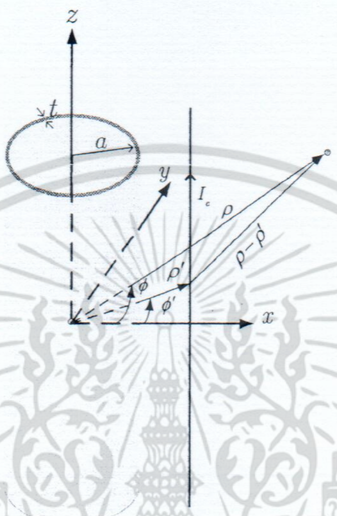
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการจำลอง

3. ผลจากการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าบนวัสดุอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้ง

3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น



รูปที่ 3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้น

ผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio เปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณจากผลเฉลยไอเกนฟังชันของคลื่น จากสมการที่ (48) ได้ถูกทำการเปรียบเทียบเพื่อหาขอบเขตการทำงานของผลเฉลยไอเกนฟังชันของคลื่นจากผลการจำลอง โดยกรณีการศึกษาจะมีการศึกษา 1. รัศมีของท่อทรงกระบอกขนาด λ 2λ และ 3λ 2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\varepsilon_r = 2.1$ $\varepsilon_r = 4$ และ $\varepsilon_r = 6$ 3. ความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริก (t)

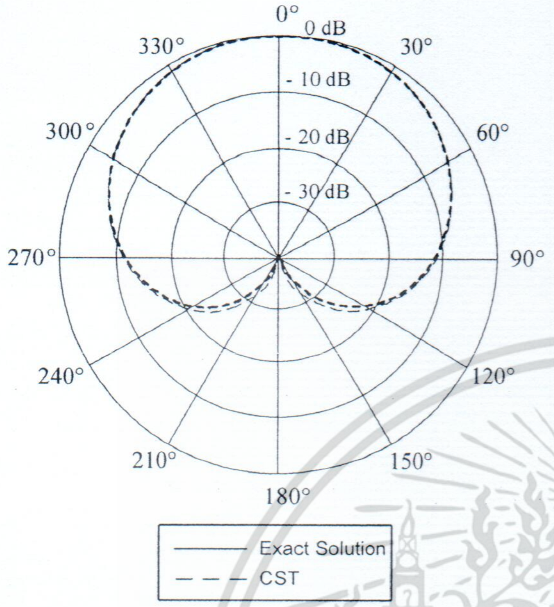
3.1.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$

3.1.1.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$

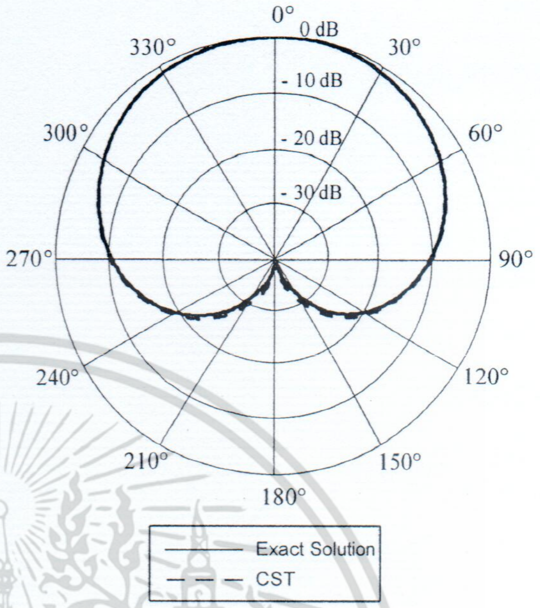
เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.22 λ) รูปที่ 3.2-3.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของระหว่างวิธีการแม่นตรงกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อความหนาของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

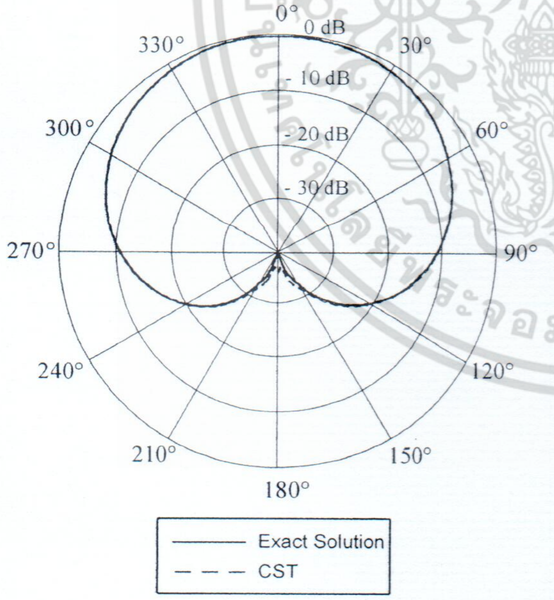
เคลือบเปลี่ยนแปลงไป ความแตกต่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังชันของคลื่นและจากการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio จะเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน



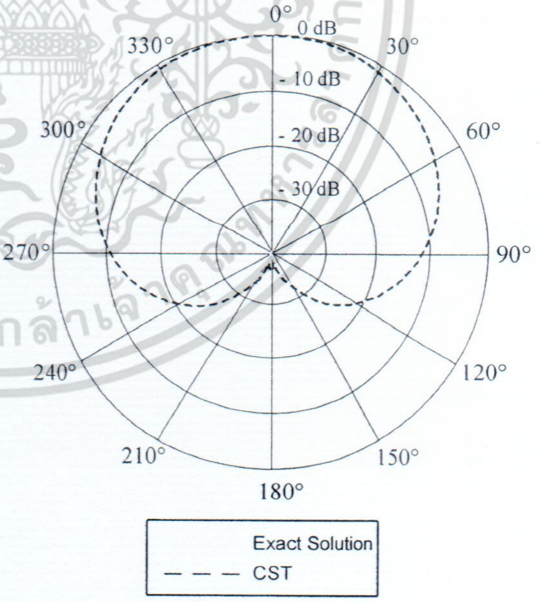
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a=\lambda, t=0.01\lambda$)



รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a=\lambda, t=0.02\lambda$)

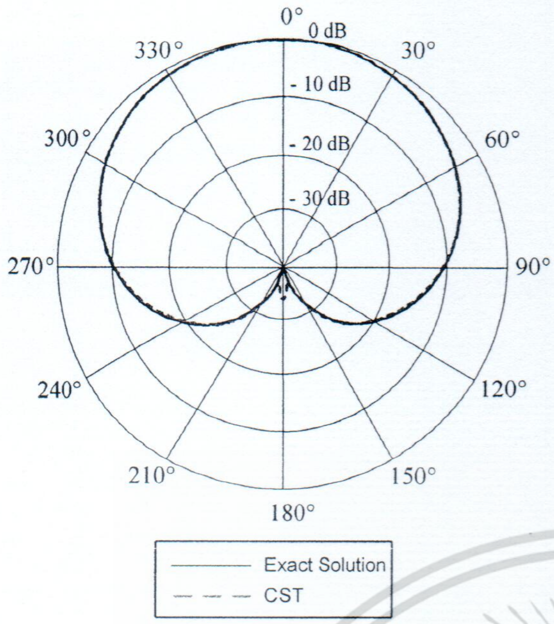


รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a=\lambda, t=0.04\lambda$)

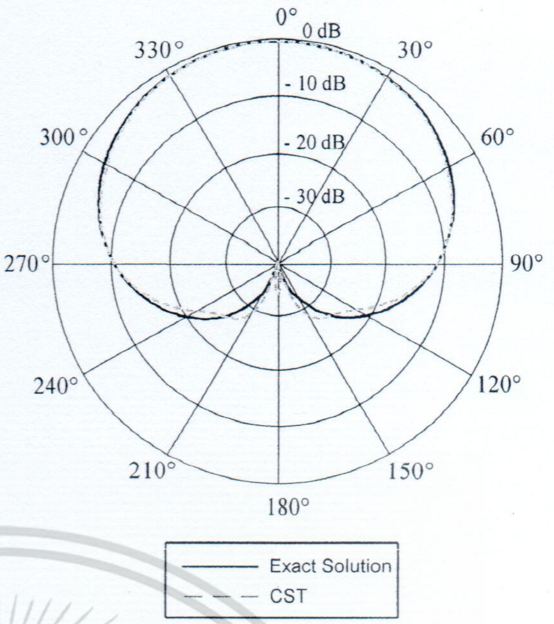


รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a=\lambda, t=0.06\lambda$)

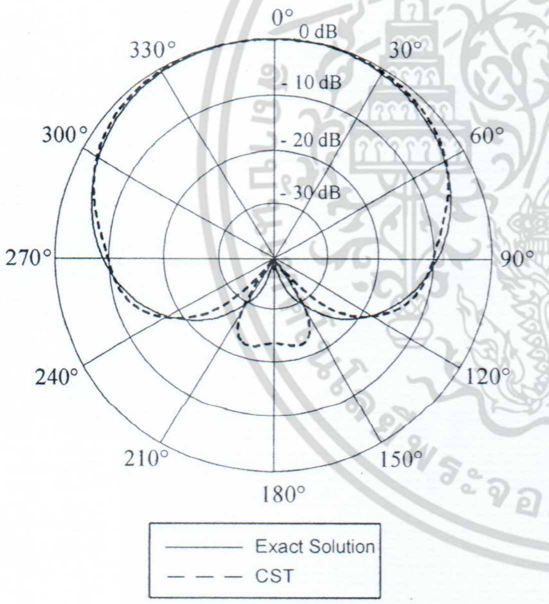
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



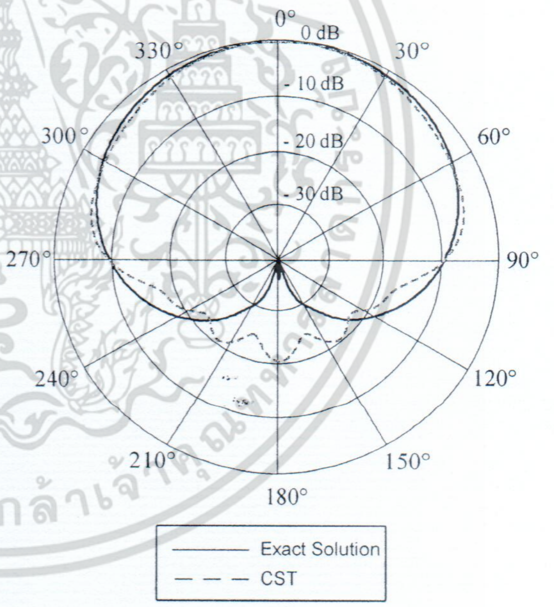
รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)

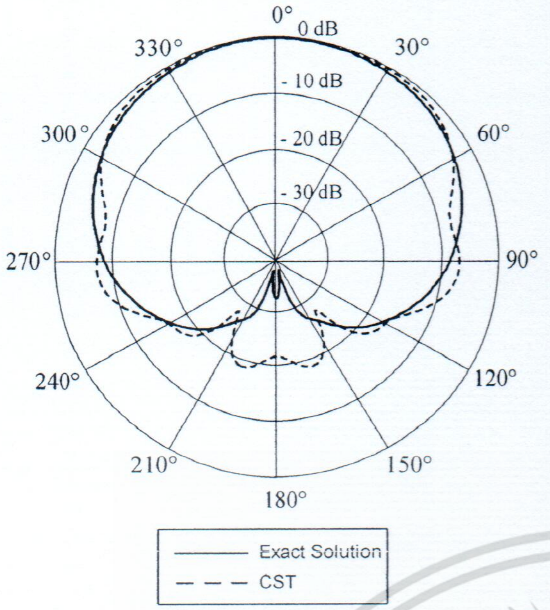


รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.12\lambda$)

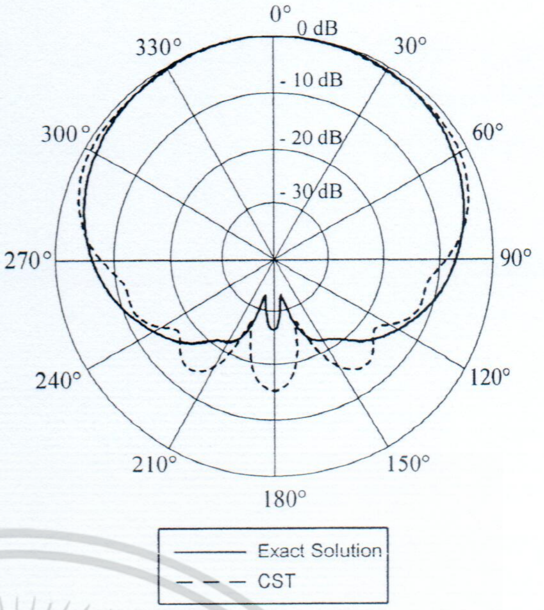


รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.14\lambda$)

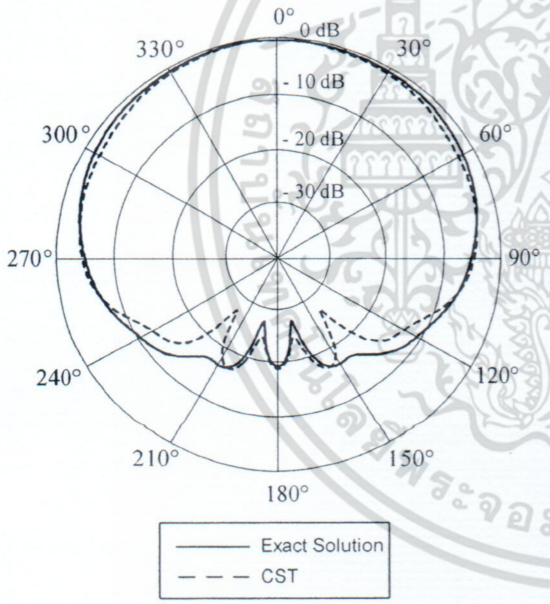
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



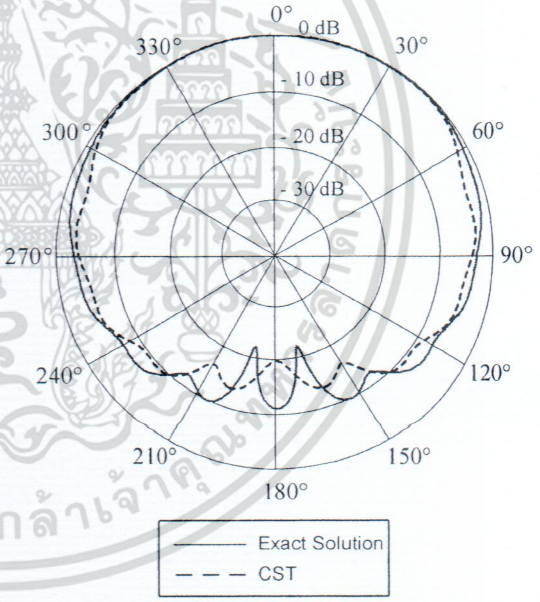
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.16\lambda$)



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.18\lambda$)

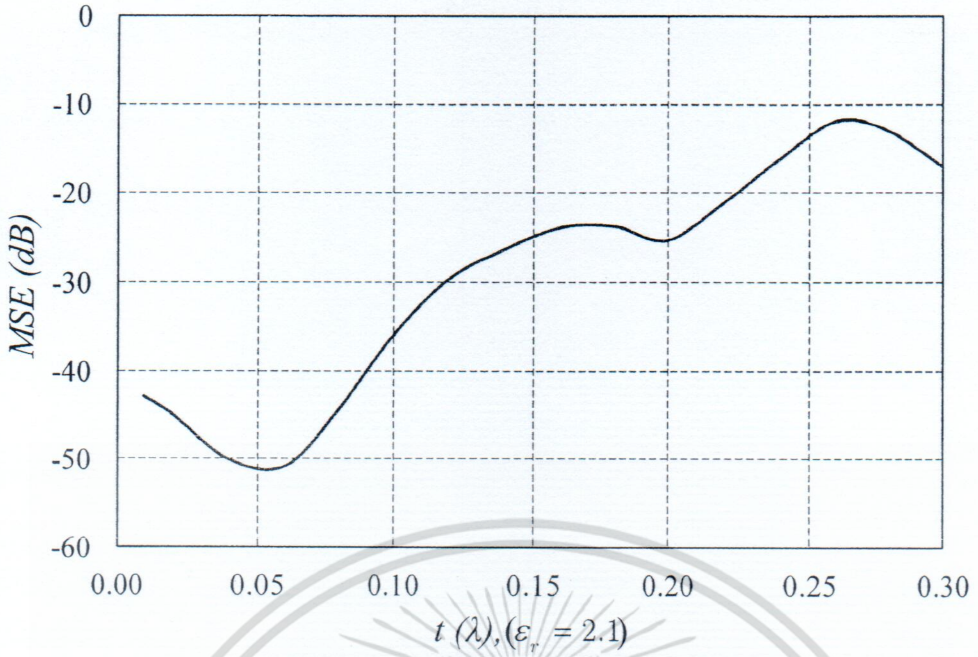


รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.2\lambda$)



รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.22\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



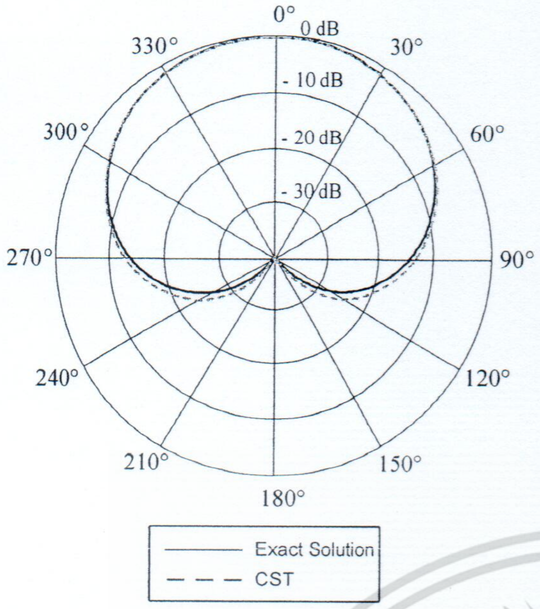
รูปที่ 3.14 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

ในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยในช่วงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) ระหว่าง 0.01 λ -0.22 λ โดยในช่วงดังกล่าวค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -51 dB ถึง-20 dB

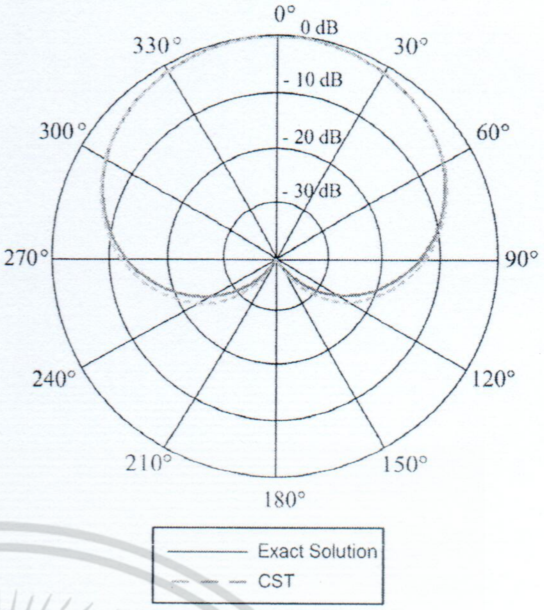
3.1.1.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.15-3.26 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.22 λ) จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน

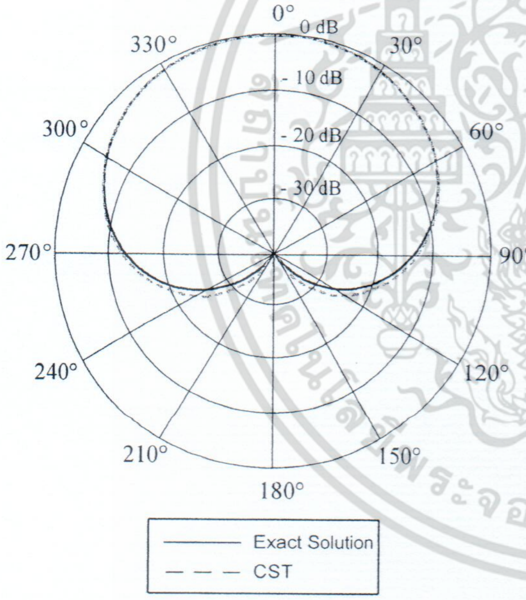
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



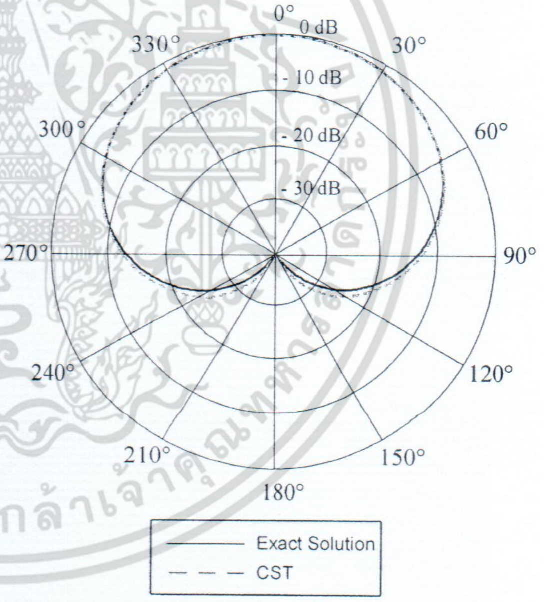
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

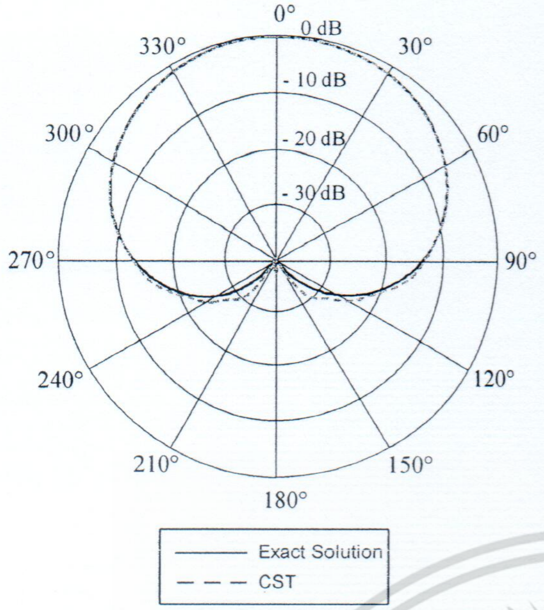


รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)

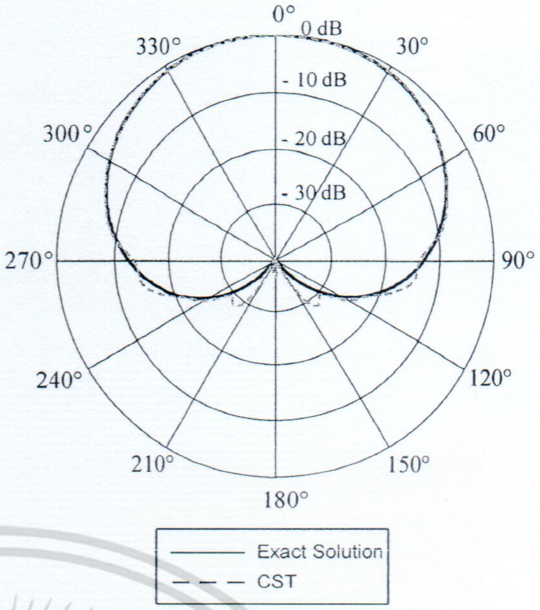


รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

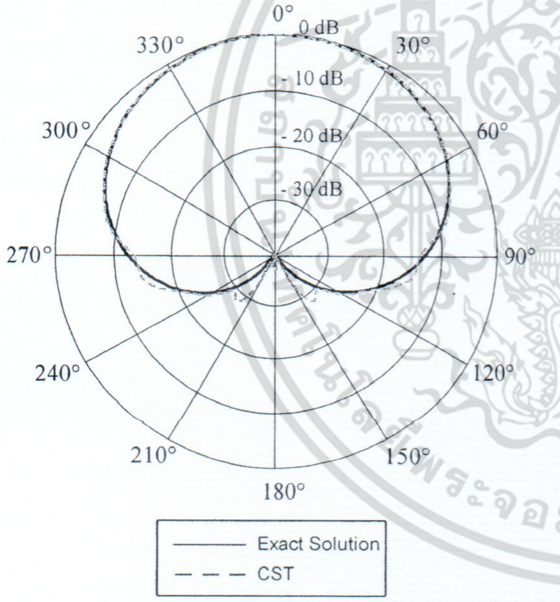
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



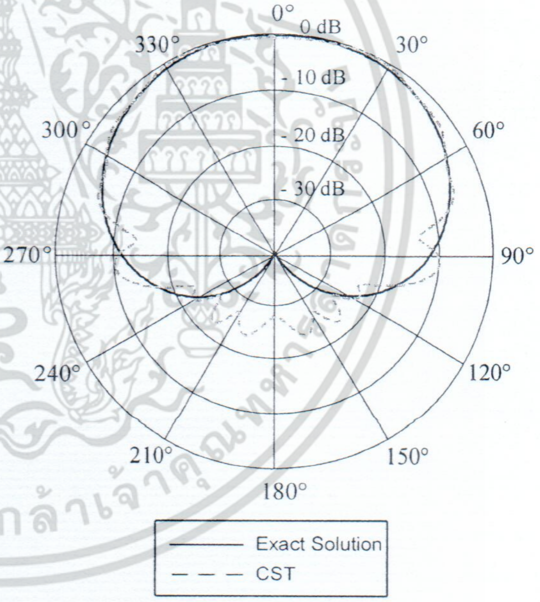
รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)

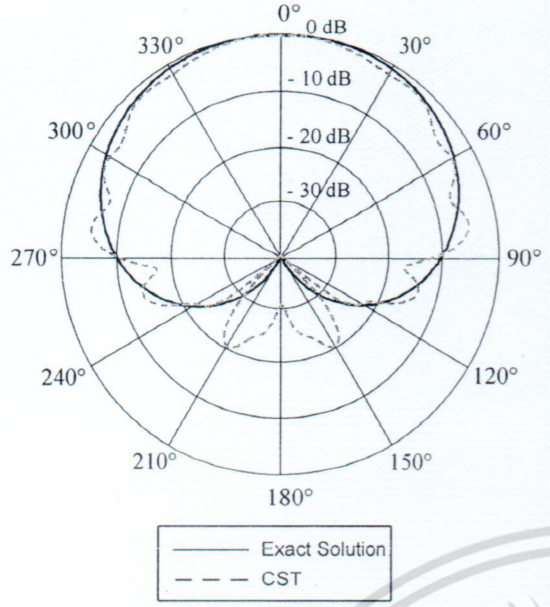


รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.12\lambda$)

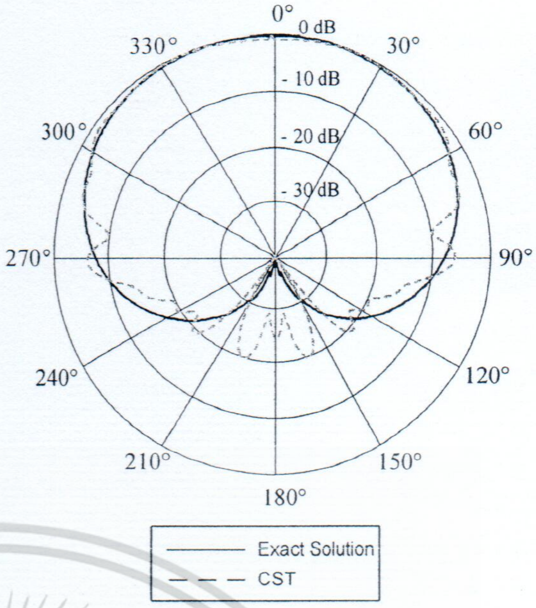


รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.14\lambda$)

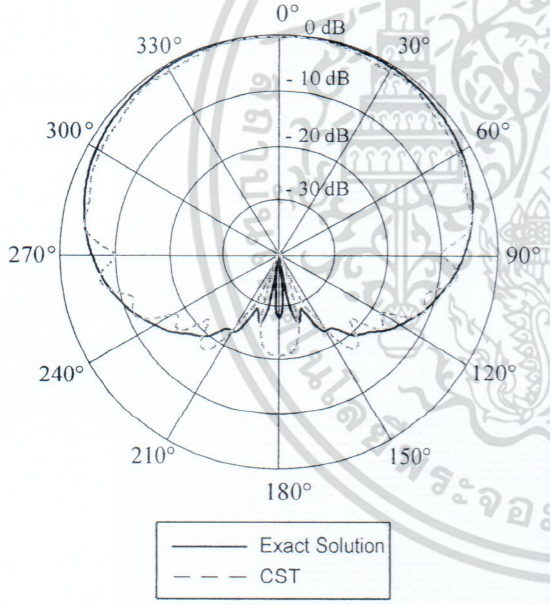
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



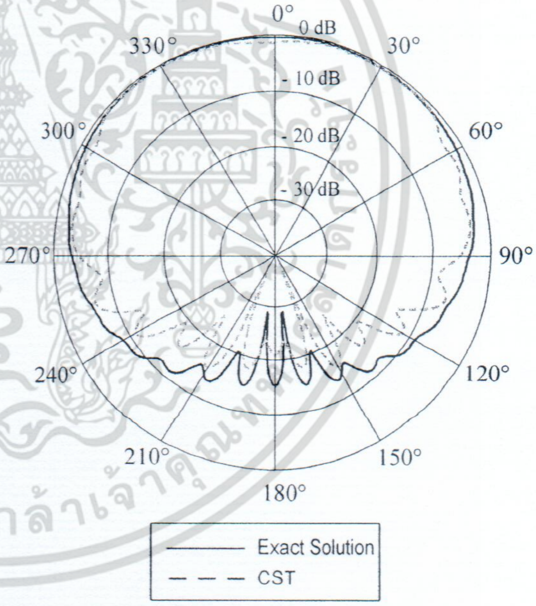
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.16\lambda$)



รูปที่ 3.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.18\lambda$)

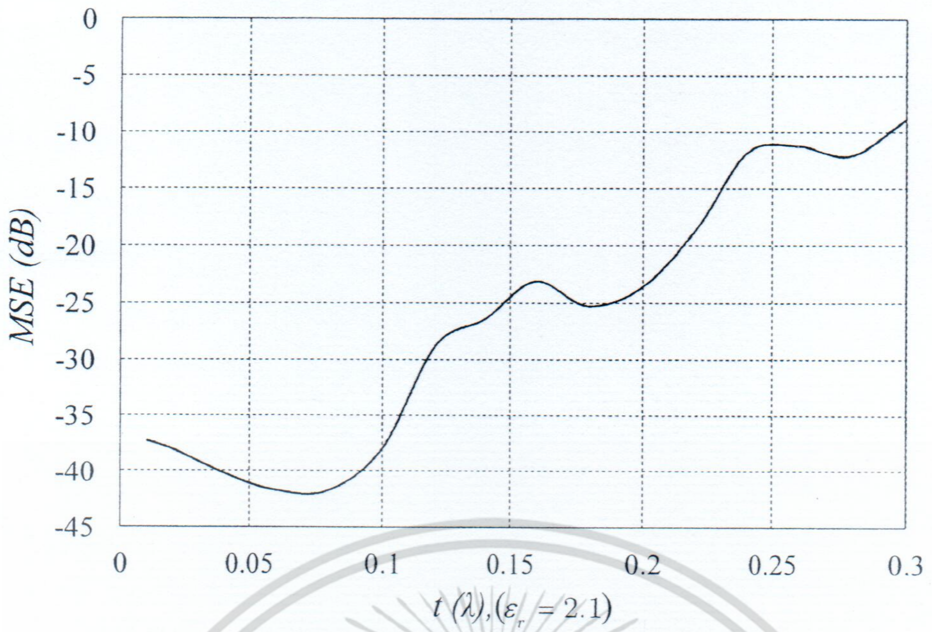


รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.2\lambda$)



รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.22\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



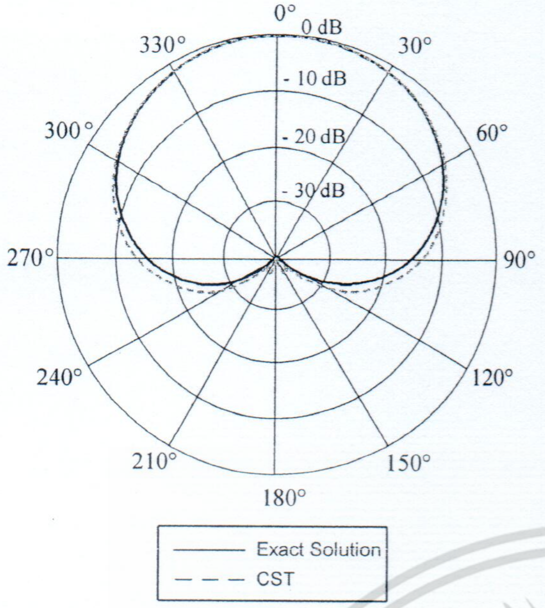
รูปที่ 3.27 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 2 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.27 ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -42 dB ถึง -20 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.20 λ จะเห็นได้ว่าผลเฉลยไอเกนฟังก์ชันของคลื่นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio

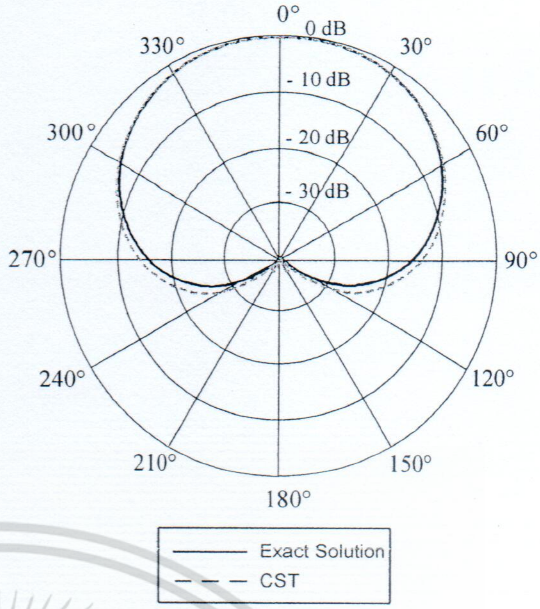
3.1.1.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.28-3.39 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.22 λ) จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังก์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน

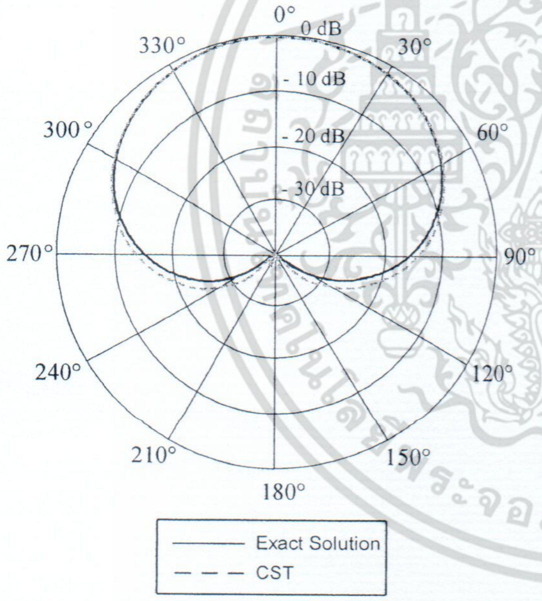
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



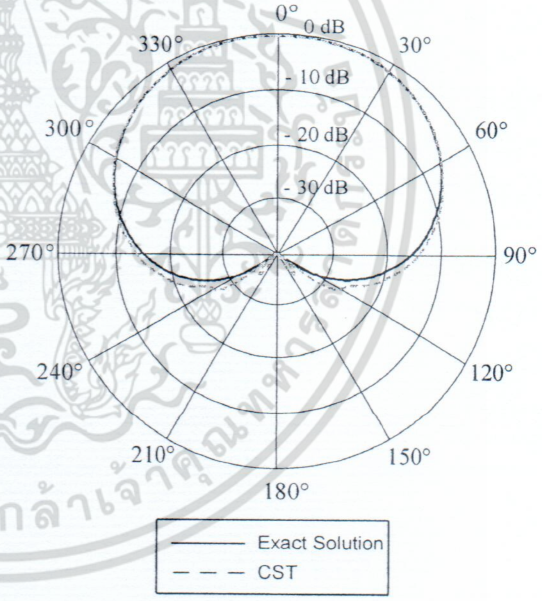
รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

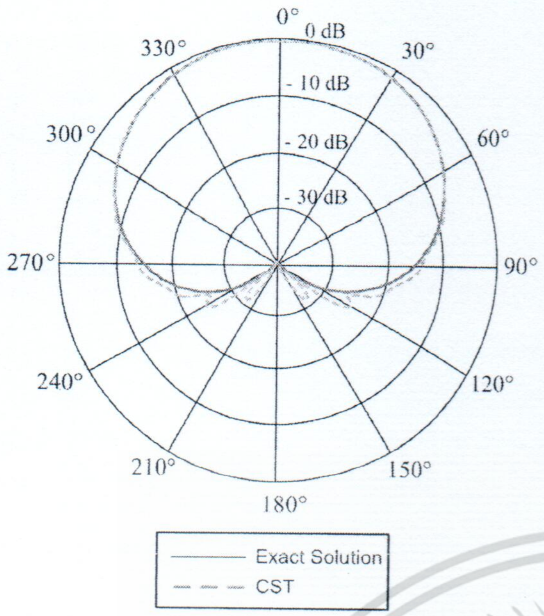


รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)

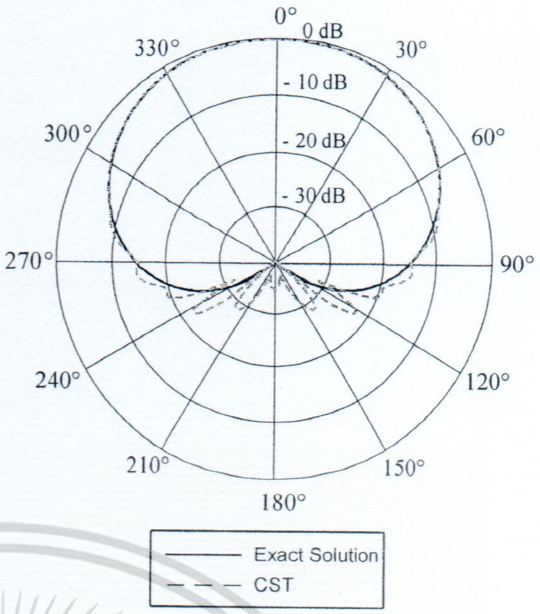


รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

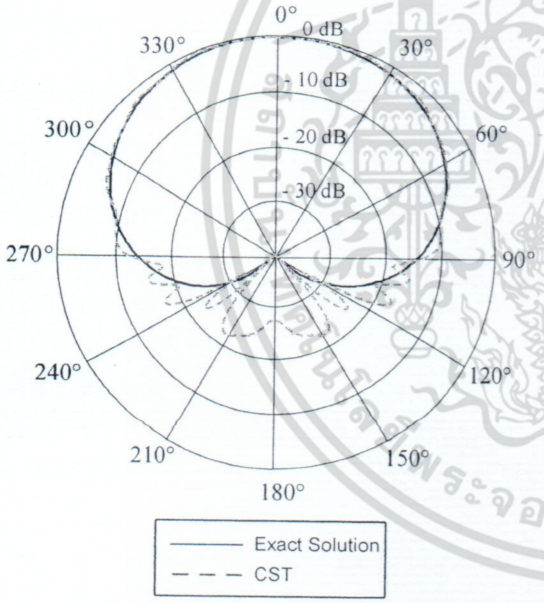
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



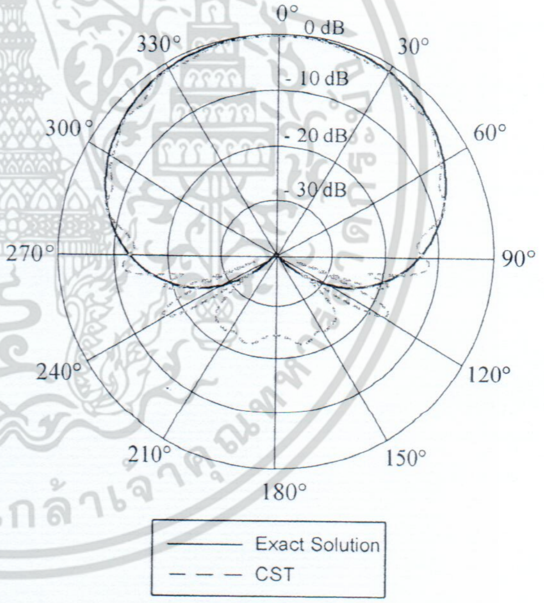
รูปที่ 3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)

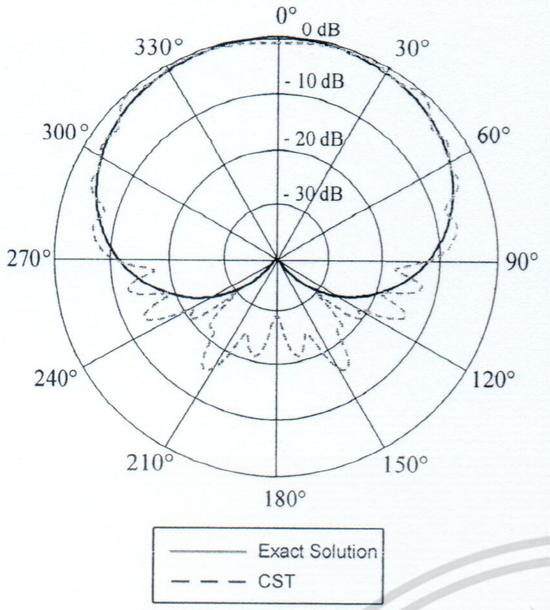


รูปที่ 3.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.12\lambda$)

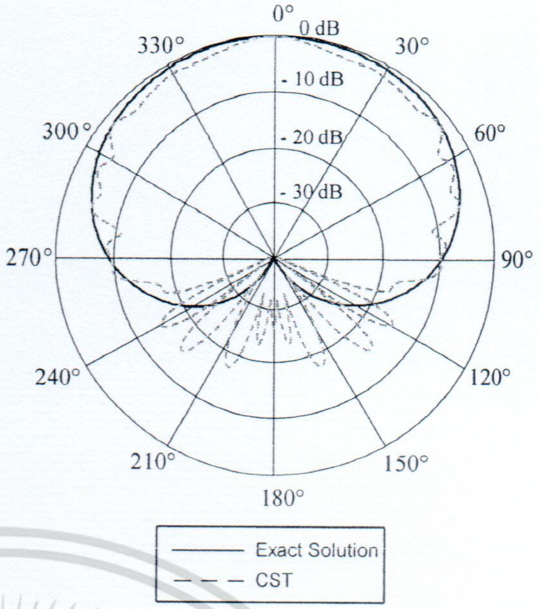


รูปที่ 3.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.14\lambda$)

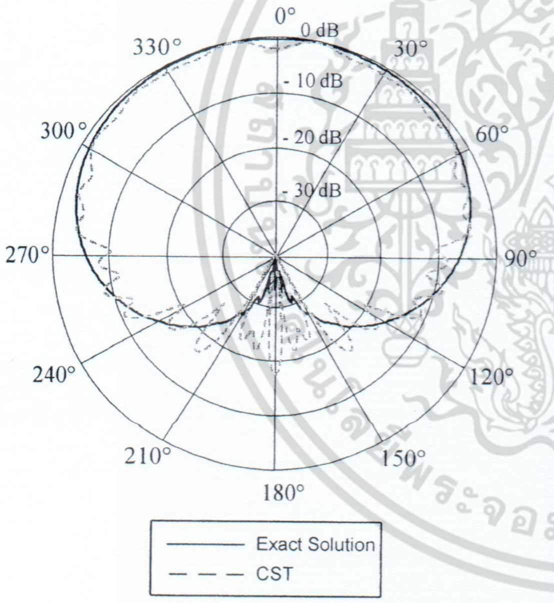
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



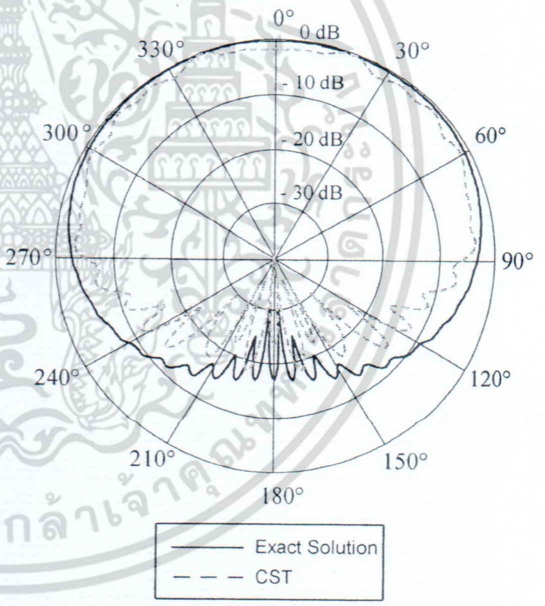
รูปที่ 3.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.16\lambda$)



รูปที่ 3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.18\lambda$)

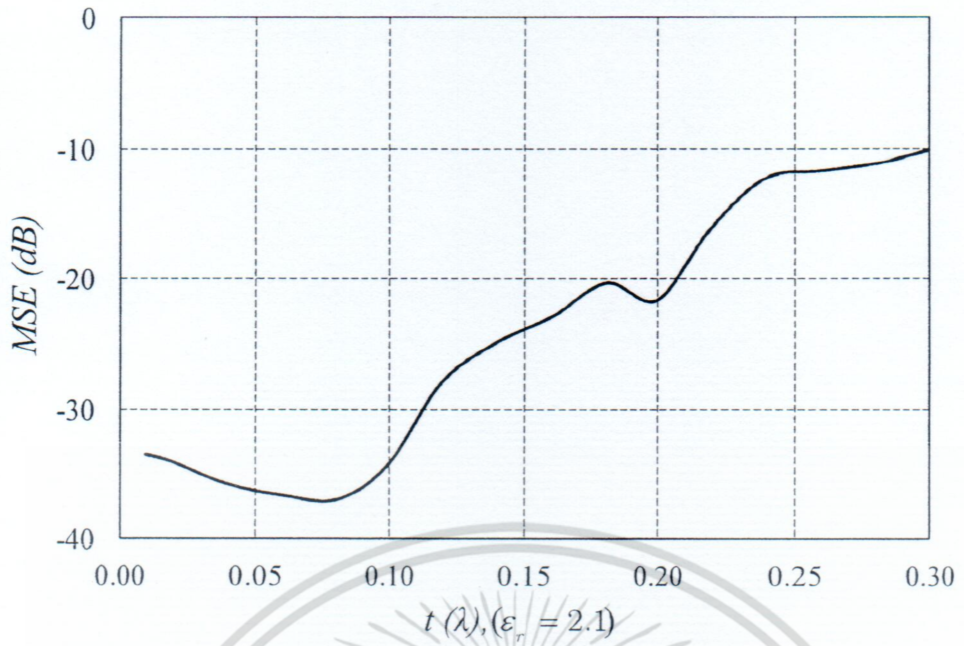


รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.2\lambda$)



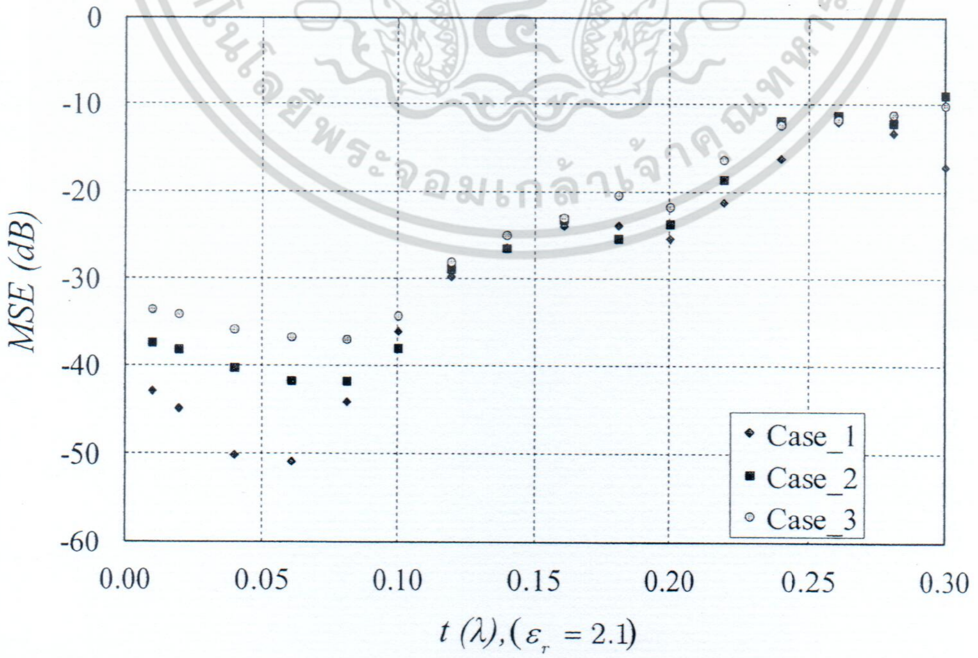
รูปที่ 3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.22\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 3 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

รูปที่ 3.40 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่กำหนดให้กระบอกมีรัศมีเท่ากับ 3 λ และถูกหุ้มด้วยด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มี $\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$ ด้วยความหนา (0.01 λ -0.2 λ) จะเห็นได้ว่าผลเฉลยจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างค่าความหนาของวัสดุเคลือบที่ 0.01 λ -0.2 λ จะมีค่าเท่ากับ -30 dB



รูปที่ 3.41 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

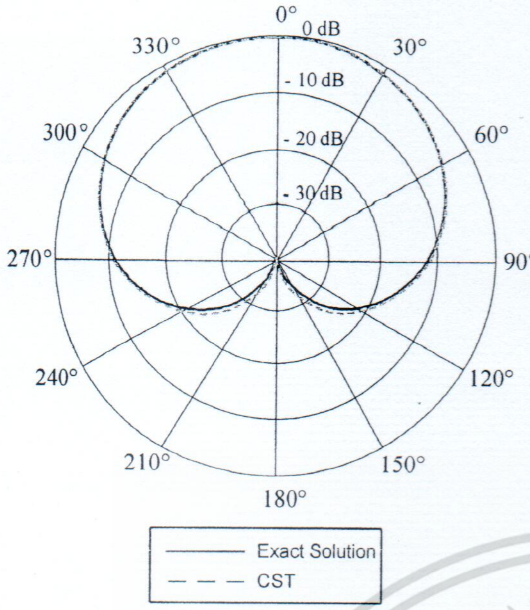
จากรูปที่ 3.38 เป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างกรณีที่ 1 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ λ หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ Teflon ที่มีความหนา 0.01 λ -0.3 λ เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 2λ หุ้มด้วย Teflon ที่มีความหนา 0.01 λ -0.3 λ และเป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างกรณีที่ 3 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 3λ หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 1 จะให้ผลที่ดีกว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 2 และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 3 จะให้ผลที่ด้อยที่สุดในสามกรณีศึกษา ซึ่งหมายความว่าเมื่อค่ารัศมีทรงกระบอกมีค่าที่กว้างขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio กับผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ของทั้งสองกรณีมีความสอดคล้องกันคือค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะแปลผกผันกับค่าความหนาของวัสดุที่นำมาเคลือบ

3.1.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1)$

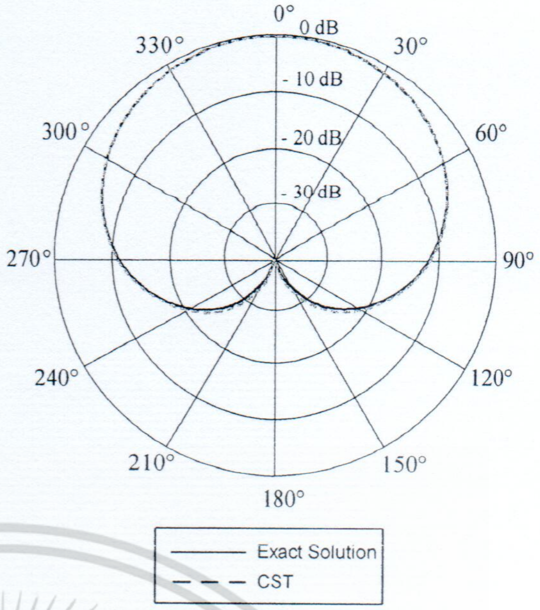
3.1.2.1 กรณีที่ 4: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1)$

จากรูปที่ 3.42-3.47 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1)$ ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในช่วงความหนาที่ 0.01 λ -0.08 λ โดยเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.08 λ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีความผิดพลาดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.47 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane เมื่อ $(a = \lambda, t = 0.1\lambda)$ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio นั้นมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก

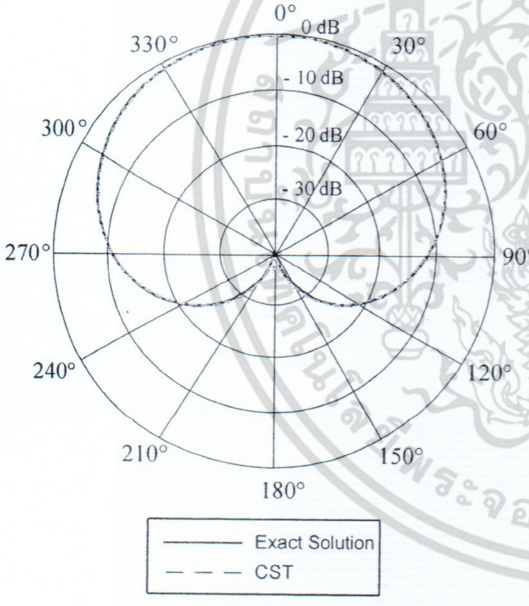
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



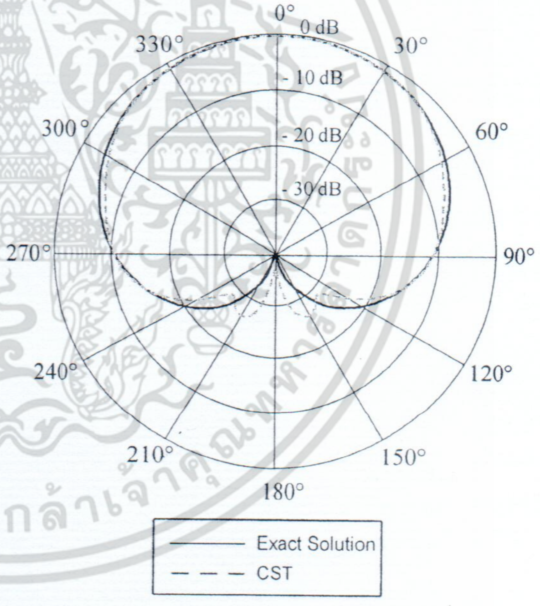
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.43 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)

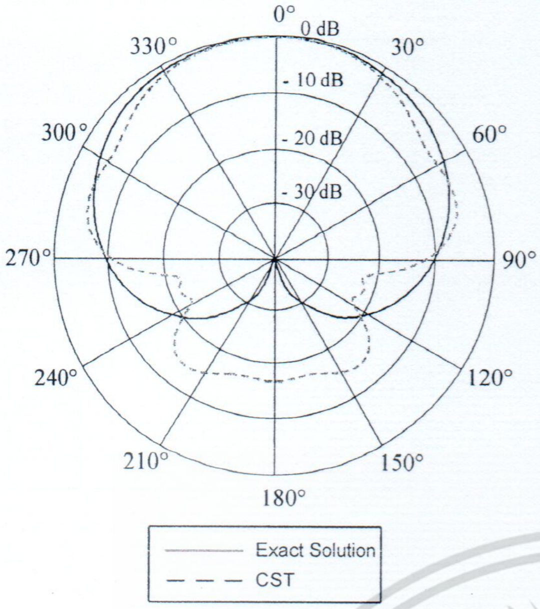


รูปที่ 3.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)

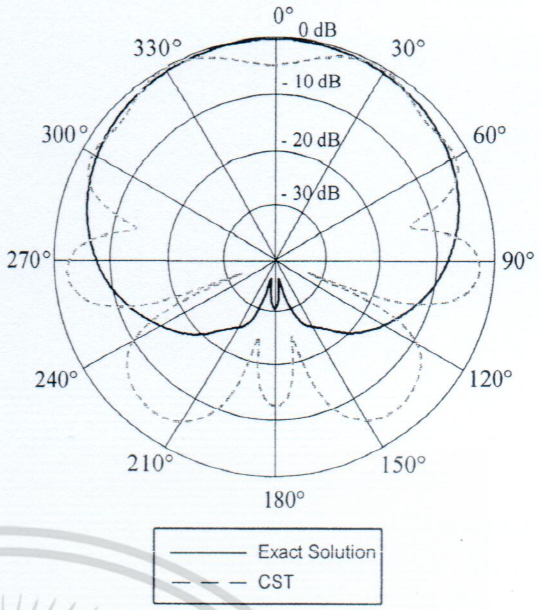


รูปที่ 3.45 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)

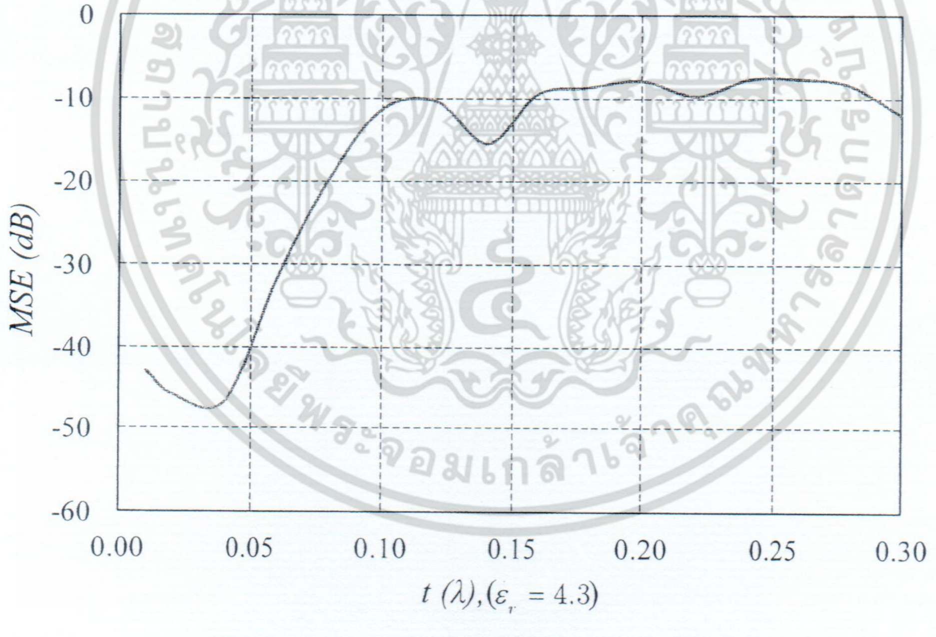
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.46 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.47 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)



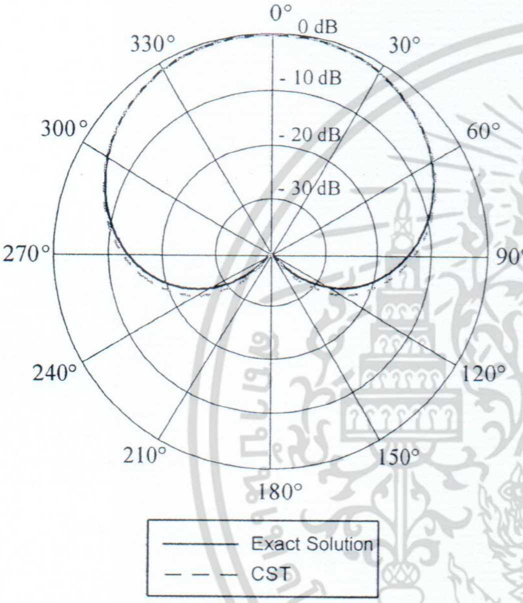
รูปที่ 3.48 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.48 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -46.72 dB ถึง -20 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.08 λ จะเห็นได้ว่าผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยในช่วงความหนาดังกล่าวของวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

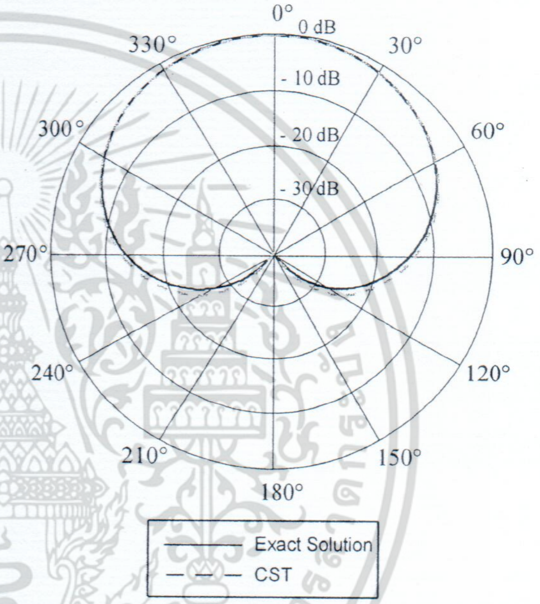
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 กรณีที่ 5: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ-0.1 λ) แสดงในรูปที่ 3.49-3.54 โดยในช่วงความหนา 0.01 λ-0.08 λ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.08 ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีความผิดพลาดมากขึ้น

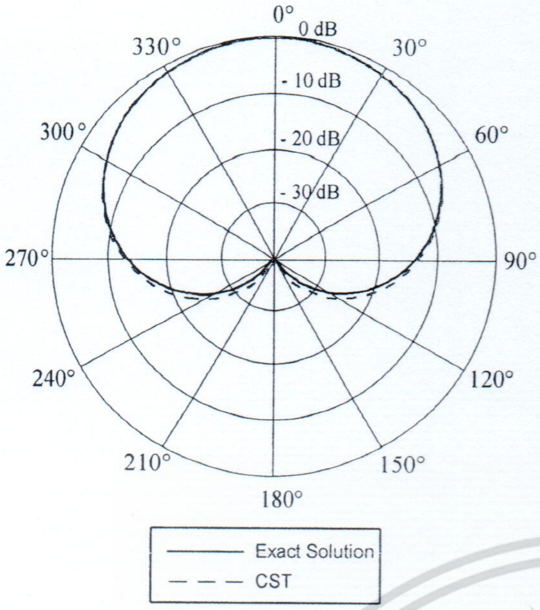


รูปที่ 3.49 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)

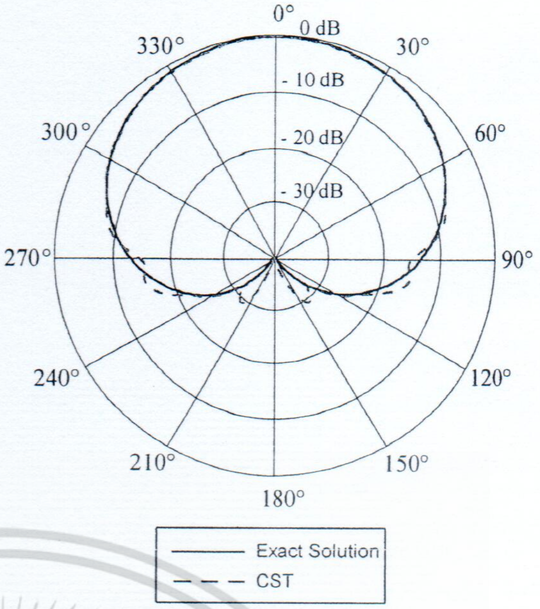


รูปที่ 3.50 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

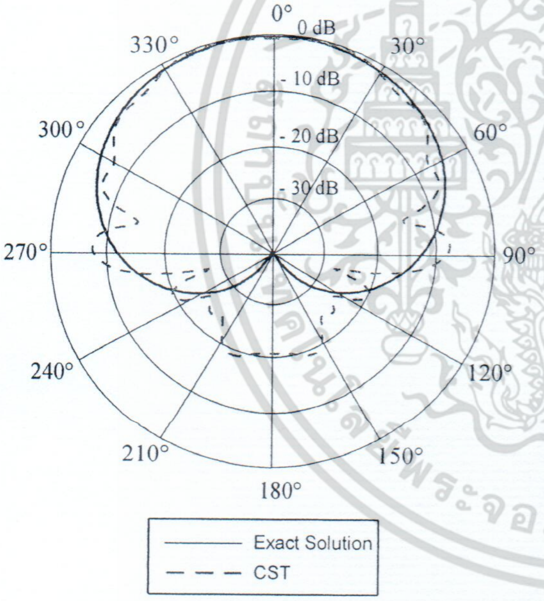
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



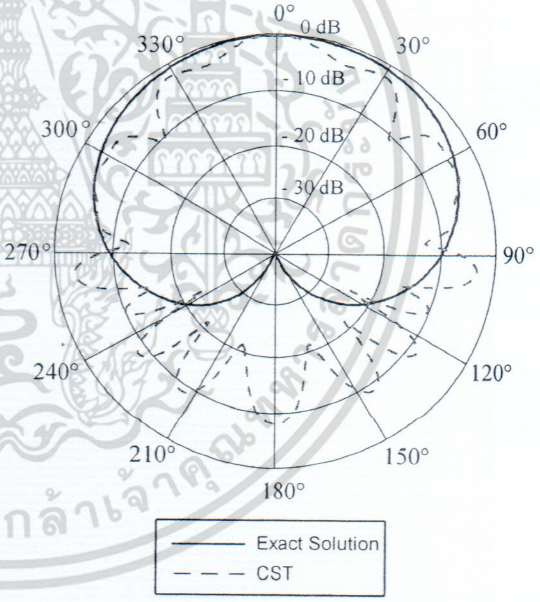
รูปที่ 3.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)



รูปที่ 3.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

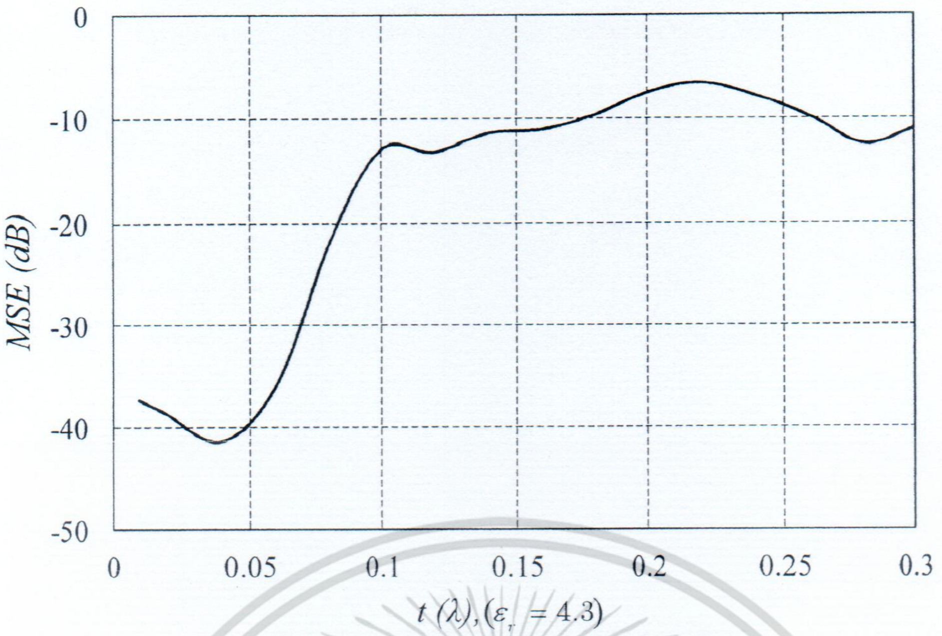


รูปที่ 3.53 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.54 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



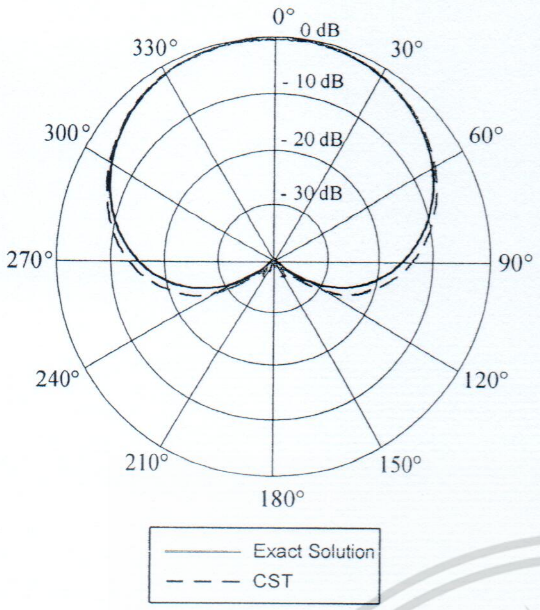
รูปที่ 3.55 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 5 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

จากกราฟค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่กำหนดให้กระบอกมีรัศมีค่าเท่ากับ 2λ และถูกหุ้มด้วยด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มี $\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$ ด้วยความหนา (0.01 λ -0.3 λ) จะเห็นได้ว่าผลเฉลยจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความหนาของวัสดุเคลือบที่ 0.01 λ -0.08 λ จะมีค่าเท่ากับ -35 dB

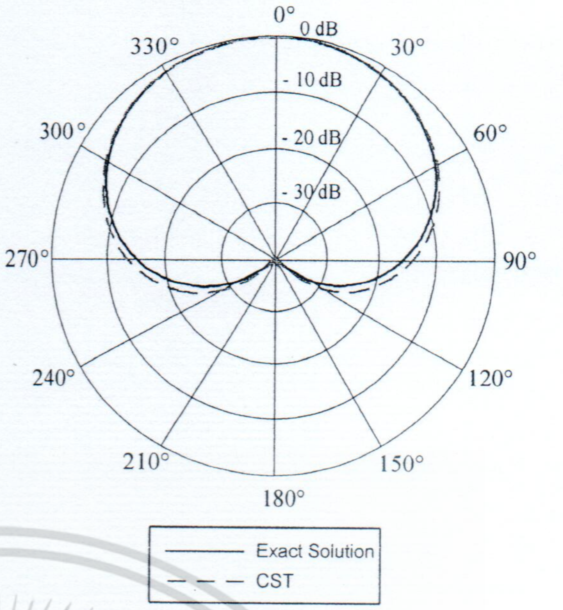
3.1.2.3 กรณีที่ 6: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

ในกรณีที่ 6 นี้คือ แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) ในรูปที่ 3.56-3.61 จะเป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio จะมีผลที่คล้ายคลึงกัน ในช่วงความหนา 0.01 λ -0.08 λ โดยเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.08 λ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีความผิดพลาดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.61 เมื่อความหนาของไดอิเล็กตริกถูกเพิ่มขึ้นสูงถึง 0.1 λ แบบรูปการแพร่กระจ่ายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า จะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

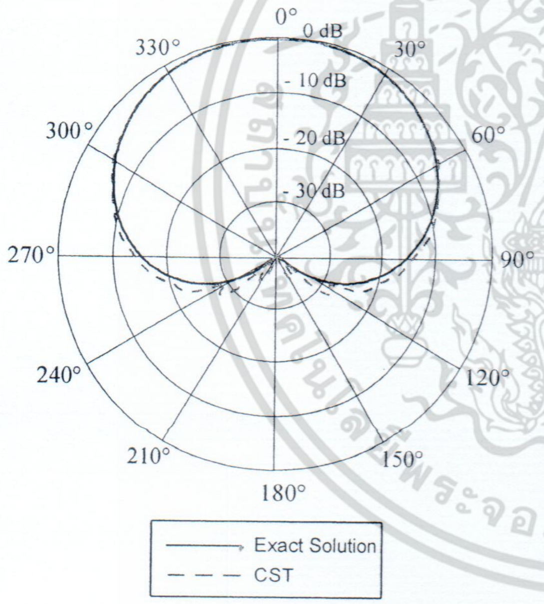
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



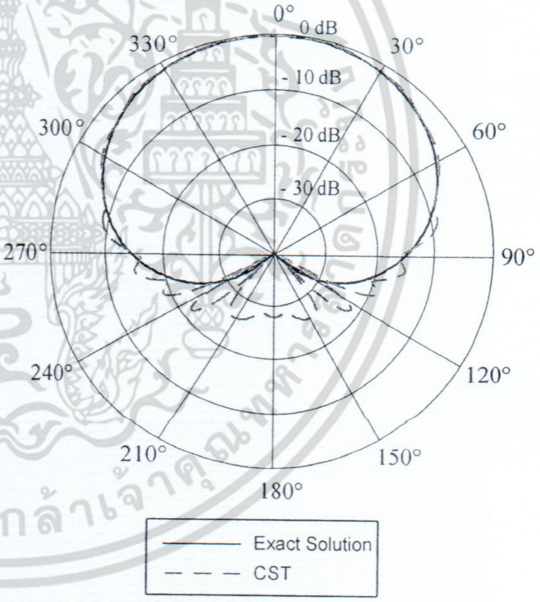
รูปที่ 3.56 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.57 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

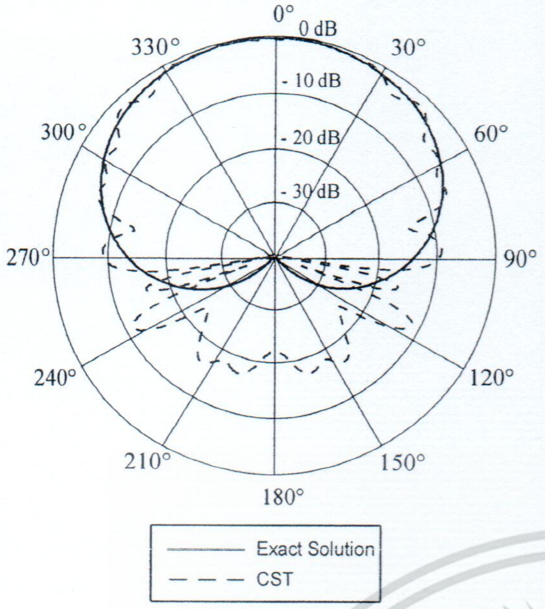


รูปที่ 3.58 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)

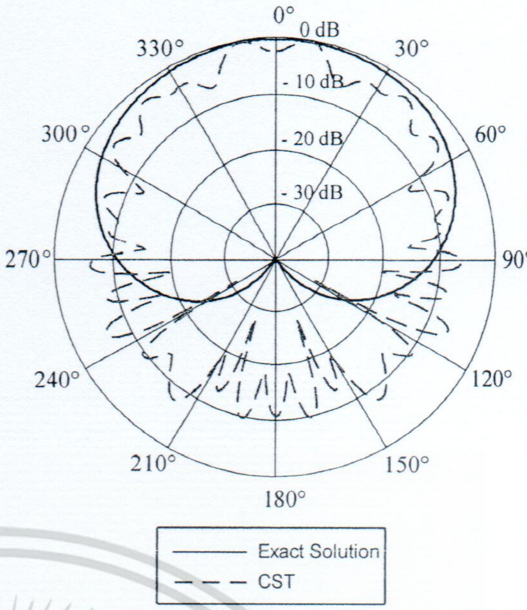


รูปที่ 3.59 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

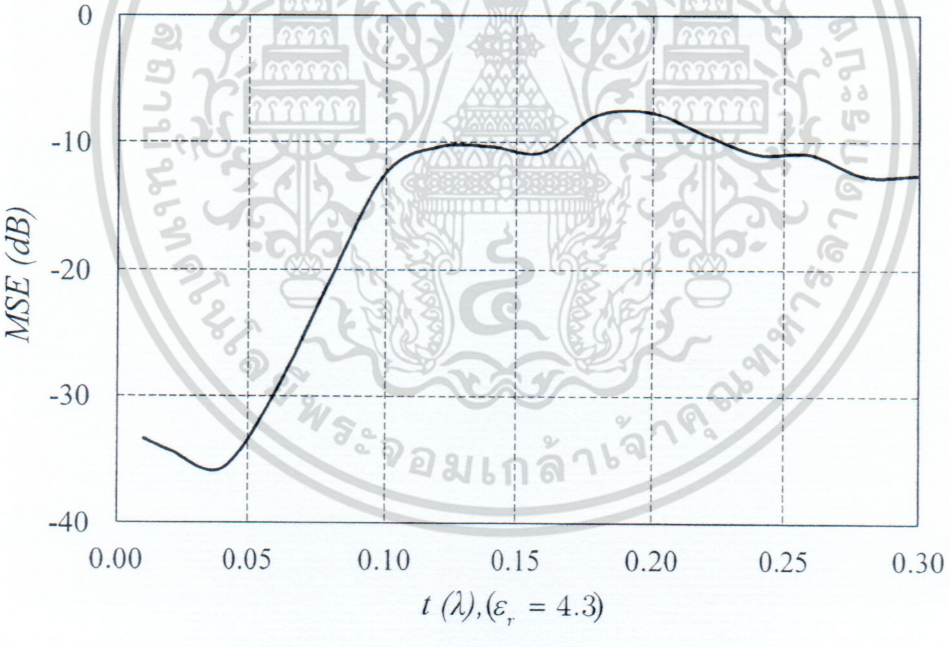
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.60แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



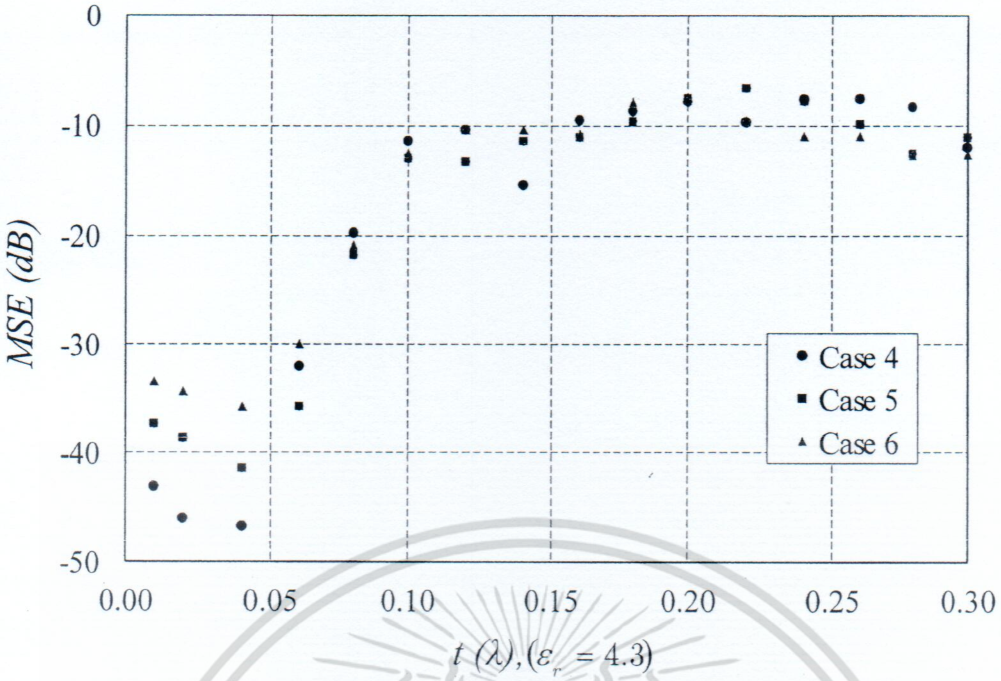
รูปที่ 3.61 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)



รูปที่ 3.62 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 6 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

จากรูปที่ 62 จะเห็นได้ว่าผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยในช่วงความหนาดังกล่าวของวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) กำหนดให้รัศมีของทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 3 λ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -35.7 dB ถึง -20 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.08 λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.63 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 และกรณีที่ 6

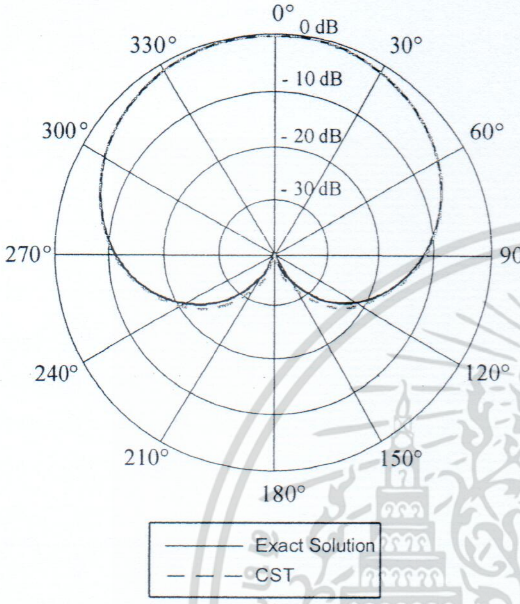
จากรูปที่ 3.63 เป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างกรณีที่ 4 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ λ หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1)$ FR-4 ที่มีความหนา 0.01 λ -0.3 λ เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 2λ หุ้มด้วย Teflon ที่มีความหนา 0.01 λ -0.3 λ และเป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ระหว่างกรณีที่ 6 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 3λ หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 6 จะให้ผลที่ด้อยที่สุดในสามกรณีที่ทำการศึกษา ซึ่งจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 5 จะให้ผลที่ด้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่ 4 ซึ่งหมายความว่าเมื่อค่ารัศมีทรงกระบอกมีค่าที่กว้างขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio กับผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของทั้งสองกรณีจะสอดคล้องกันคือค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะแปลผันตรงกับค่าความหนาของวัสดุที่นำมาเคลือบ

3.1.3 แพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 6, \mu = 1)$

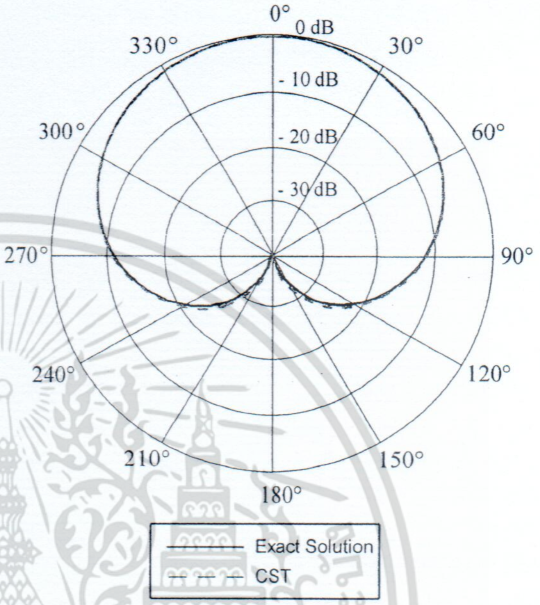
3.1.3.1 กรณีที่ 7: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 6, \mu = 1)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

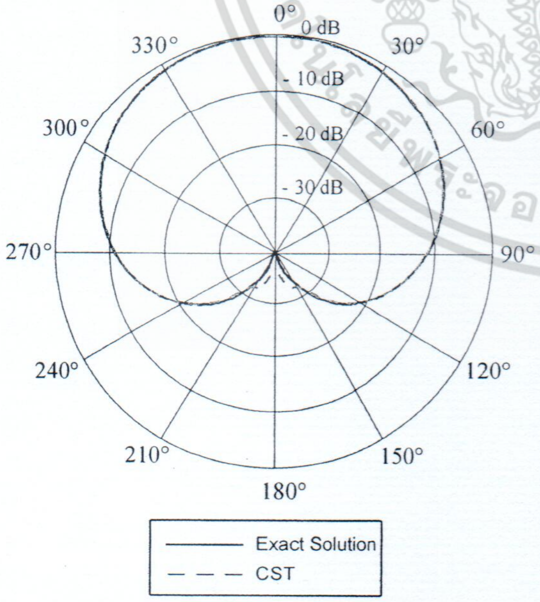
รูปที่ 3.64-3.69 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio จะมีผลที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความหนา 0.01 λ -0.06 λ



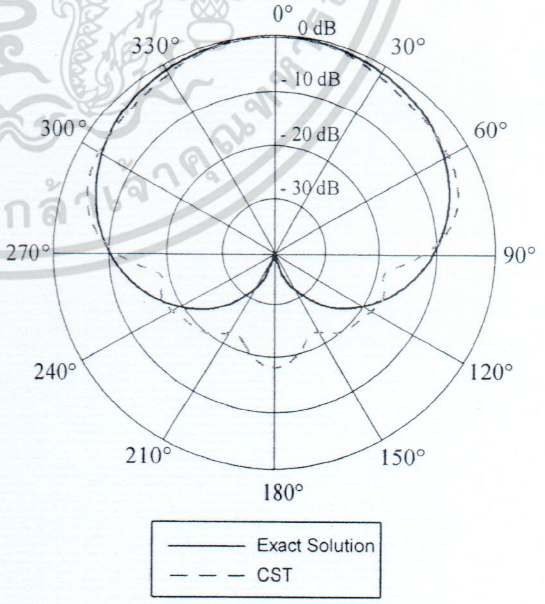
รูปที่ 3.64 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.65 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)

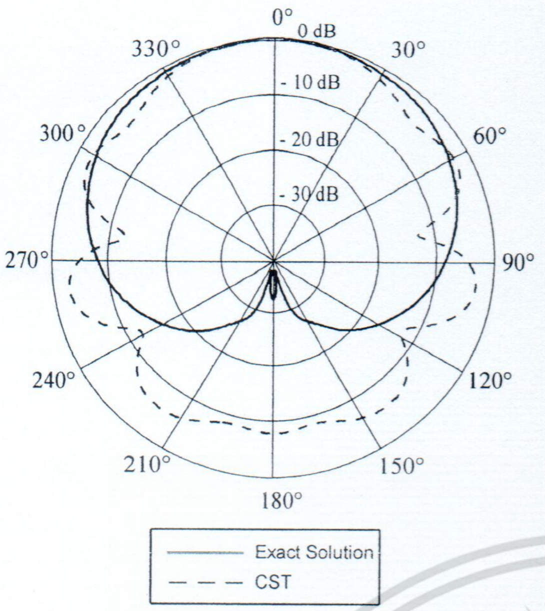


รูปที่ 3.66 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)

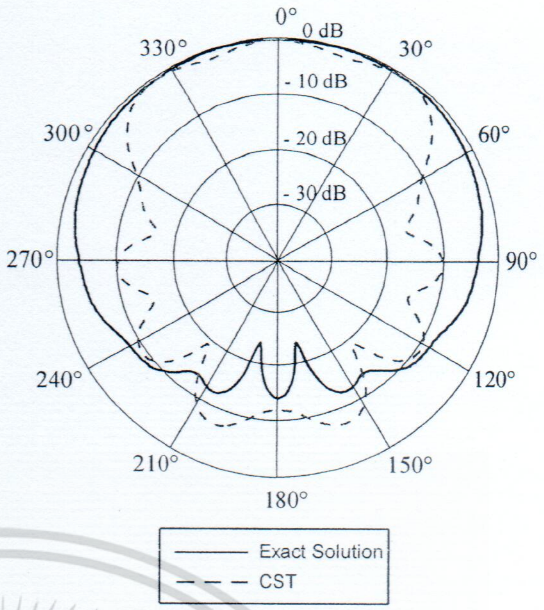


รูปที่ 3.67 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)

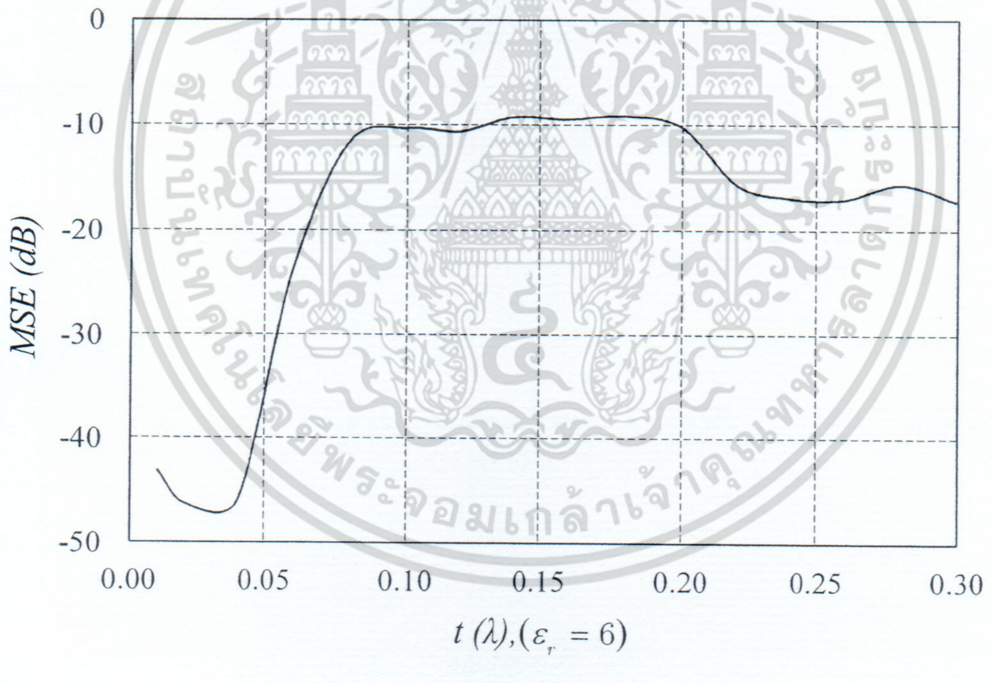
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.68 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.69 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)

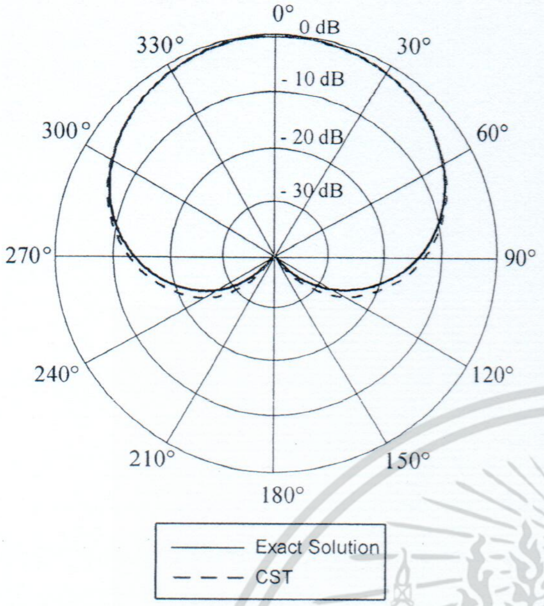


รูปที่ 3.70 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

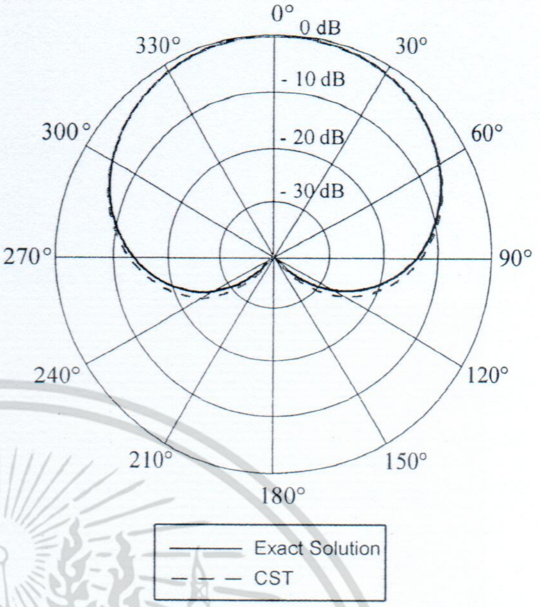
จากรูปที่ 3.70 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 โดยจะพบว่า เมื่อความหนาของ FR-4 เพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้น ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -43.21 dB ถึง-23.96 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.06 λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

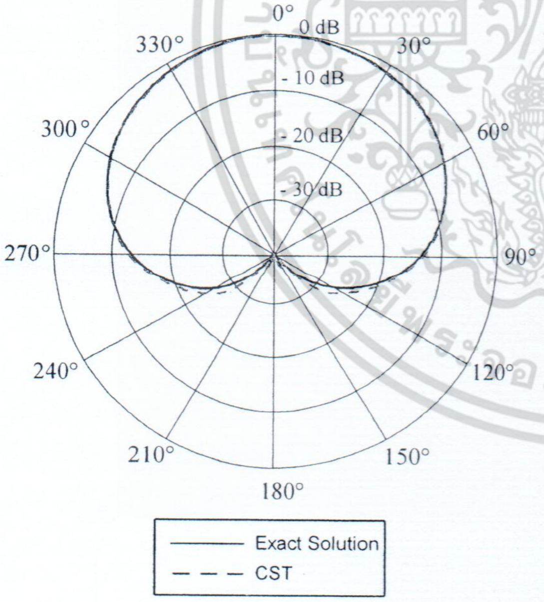
3.1.3.2 กรณีที่ 8: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)



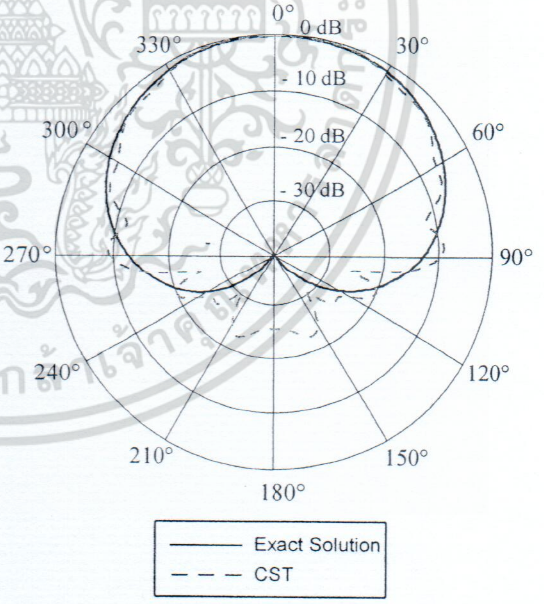
รูปที่ 3.71 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.72 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

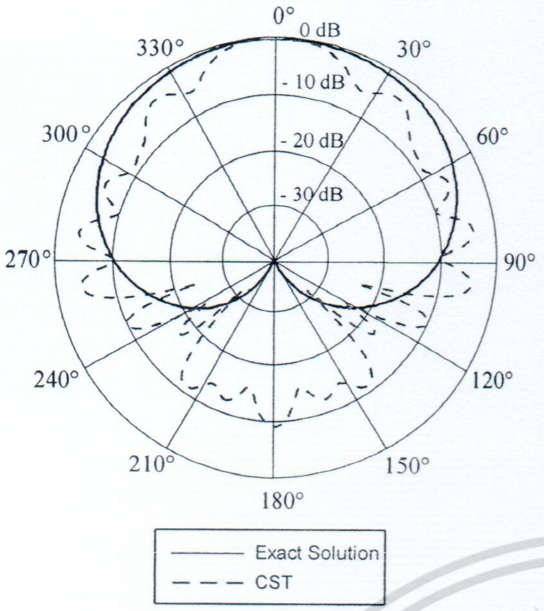


รูปที่ 3.73 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)

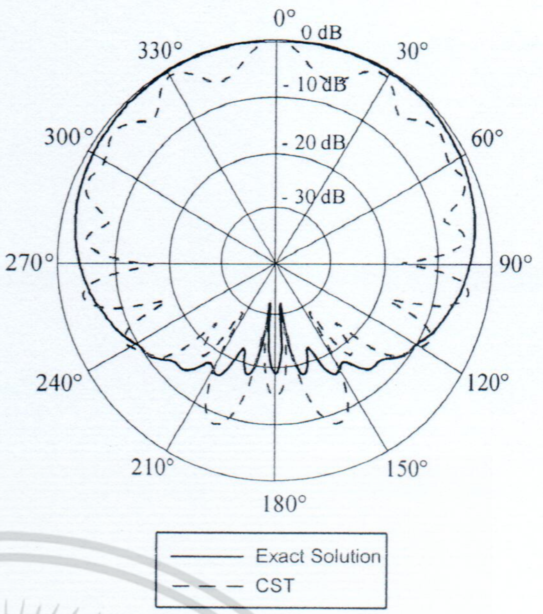


รูปที่ 3.74 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

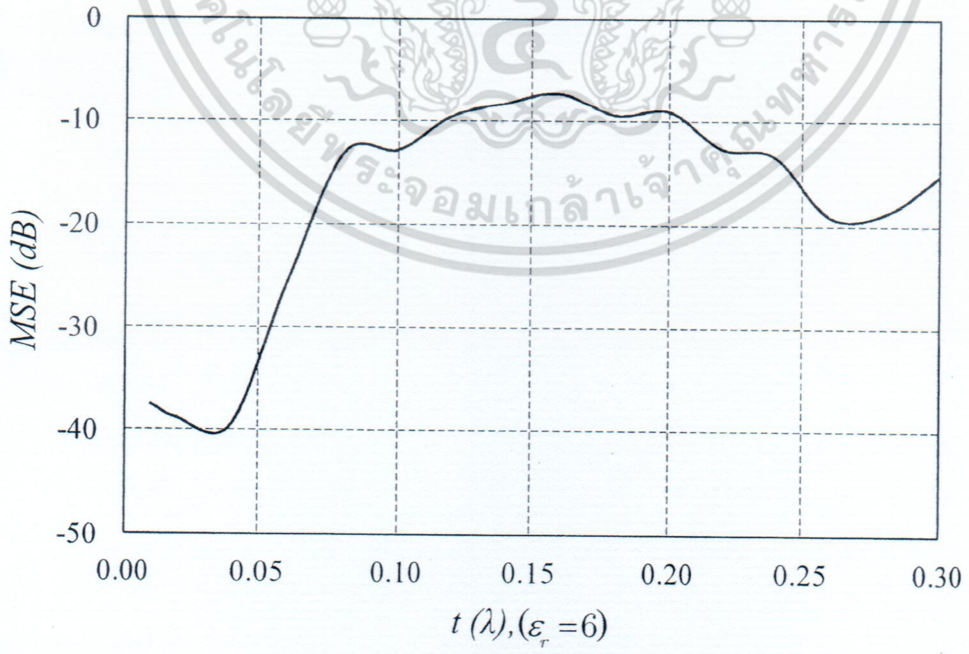


รูปที่ 3.75 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.76 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)

รูปที่ 3.64-3.69 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio จะมีผลที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความหนา 0.01 λ -0.06 λ



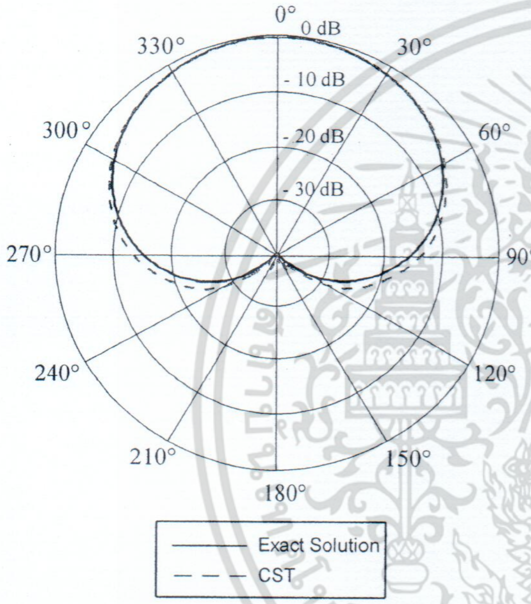
รูปที่ 3.77 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

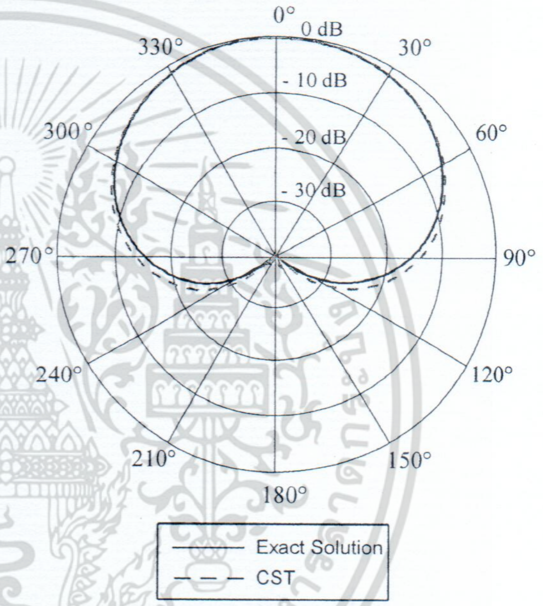
เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 7 ในรูปที่ 3.77 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 จะพบว่าค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้นเมื่อความหนาของ FR-4 เพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -37.56 dB ถึง -25.59 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.06 λ

3.1.3.3 กรณีที่ 9: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

รูปที่ 3.78-3.83 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ

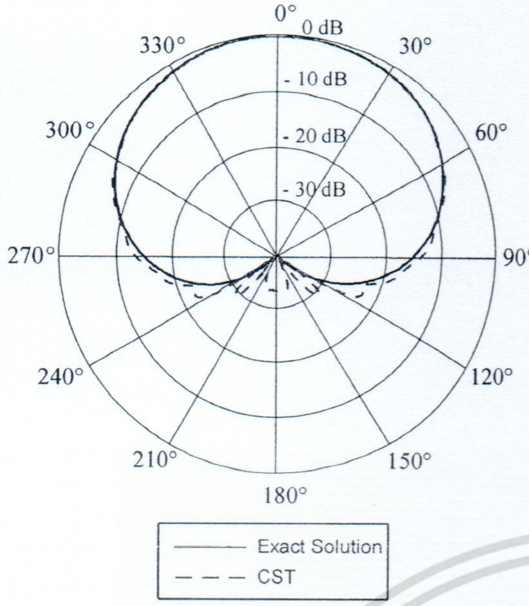


รูปที่ 3.78 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)

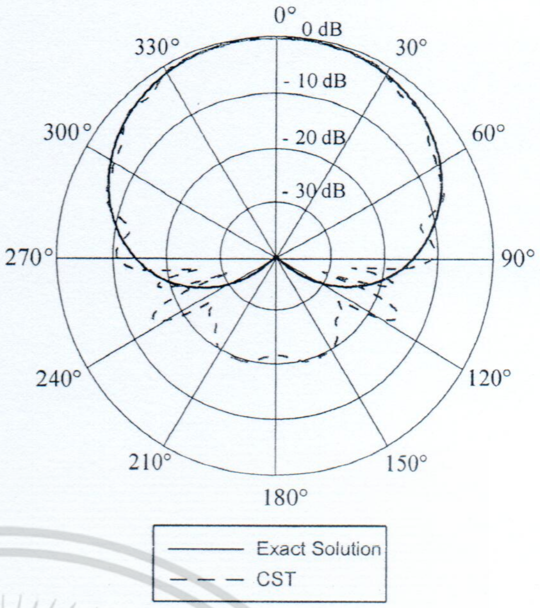


รูปที่ 3.79 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

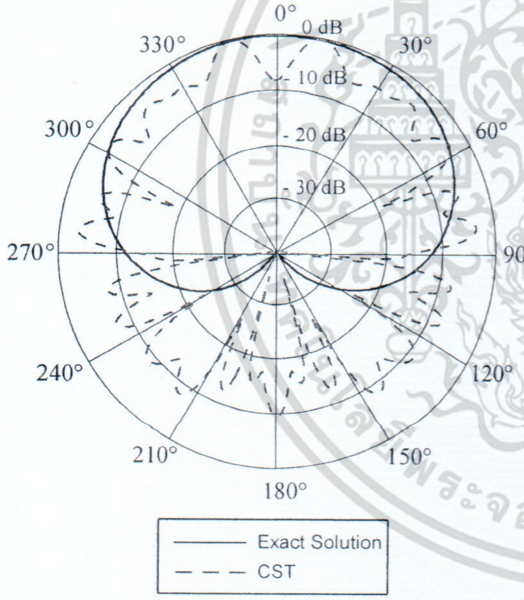
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



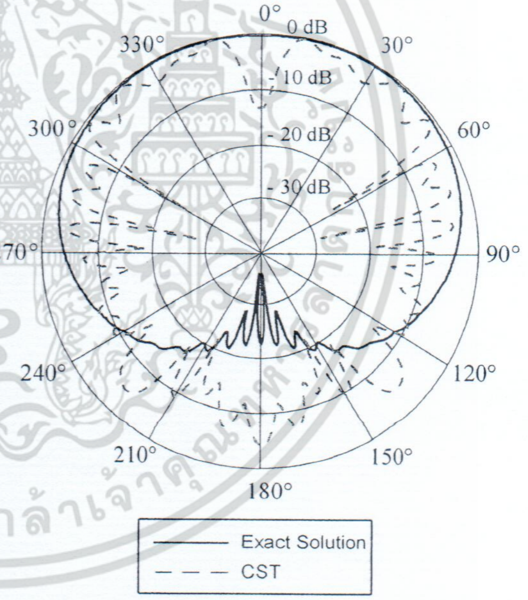
รูปที่ 3.80 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)



รูปที่ 3.81 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

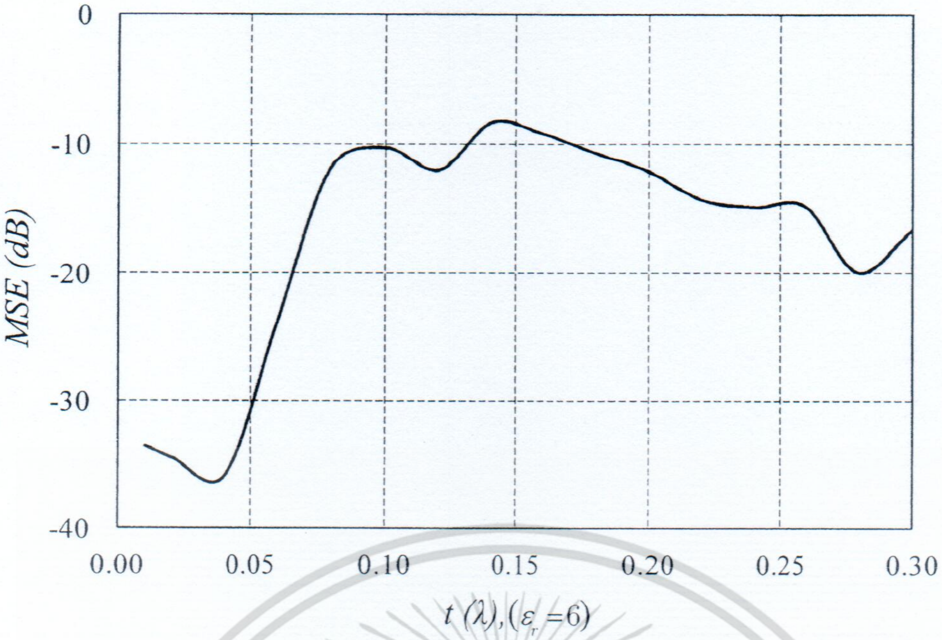


รูปที่ 3.82 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



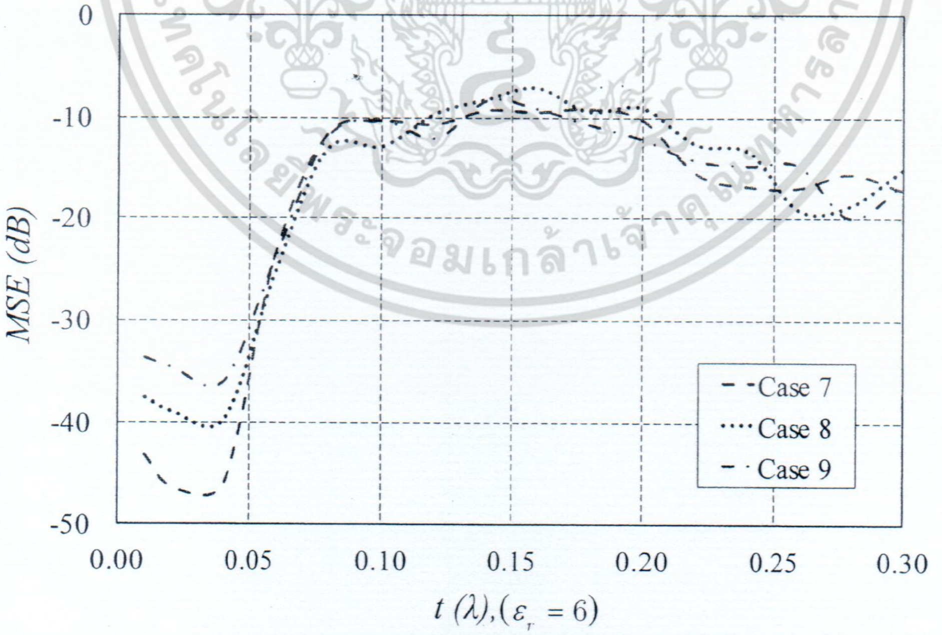
รูปที่ 3.83 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.84 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 9 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.84 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -33.6 dB ถึง -24.17 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ-0.06 λ มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยในช่วงความหนาดังกล่าวของวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)



รูปที่ 3.85 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 8 และกรณีที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

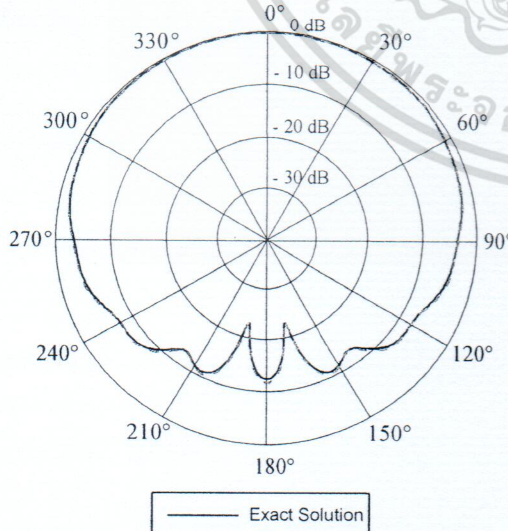
รูปที่ 3.85 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่กำหนดให้ทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 1λ(กรณีที่ 7) 2λ (กรณีที่ 8) 3λ (กรณีที่ 9) และถูกหุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มี $\varepsilon_r = 6, \mu = 1$ ด้วยความหนา 0.01 λ -0.2 λ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้นผลเฉลยจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะมีค่าที่ต่างกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมากขึ้น โดยจะเห็นได้ว่า เฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างค่าความหนาของวัสดุเคลือบที่ 0.01 λ -0.06 λ จะมีค่าเท่ากับ -35.8 dB

3.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้น

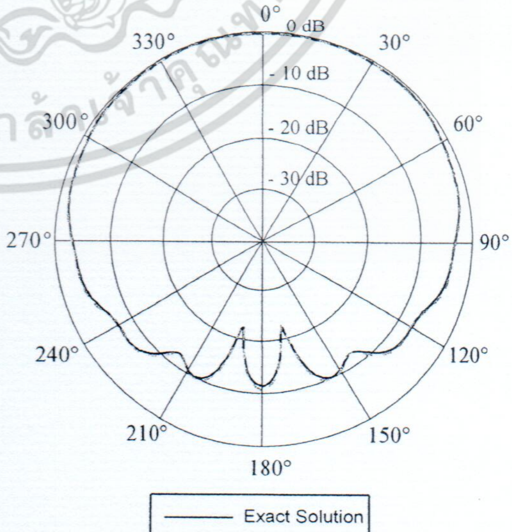
เนื้อหาส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลที่ได้จากวิธีการคำนวณจากผลเฉลยไอเกนฟังชั่นของคลื่น จากสมการที่ (64) เปรียบเทียบกับผลที่ได้การจำลองโดยโปรแกรม CST microwave studio โดยผลดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ที่ได้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนวัสดุพื้นผิวอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้งทรงกระบอก ที่ได้มาจากวิธีการทั้งสอง นอกจากนั้นค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยยังได้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเพื่อตัดสินใจในการหาขอบเขตการใช้งาน โดยกรณีการศึกษาจะประกอบด้วย 1. ความกว้างของท่อทรงกระบอกขนาด λ 2λ และ 3λ 2. ค่าไดอิเล็กตริก $\varepsilon_r = 2.1$ $\varepsilon_r = 4$ และ $\varepsilon_r = 6$ 3. ความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริก

3.2.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

3.2.1.1 กรณีที่ 1: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

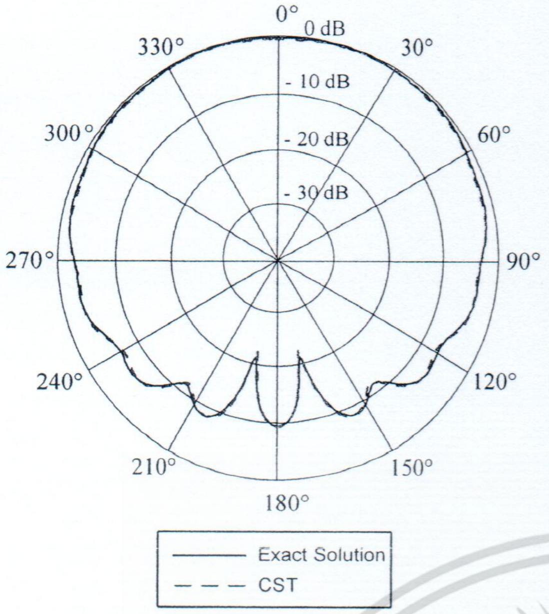


รูปที่ 3.86 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)

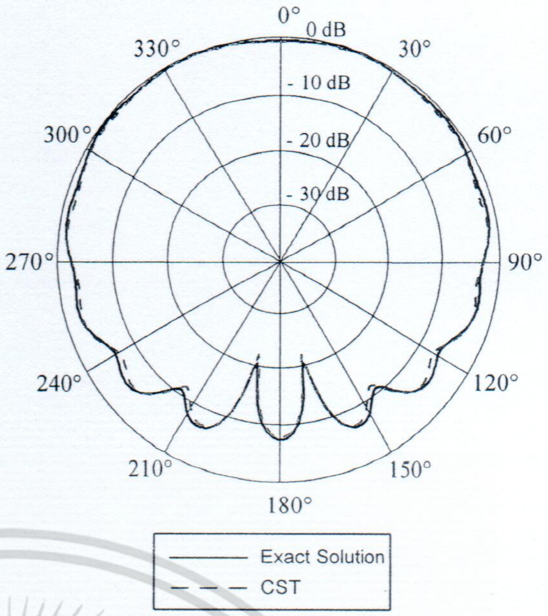


รูปที่ 3.87 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)

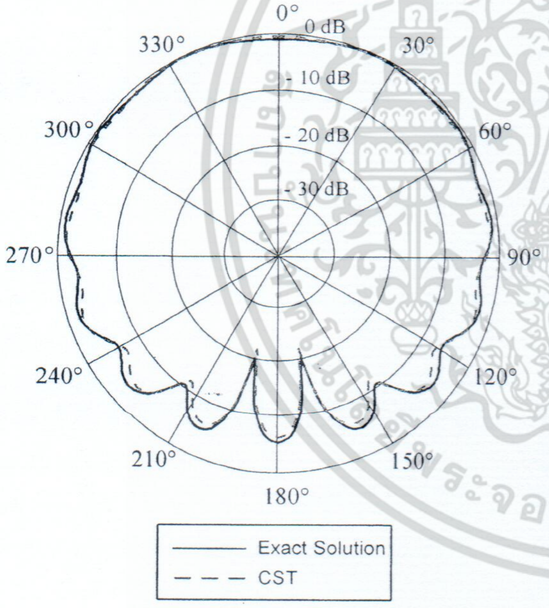
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



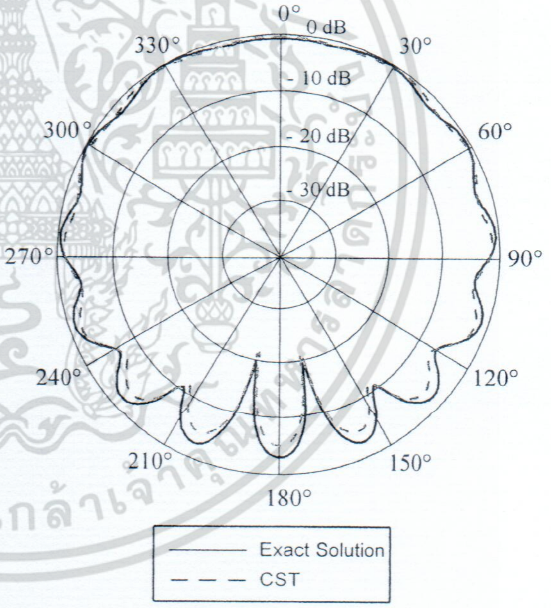
รูปที่ 3.88 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)



รูปที่ 3.89 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)

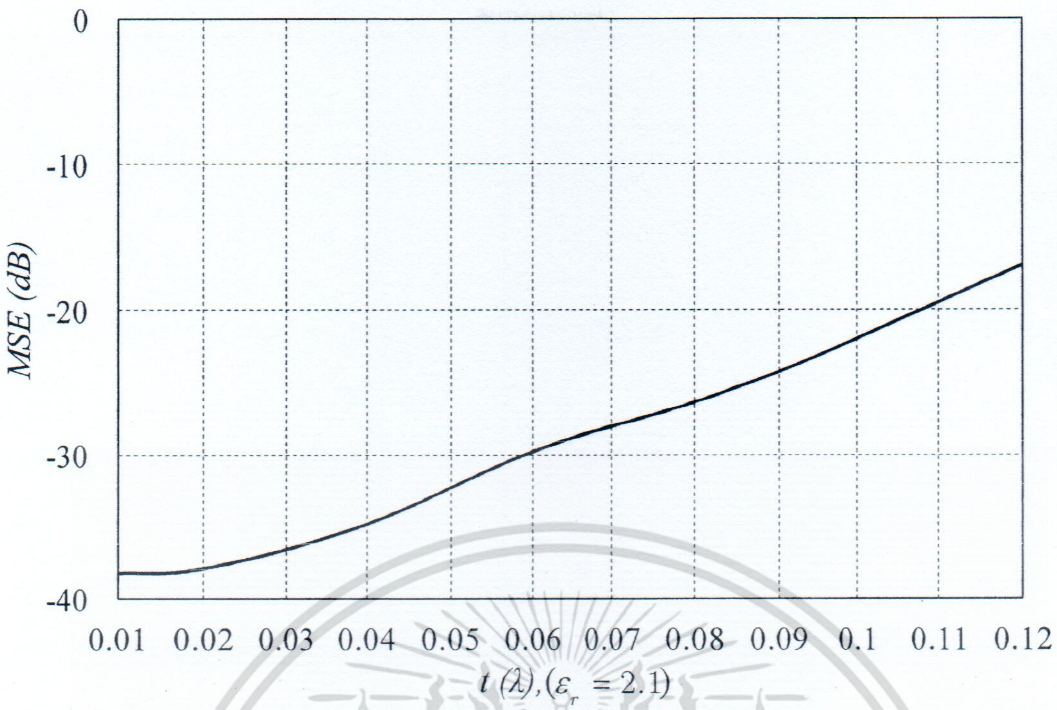


รูปที่ 3.90 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.91 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

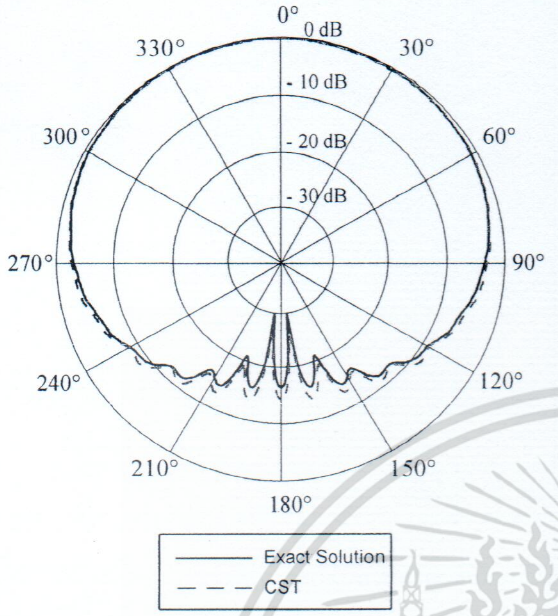


รูปที่ 3.92 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

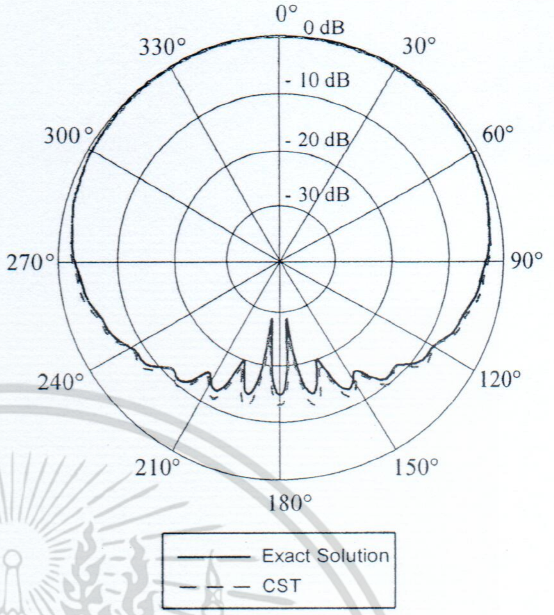
เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ-0.12 λ) รูปที่ 3.87-3.92 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของระหว่างวิธีการแม่นตรงกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเปลี่ยนแปลงไป ความแตกต่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากวิธีการแม่นตรงและจากการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio จะเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยจากกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่มีค่ามากกว่า -20 dB คือช่วงความหนาประมาณ 0.01 λ-0.11 λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

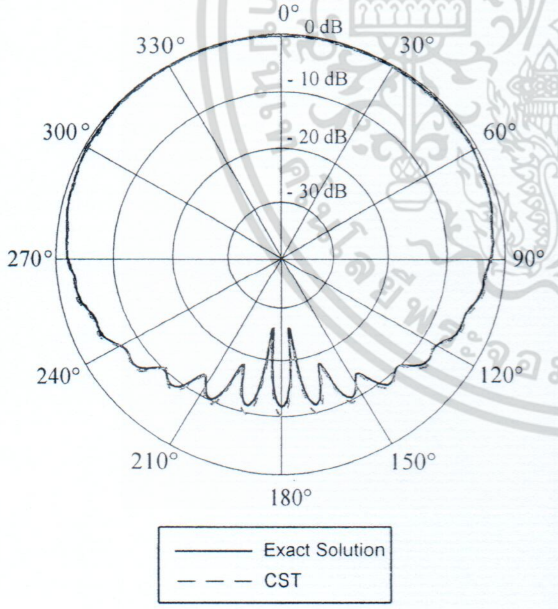
3.2.1.2 กรณีที่ 2: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)



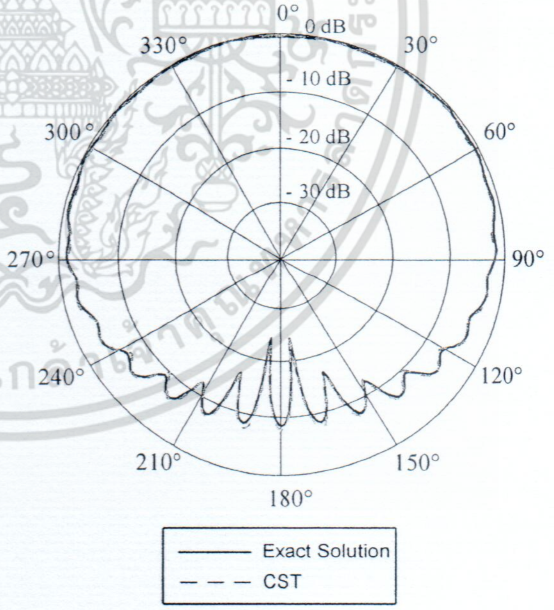
รูปที่ 3.93 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.94 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

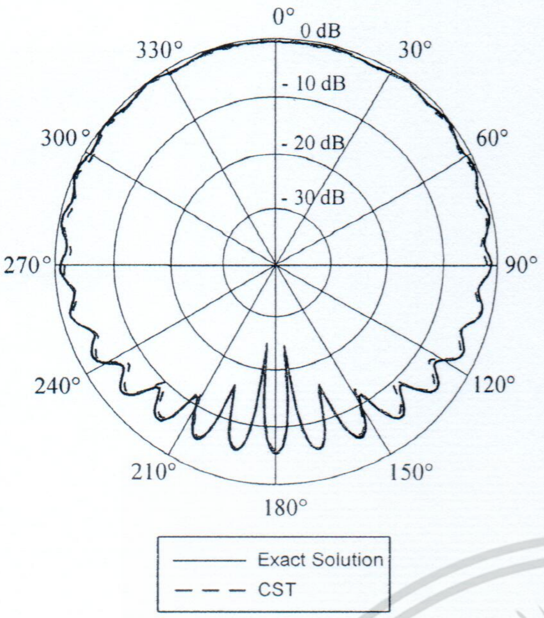


รูปที่ 3.95 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)

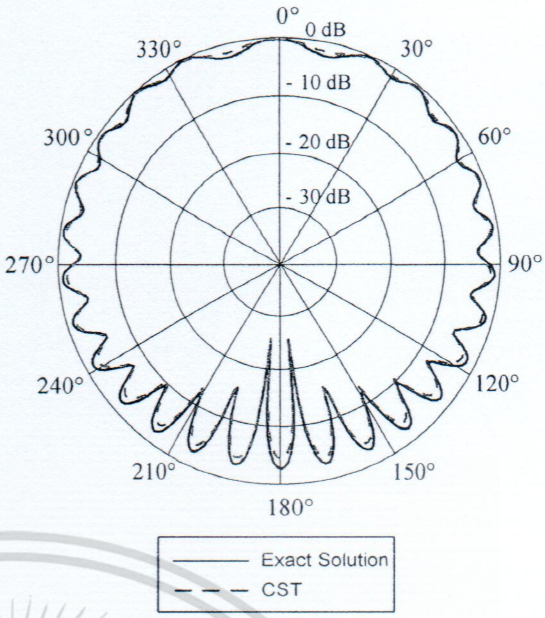


รูปที่ 3.96 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

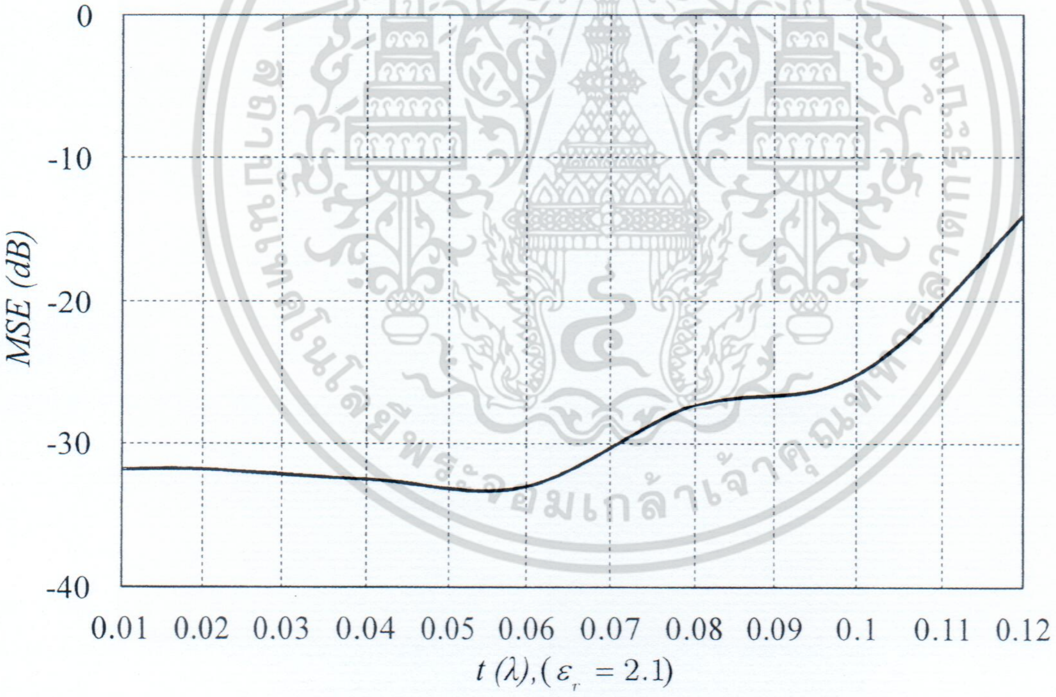
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.97 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.98 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)



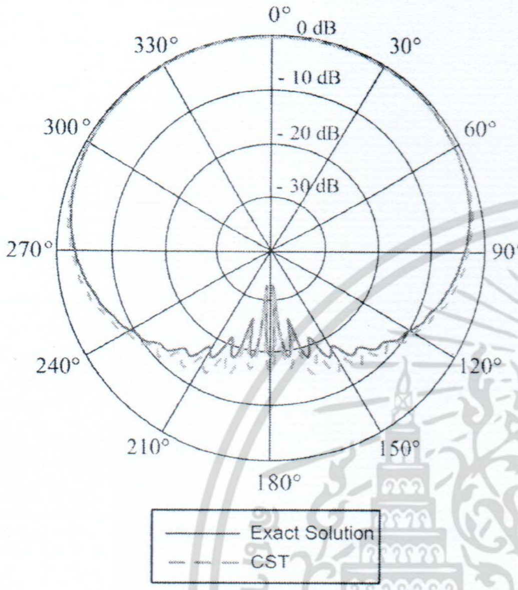
รูปที่ 3.99 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 2 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.93-3.98 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มี

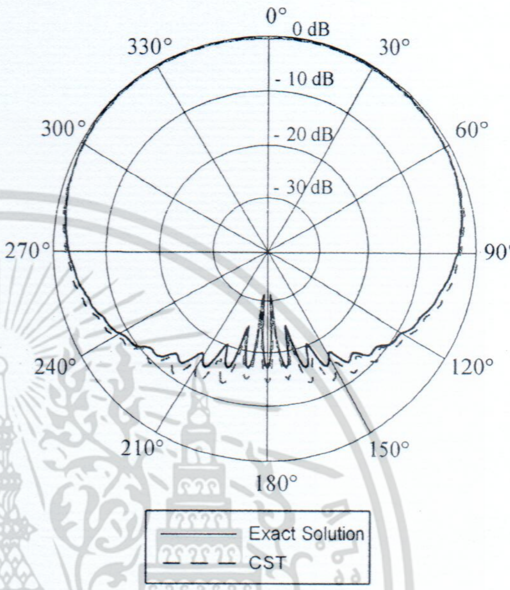
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่คล้ายคลึงกันในช่วงความหนาไดอิเล็กตริกระหว่าง (0.01 λ -0.11 λ) ซึ่งสอดคล้องกับค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากรูปที่ 3.99 ที่ความหนาดังกล่าวค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -31.8 dB ถึง –20 dB

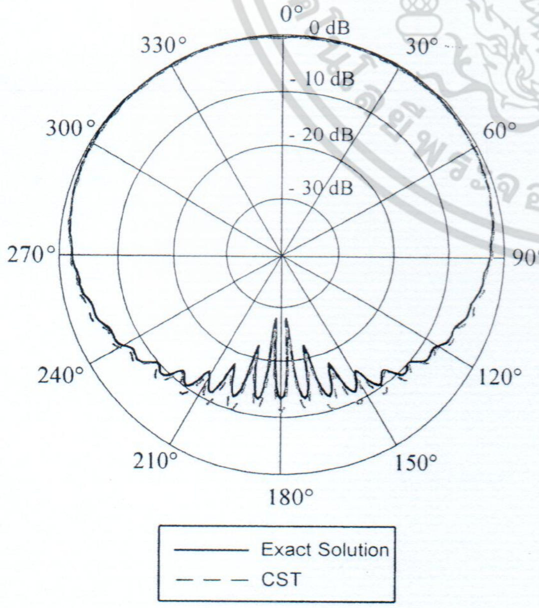
3.2.1.3 กรณีที่ 3: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)



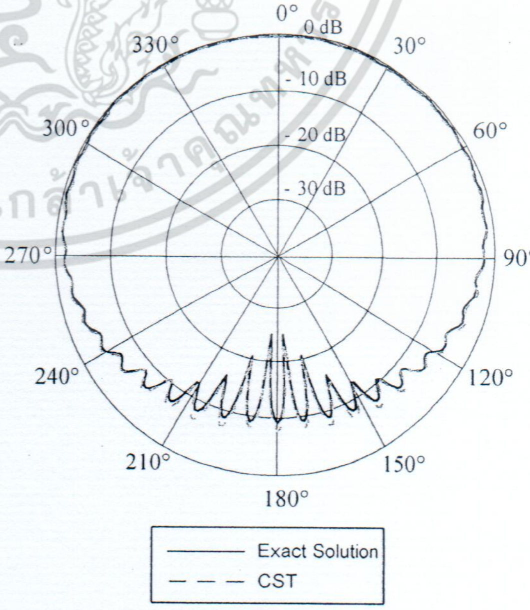
รูปที่ 3.100 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.101 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

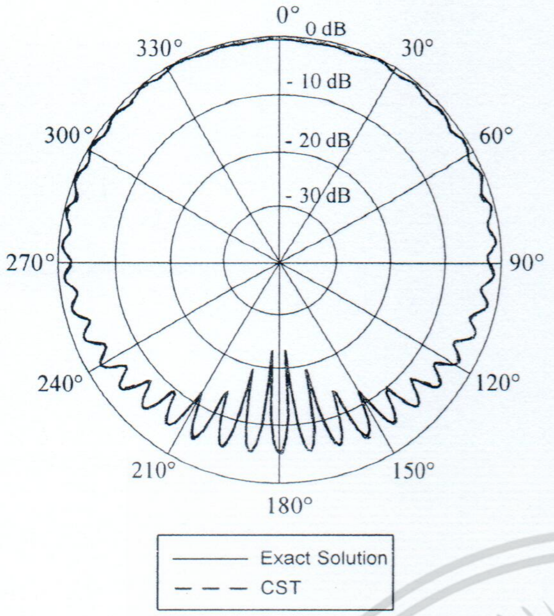


รูปที่ 3.102 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)

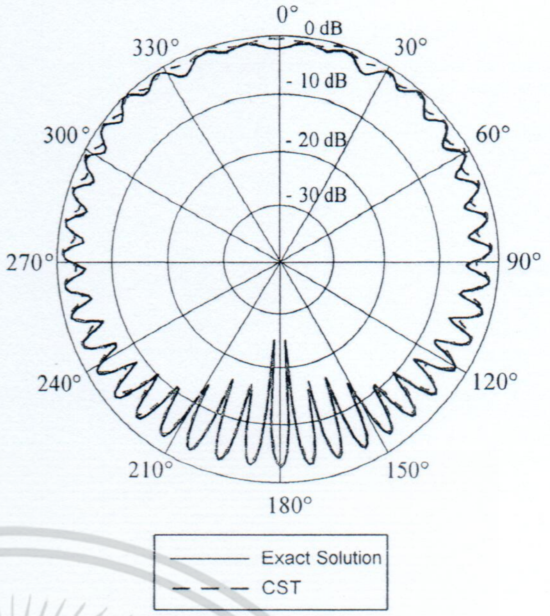


รูปที่ 3.103 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

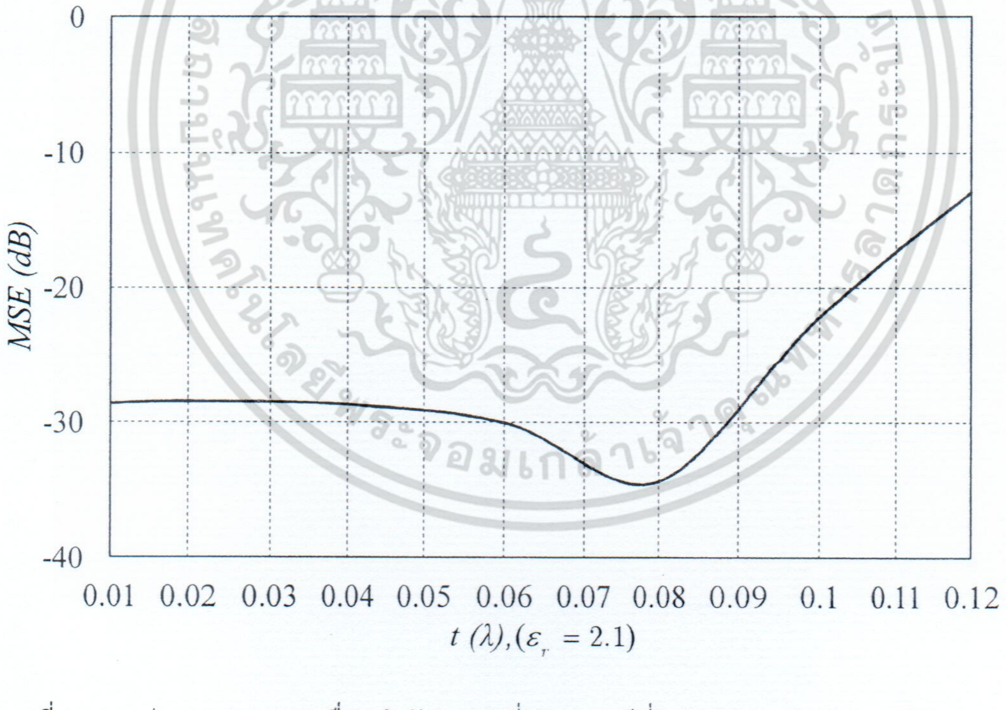
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.104 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.105 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)

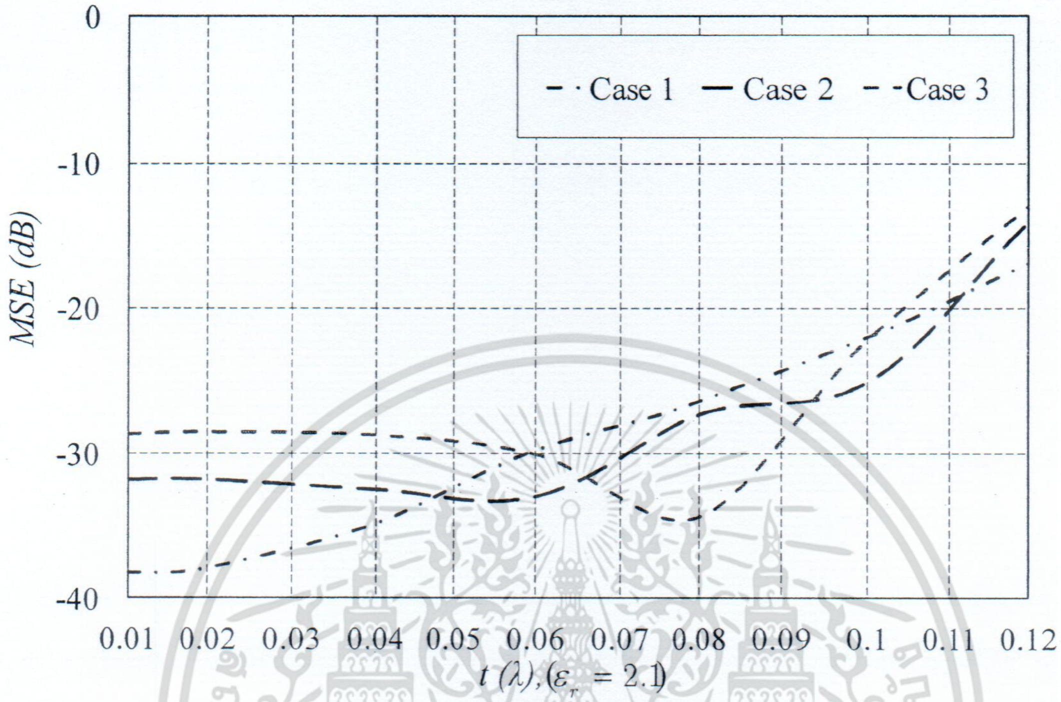


รูปที่ 3.106 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 3 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.100-3.105 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) เมื่อความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 0.01 λ -0.1 λ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบที่คล้ายคลึงกันในช่วงความหนาดังกล่าว โดยรูปที่ 3.106 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยจากกราฟจะพบความที่ค่าความหนา (0.01 λ -0.105 λ) ค่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะต่ำกว่า -20 dB



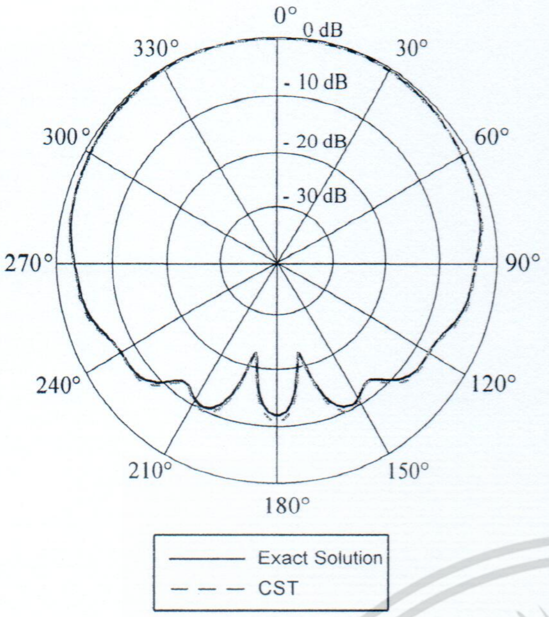
รูปที่ 3.107 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3

จากรูปที่ 3.107 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 โดยจะพบว่าทั้งสามกรณีเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างผลจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับจากผลการจำลองใน CST Microwave Studio ก็จะแตกต่างเพิ่มขึ้นด้วย โดยในกรณีที่ 1 และ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำกว่า -20 dB จะมีความหนาอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.11 λ ส่วนในกรณีที่สามจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.1 λ

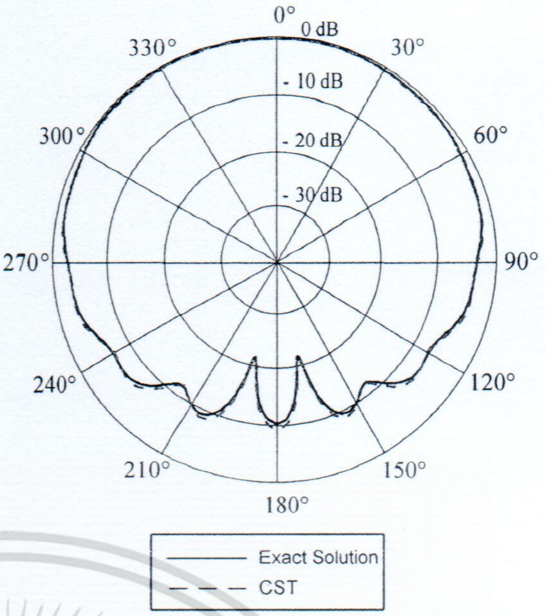
3.2.2 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

3.2.2.1 กรณีที่ 4: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

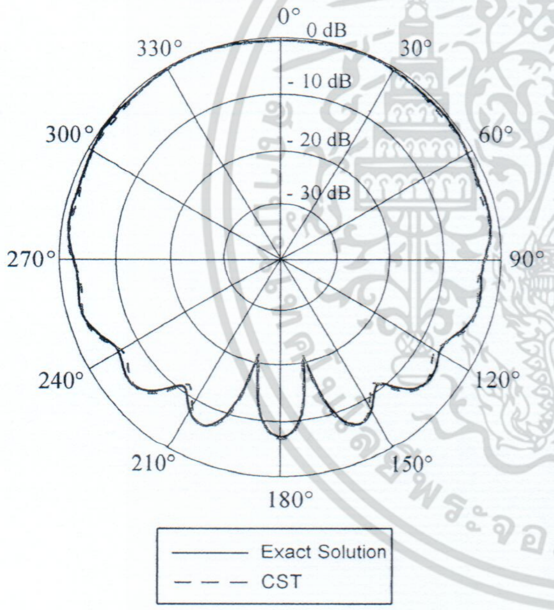
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



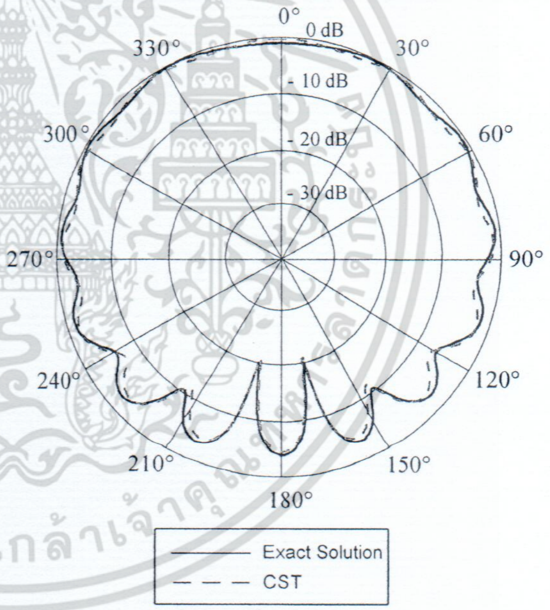
รูปที่ 3.108 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.109 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)

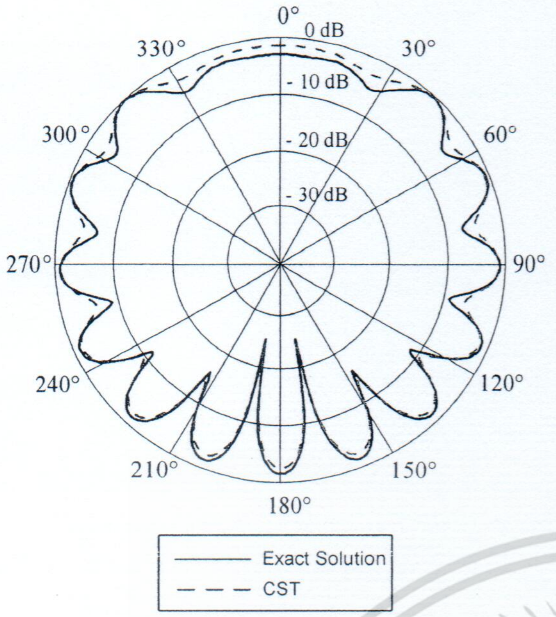


รูปที่ 3.110 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)

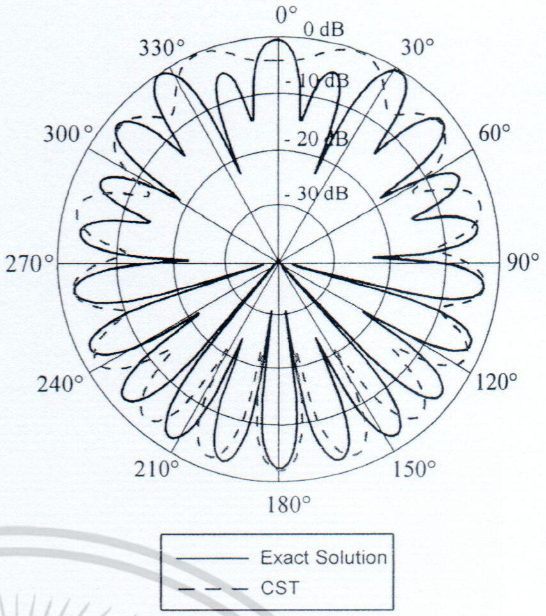


รูปที่ 3.111 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)

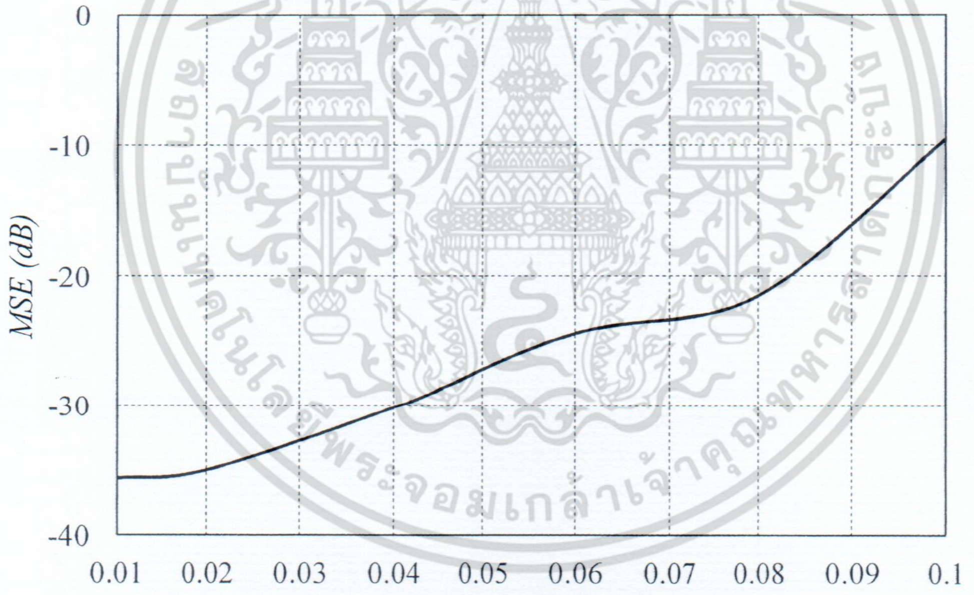
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.112 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.113 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)



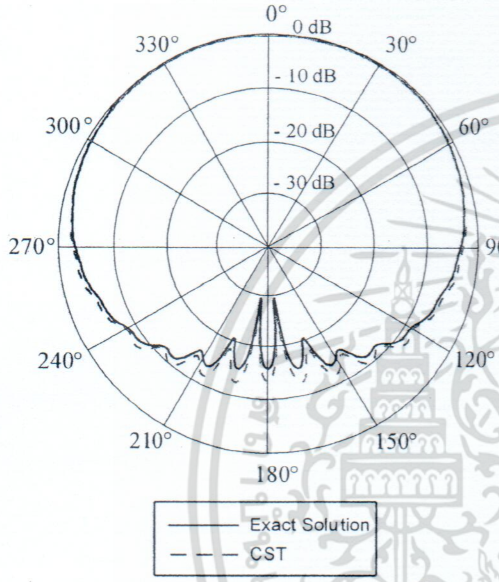
รูปที่ 3.114 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

จากรูปที่ 3.108-3.113 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในช่วงความหนาที่ 0.01 λ -0.08 λ โดยเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.08 λ ค่า

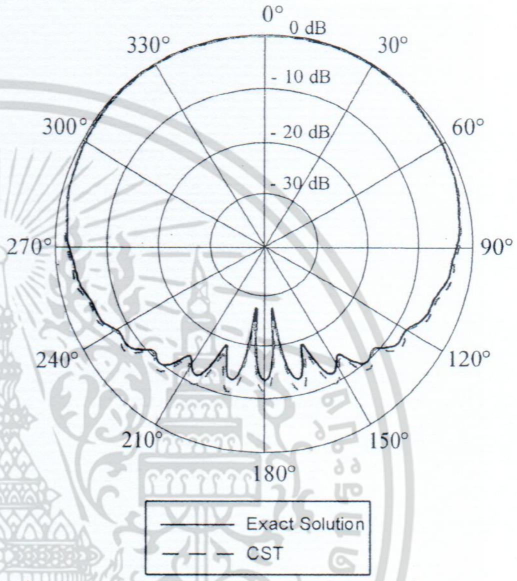
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนจะมีความผิดพลาดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.47 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane เมื่อ ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio นั้นมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 3.114 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -35 dB ถึง -20 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.08 λ

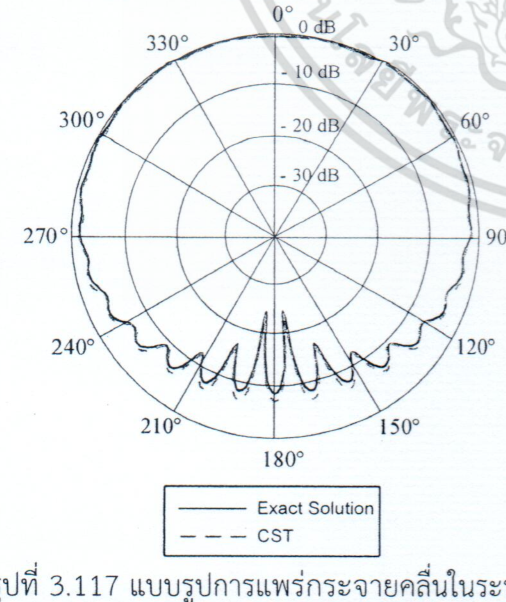
3.2.2.2 กรณีที่ 5: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)



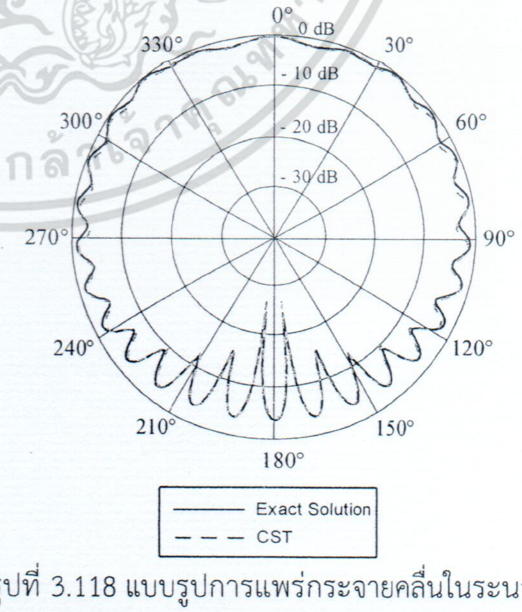
รูปที่ 3.115 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.116 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

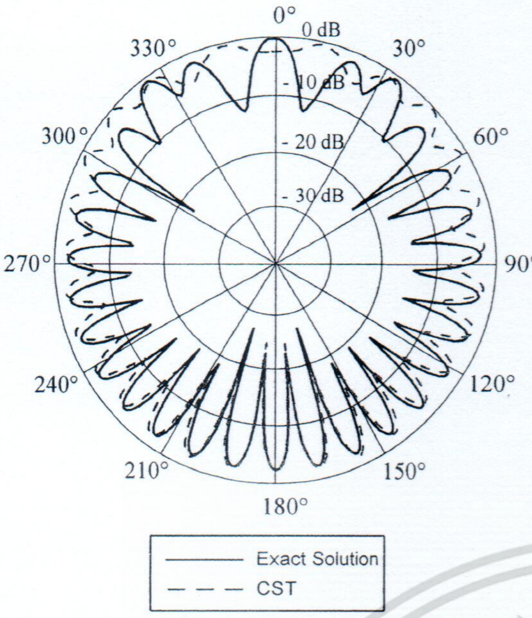


รูปที่ 3.117 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)

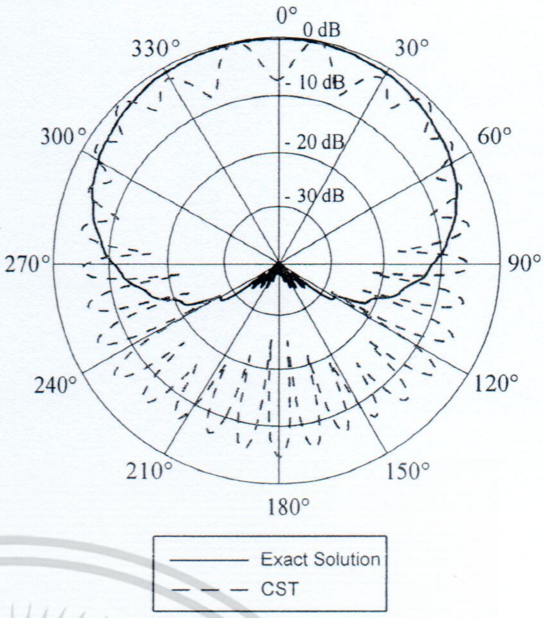


รูปที่ 3.118 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

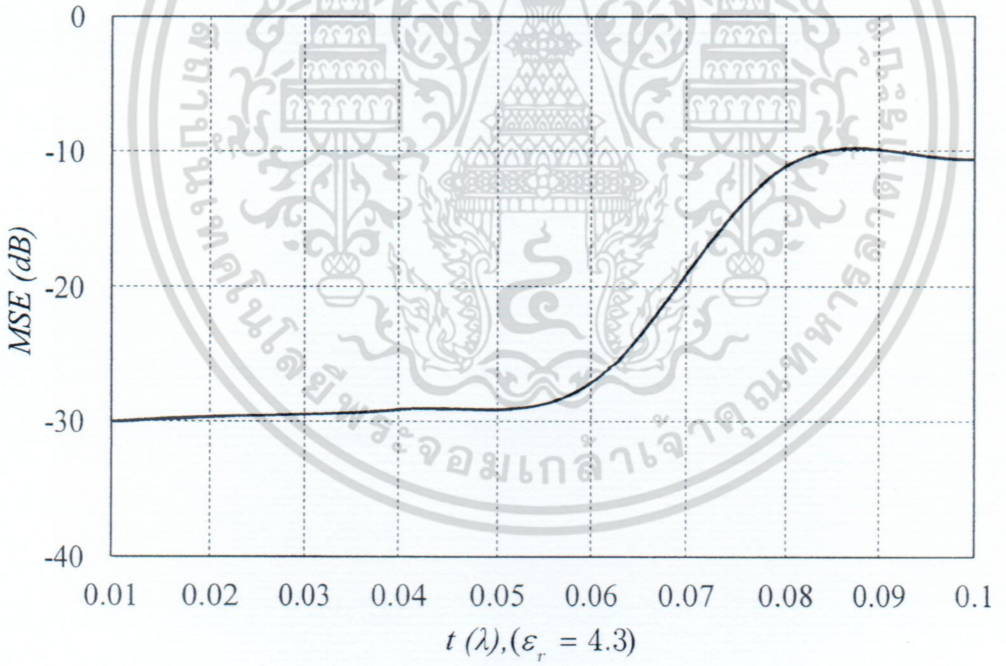
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.119 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.120 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)



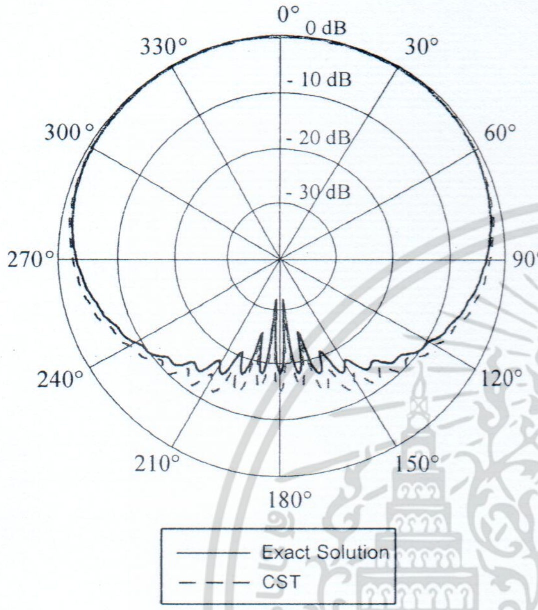
รูปที่ 3.121 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 5 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

รูปที่ 3.115-3.120 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) โดยในช่วงความหนา 0.01 λ -0.07 λ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจาก

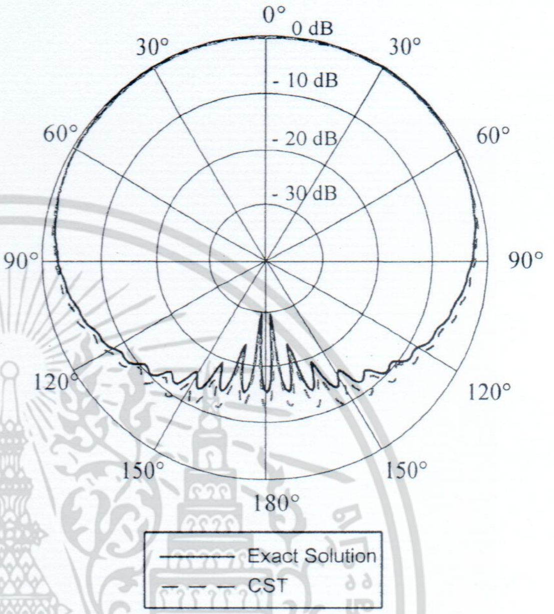
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม CST Microwave Studio โดยเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.07 λ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีความผิดพลาดมากขึ้น จากกราฟค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าผลเฉลยจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio

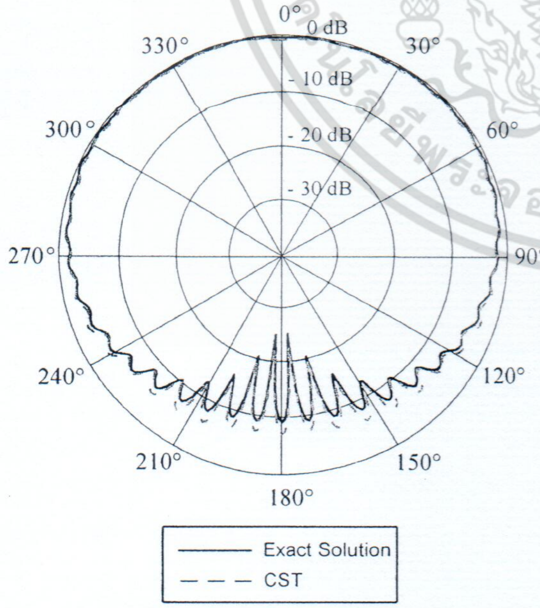
3.2.2.3 กรณีที่ 6: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)



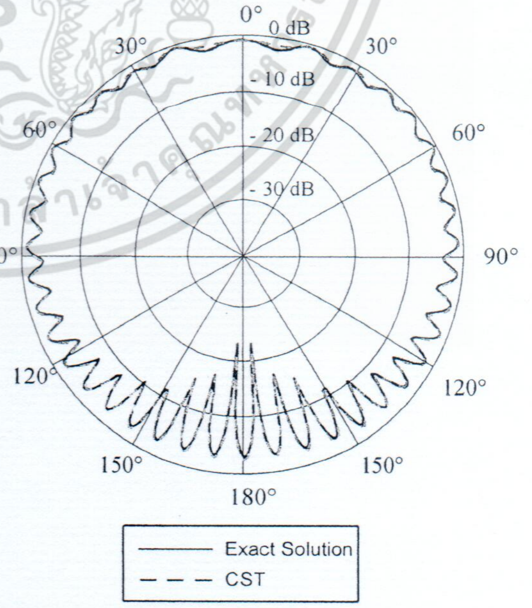
รูปที่ 3.122 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.123 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

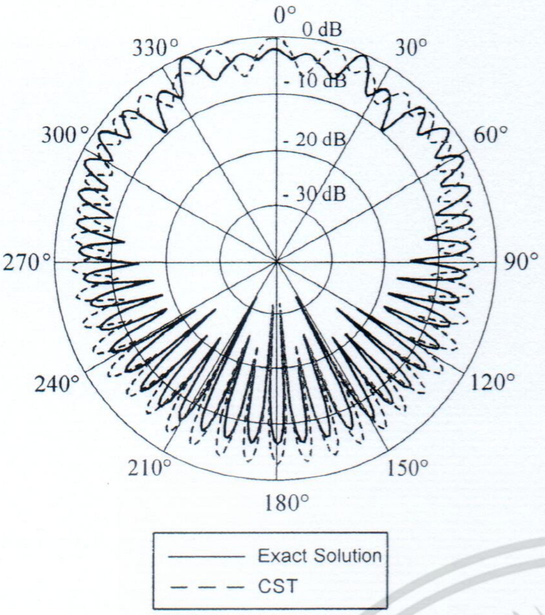


รูปที่ 3.124 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)

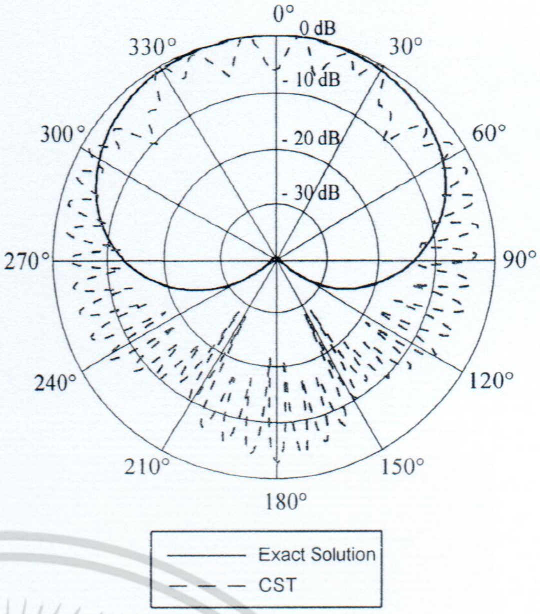


รูปที่ 3.125 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

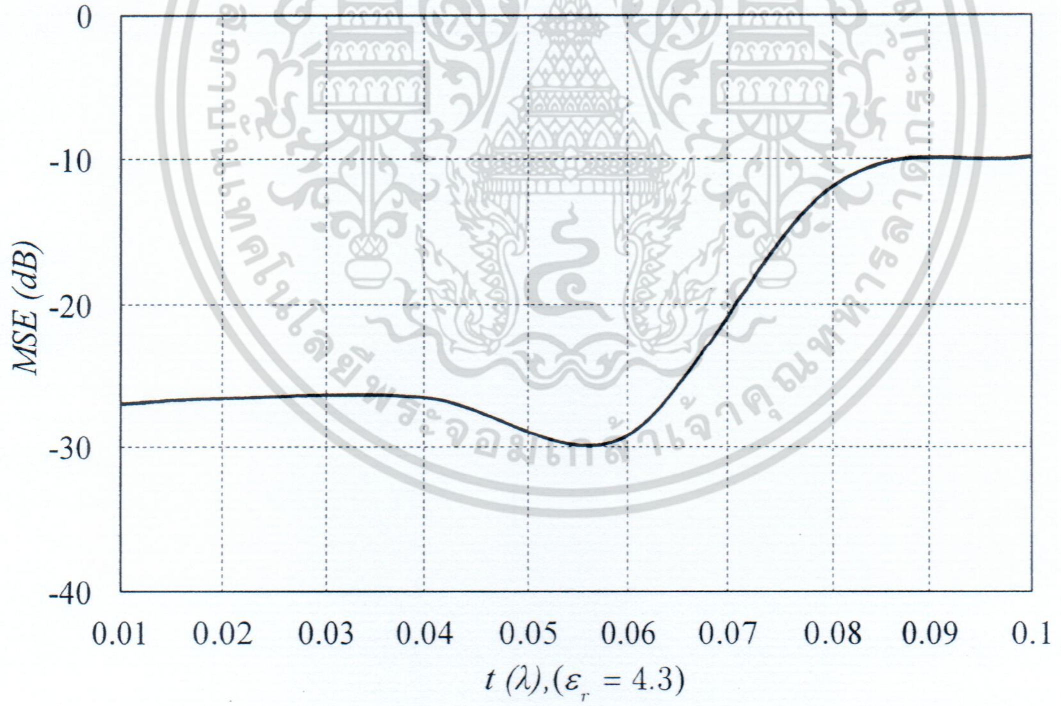
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.126 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.127 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)

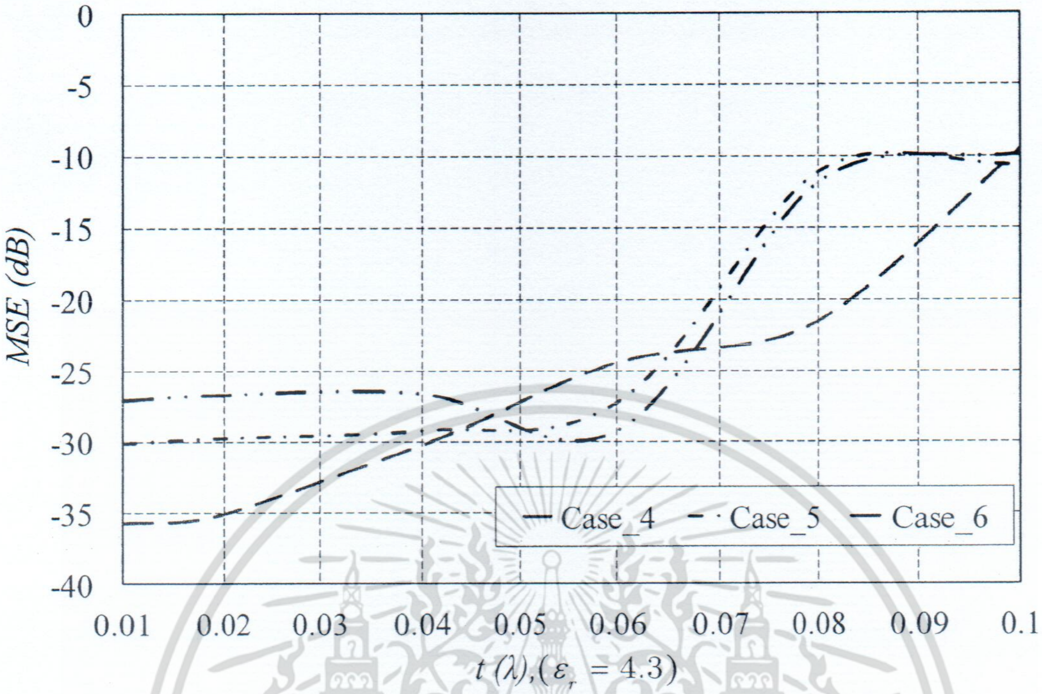


รูปที่ 3.128 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 6 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$)

ในรูปที่ 3.122-3.127 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริก (0.01 λ -0.1 λ) โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio จะมีผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายคลึงกัน และจากรูปที่ 3.128 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -27.09 dB ถึง -20 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.07 λ



รูปที่ 3.129 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 และกรณีที่ 6

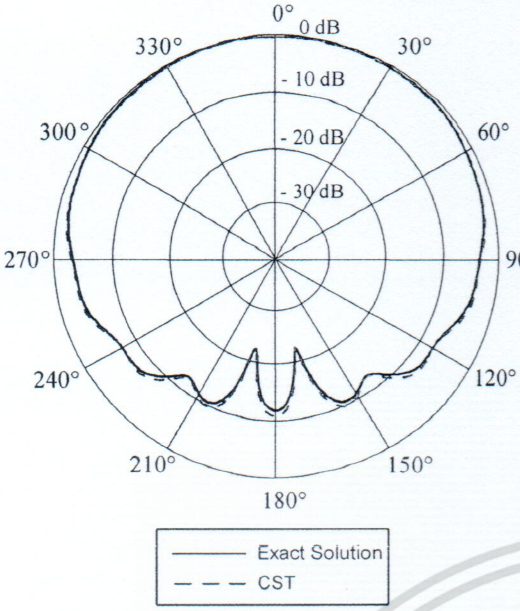
จากรูปที่ 3.129 เป็นการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างกรณีที่ 4 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ λ เปรียบเทียบกับกรณีที่ 5 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 2λ และกรณีที่ 6 คือวัสดุทรงกระบอกซึ่งรัศมี (a) ของทรงกระบอกตัวนำมีค่าเท่ากับ 3λ โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะแปลผันตรงกับความหนาของวัสดุ FR-4 โดยในกรณีที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำกว่า -20 dB จะมีความหนาอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.08 λ ส่วนในกรณีที่ 5 และ 6 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.07 λ

3.2.3 แพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 6, \mu = 1)$

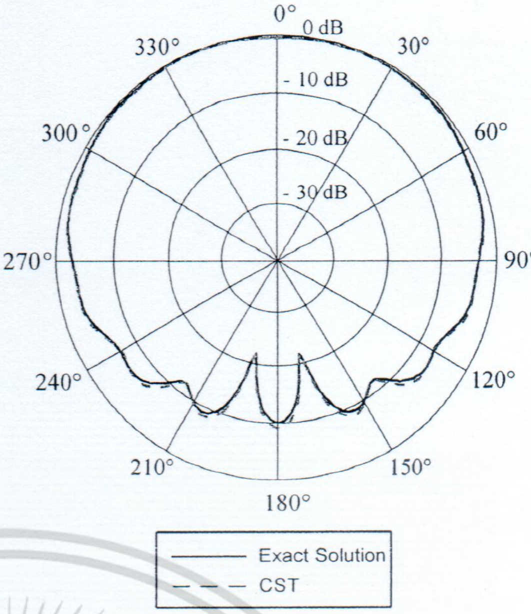
3.2.3.1 กรณีที่ 7: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 6, \mu = 1)$

รูปที่ 3.130-3.135 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก $(\varepsilon_r = 6, \mu = 1)$ เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ

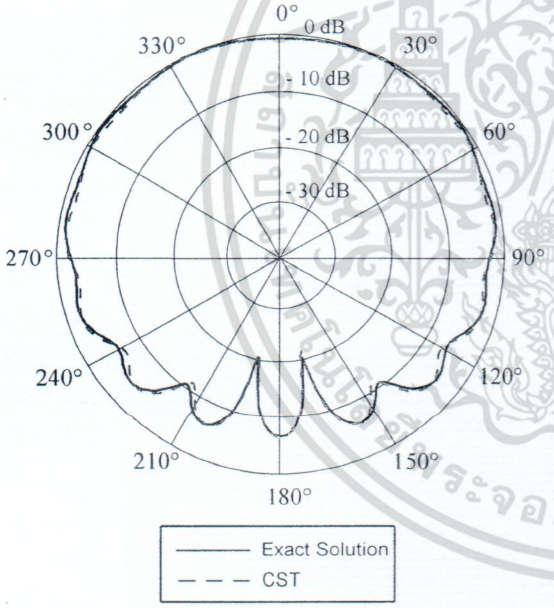
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



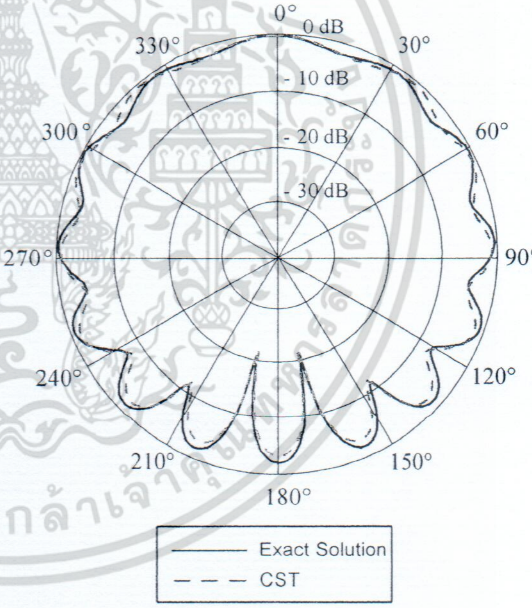
รูปที่ 3.130 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.131 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.02\lambda$)

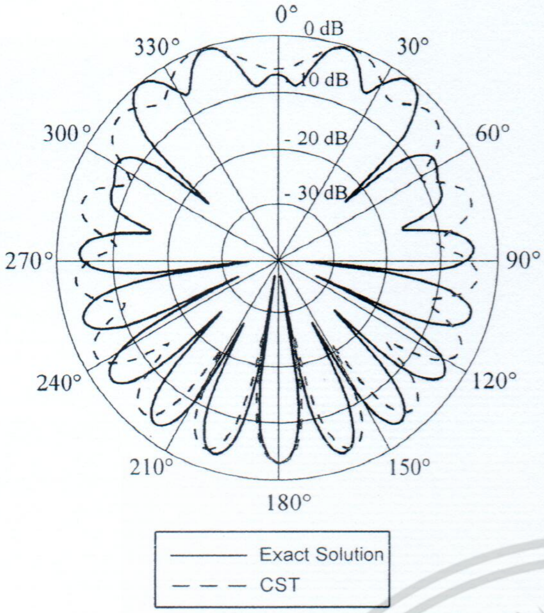


รูปที่ 3.132 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.04\lambda$)

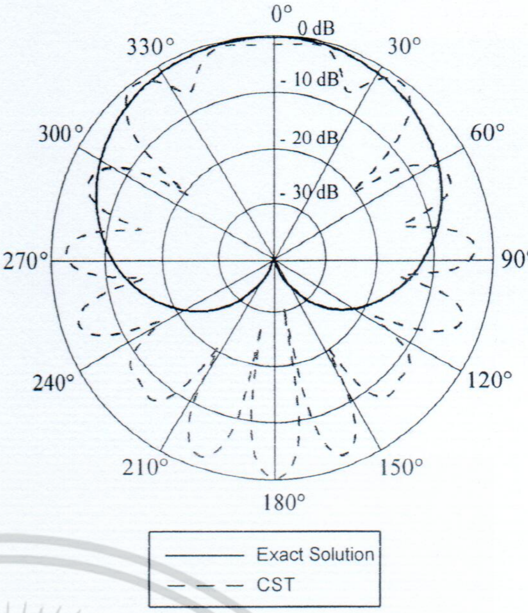


รูปที่ 3.133 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.06\lambda$)

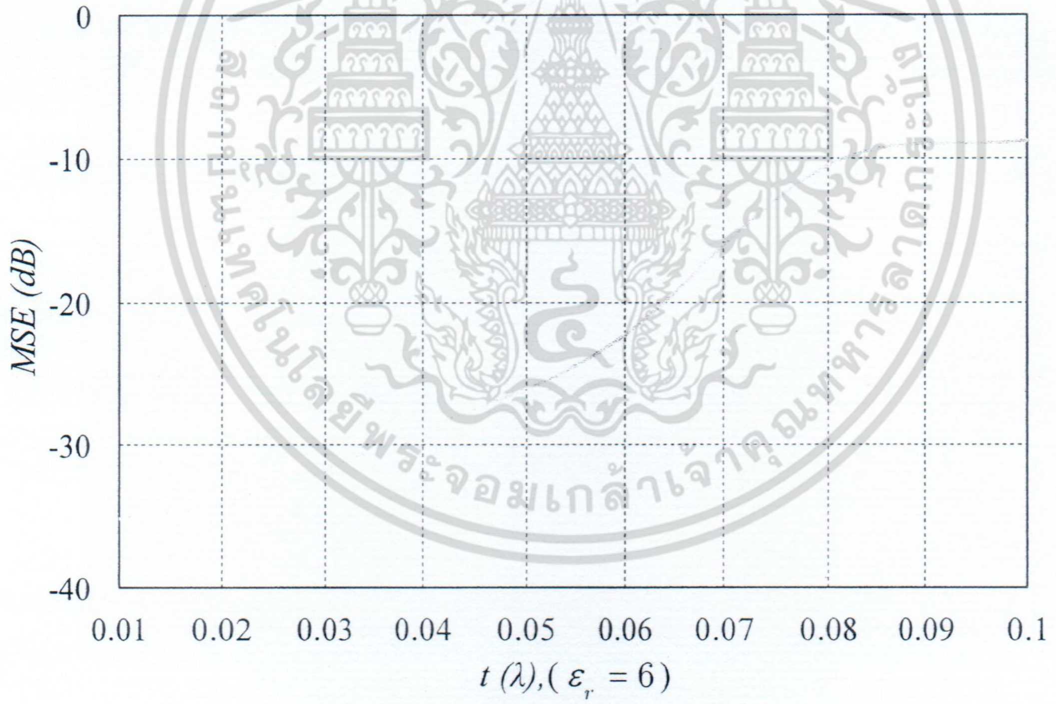
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.134 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.135 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = \lambda, t = 0.1\lambda$)



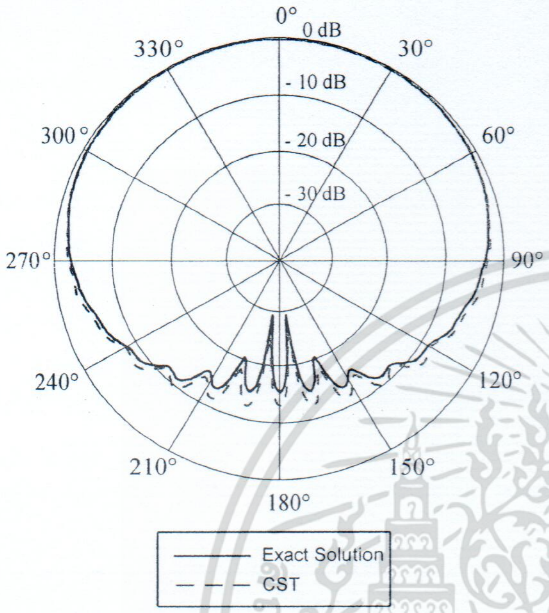
รูปที่ 3.136 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 ($a = \lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

โดยจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane จะมีผลที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความหนา 0.01 λ -0.06 λ และจากรูปที่ 3.136 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 โดยจะพบว่า ค่าความผิดพลาดจะแปรผันตรงกับความหนาของ FR-4 คือจะทำ

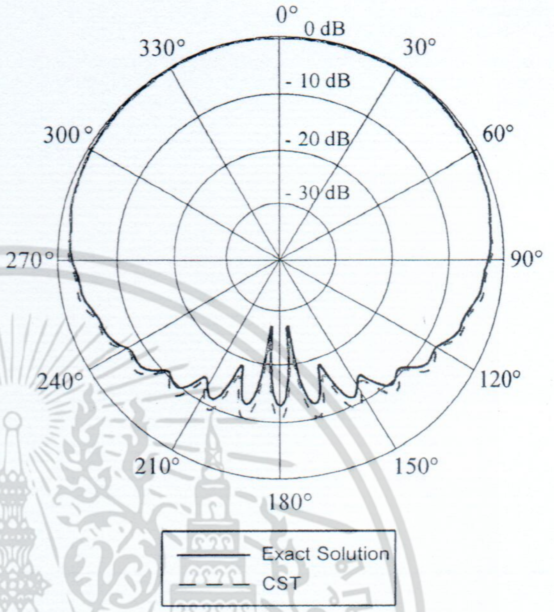
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีความผิดพลาดเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -35.15 dB ถึง -22.24 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ -0.06 λ

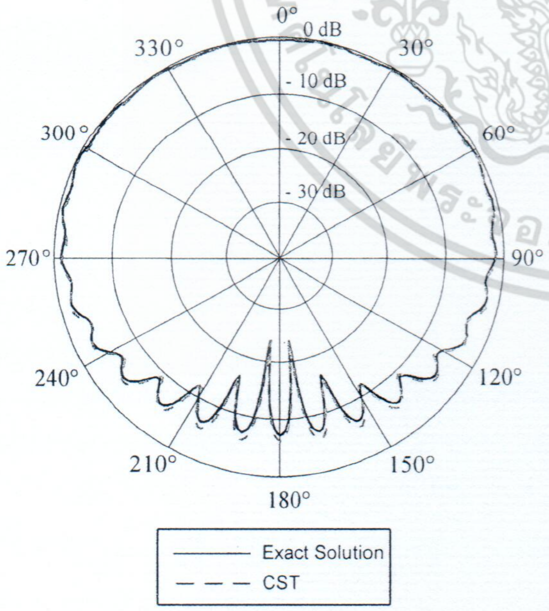
3.2.3.2 กรณีที่ 8: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)



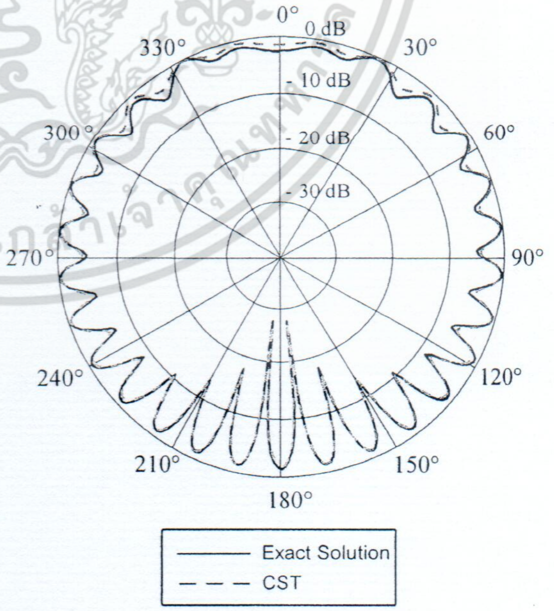
รูปที่ 3.137 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.138 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.02\lambda$)

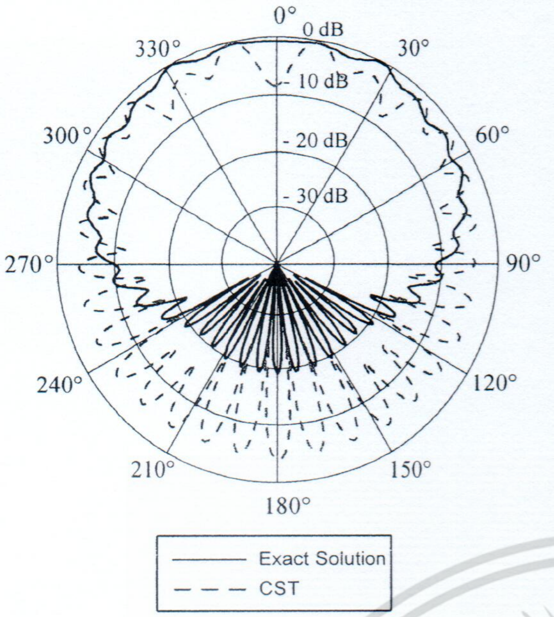


รูปที่ 3.139 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.04\lambda$)

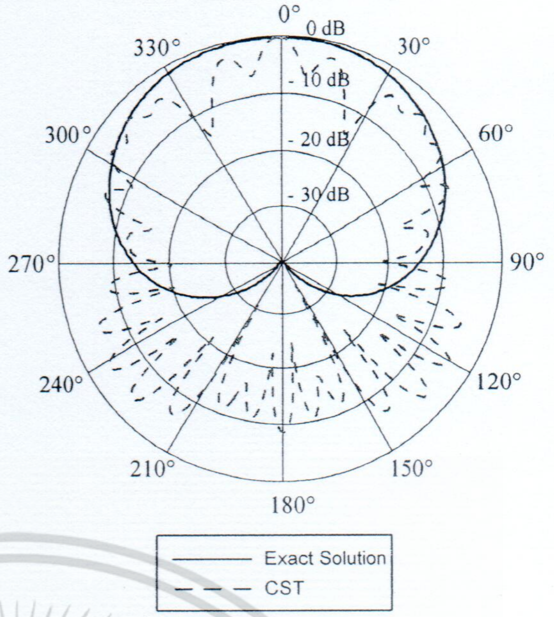


รูปที่ 3.140 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.06\lambda$)

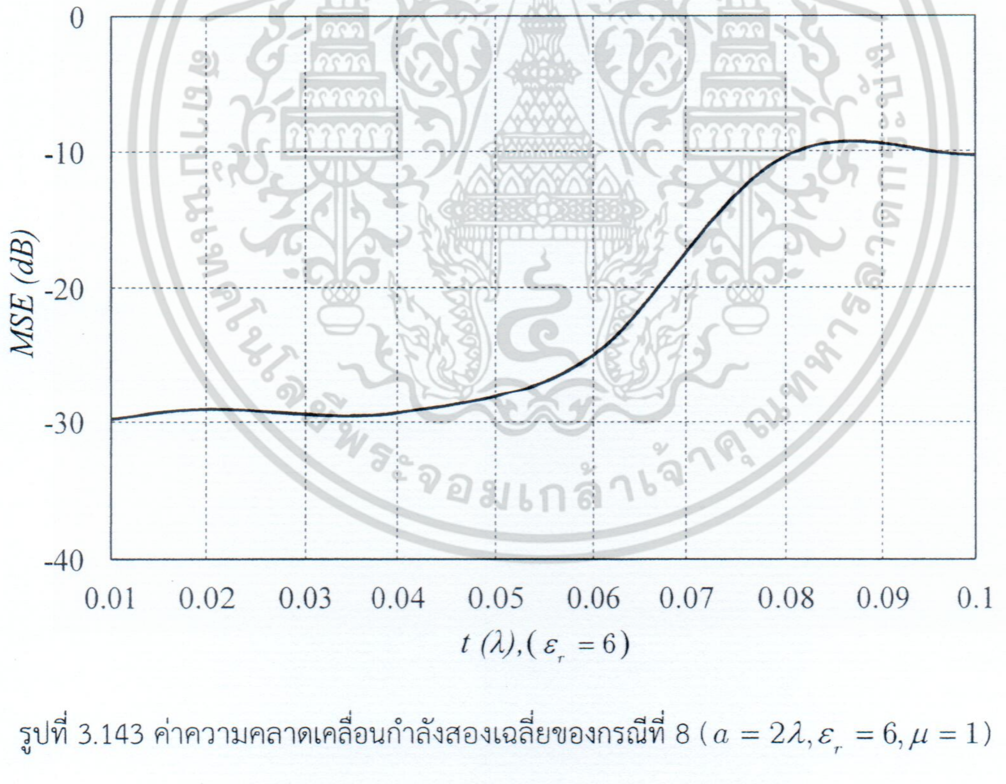
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.141 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.142 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 2\lambda, t = 0.1\lambda$)



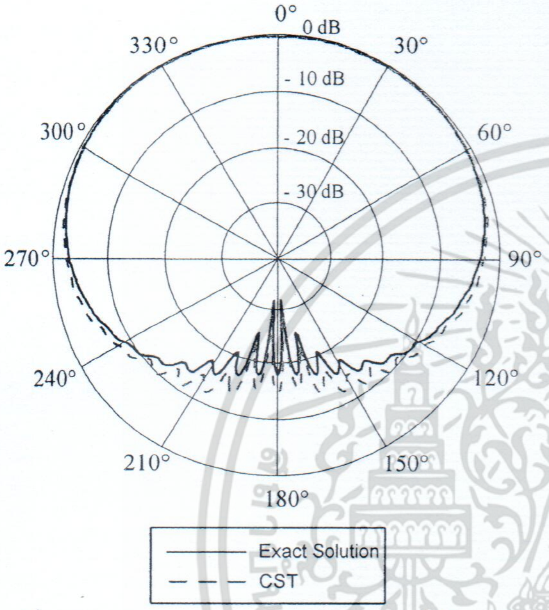
รูปที่ 3.143 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 ($a = 2\lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

รูปที่ 3.137-3.142 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 2λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio

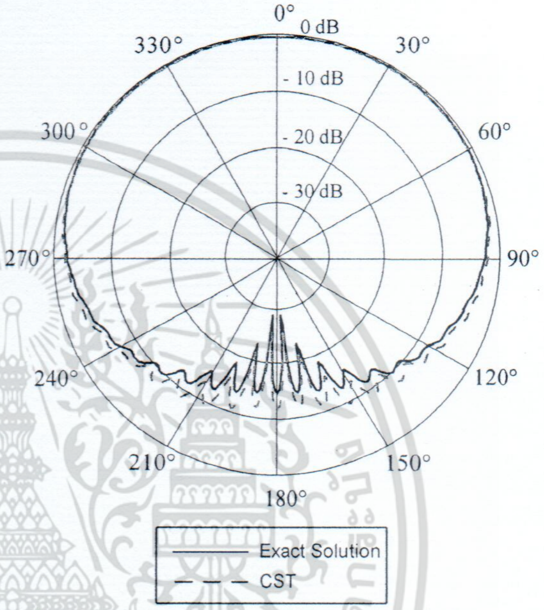
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความหนา 0.01 λ-0.06 λ โดยในรูปที่ 3.143 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 8 จะพบว่าค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -29.81 dB ถึง -24.95 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ-0.06 λ

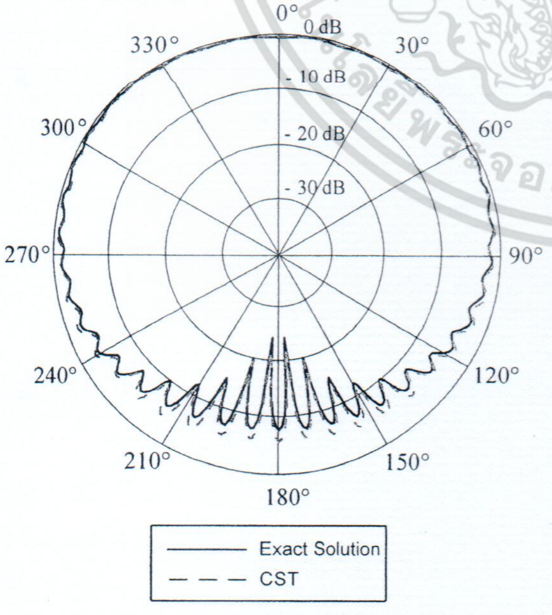
3.2.3.3 กรณีที่ 9: การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)



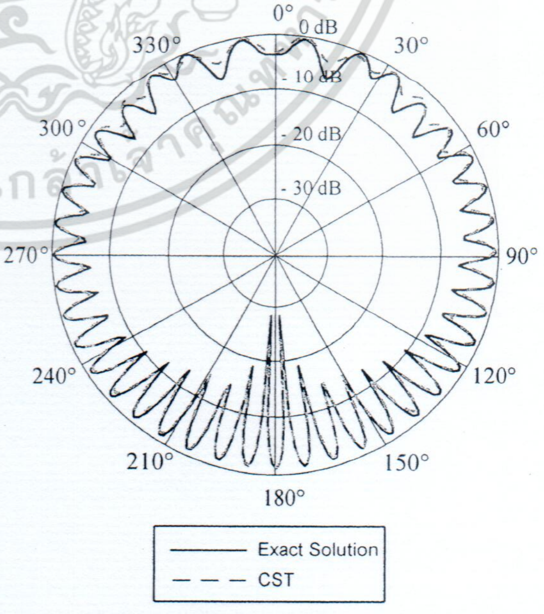
รูปที่ 3.144 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.01\lambda$)



รูปที่ 3.145 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.02\lambda$)

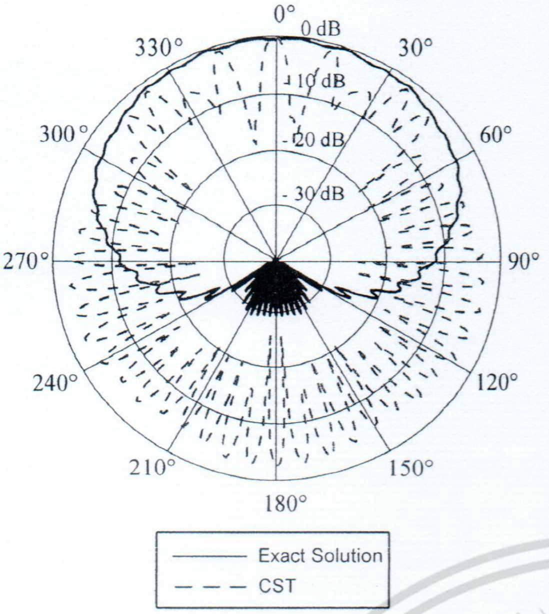


รูปที่ 3.146 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.04\lambda$)

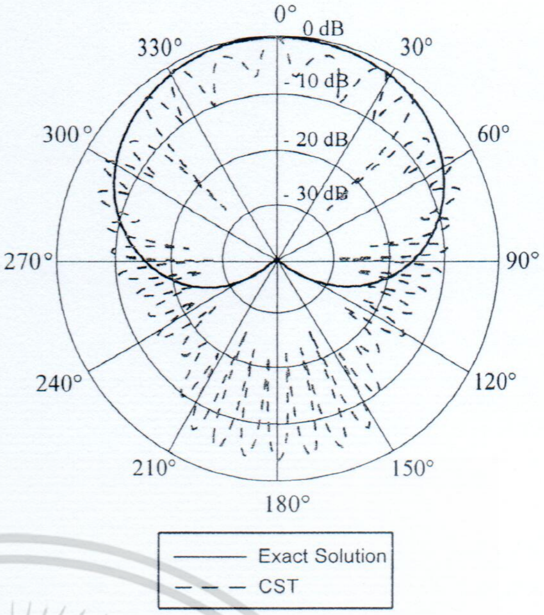


รูปที่ 3.147 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.06\lambda$)

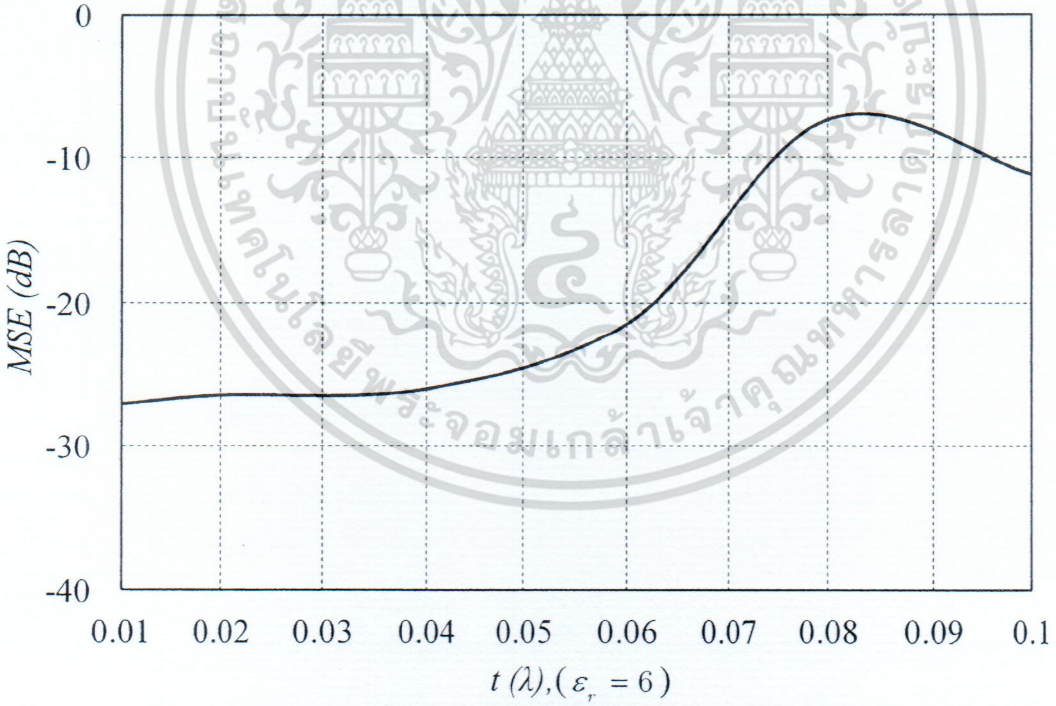
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.148 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.08\lambda$)



รูปที่ 3.149 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ($a = 3\lambda, t = 0.1\lambda$)

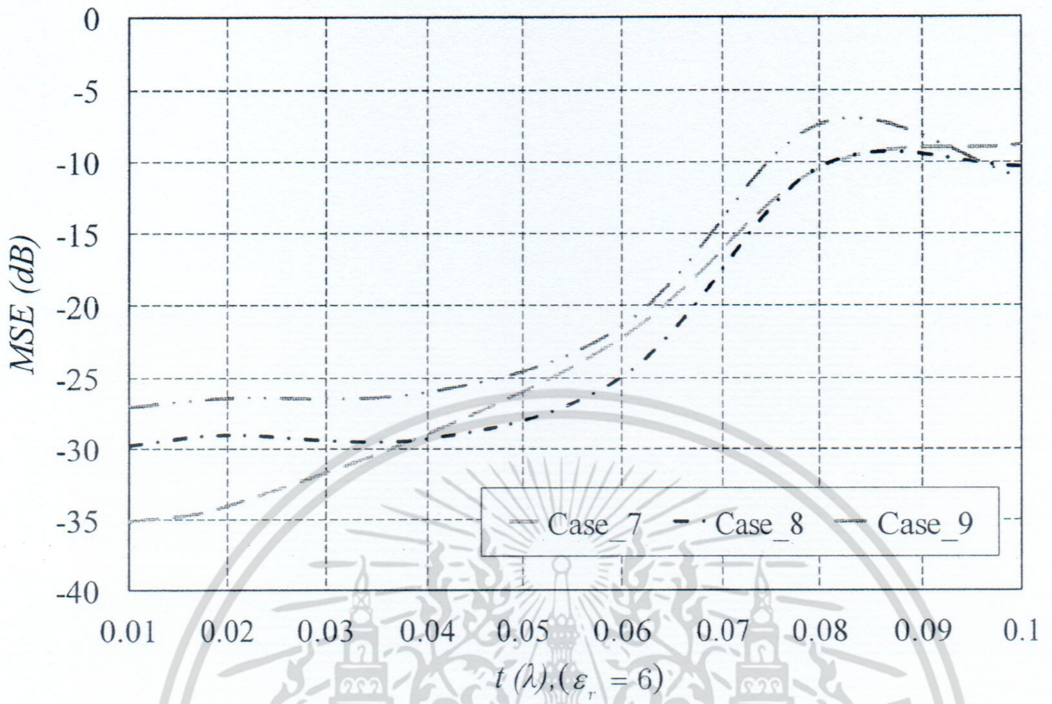


รูปที่ 3.150 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 9 ($a = 3\lambda, \varepsilon_r = 6, \mu = 1$)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy-plane ของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นบนทรงกระบอกรัศมีขนาด 3λ เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$) เมื่อความหนาของพื้นผิวไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 λ ถึง 0.1 λ ที่สามารถแสดงในรูปที่ 3.144-3.149 จากรูปที่ 3.150 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -27.08 dB ถึง -21.42 dB ด้วยความหนาระหว่าง 0.01 λ-0.06 λ มิลลิเมตร โดยในช่วงความหนาดังกล่าวของวัสดุไดอิเล็กตริก ($\varepsilon_r = 6, \mu = 1$)



รูปที่ 3.151 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกรณีที่ 7 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 8 และกรณีที่ 9

รูปที่ 3.151 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในกรณีที่กำหนดให้ทรงกระบอกมีรัศมีเท่ากับ 1 λ(กรณีที่ 7) 2 λ (กรณีที่ 8) และ 3 λ (กรณีที่ 9) ซึ่งจะถูกหุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกที่มี $\varepsilon_r = 6, \mu = 1$ ด้วยความหนา (0.01 λ-0.1 λ) จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้นผลเฉลยจากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะมีค่าที่ต่างจากกับผลการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมากขึ้น โดยจะพบว่าในกรณีที่ 7 8 และ 9 นี้ค่าความหนาที่สามารถใช้ได้โดยไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างมากคือค่าความหนาระหว่าง 0.01 λ-0.065 λ

เนื้อหาในหัวข้อที่ 3 จะเป็นการแสดงผลจากการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าบนวัสดุอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้งที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะแสดงผลโดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และทำการหาขอบเขตการทำงานจากการใช้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยกรณีศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็น 1 การศึกษาถึงค่าไดอิเล็กตริกเมื่อ 1.1 $\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$, 1.2 $\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$ และ $\varepsilon_r = 6, \mu = 1$ 2. ขนาดของทรงกระบอกตัวนำเมื่อรัศมีของทรงกระบอกมีค่า 2.1 $a = \lambda, a = 2\lambda$ และ $a = 3\lambda$ 3. ค่าความหนาของวัสดุเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถสรุปผลได้ดังตารางดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สรุปผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กและไฟฟ้าบนวัสดุอิมพีแดนซ์พื้นผิวโค้งที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio

แหล่งกำเนิดคลื่น	ชนิดของวัสดุเคลือบ	ขนาดรัศมี a	กรณีที่	ความหนา t (MSE<-20 dB)
ไฟฟ้า	$\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$	λ	1	0.01 λ -0.22 λ
		2λ	2	0.01 λ -0.20 λ
		3λ	3	0.01 λ -0.20 λ
	$\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$	λ	4	0.01 λ -0.08 λ
		2λ	5	0.01 λ -0.08 λ
		3λ	6	0.01 λ -0.08 λ
	$\varepsilon_r = 6, \mu = 1$	λ	7	0.01 λ -0.06 λ
		2λ	8	0.01 λ -0.06 λ
		3λ	9	0.01 λ -0.06 λ
แม่เหล็ก	$\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$	λ	1	0.01 λ -0.11 λ
		2λ	2	0.01 λ -0.11 λ
		3λ	3	0.01 λ -0.105 λ
	$\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$	λ	4	0.01 λ -0.08 λ
		2λ	5	0.01 λ -0.07 λ
		3λ	6	0.01 λ -0.07 λ
	$\varepsilon_r = 6, \mu = 1$	λ	7	0.01 λ -0.06 λ
		2λ	8	0.01 λ -0.06 λ
		3λ	9	0.01 λ -0.06 λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุที่นำมาเคลือบมีผลต่อขอบเขตค่าความหนาที่สามารถนำเอาวิธีการผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นไปใช้งาน โดยเมื่อค่าไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความหนาที่สามารถใช้งานได้ก็จะลดลง ดังเช่นในกรณีที่ 1 2 และ 3 เมื่อทรงกระบอกตัวนำเคลือบด้วย Teflon $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ ขอบเขตความหนาที่สามารถใช้งานได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.22 λ ในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า และจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 λ -0.11 λ ในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก

ในกรณีที่ 3 4 และ 5 เมื่อทรงกระบอกตัวนำเคลือบด้วย FR-4 $(\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1)$ ค่าขอบเขตความหนาของวัสดุเคลือบที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จะมีค่า 0.01 λ -0.08 λ ในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า และมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 0.01 λ -0.07 λ ในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก

และในกรณีที่ 7 8 และ 9 เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกที่เคลือบทรงกระบอกตัวนำถูกสมมุติให้มีค่า $\varepsilon_r = 6, \mu = 1$ ค่าขอบเขตความหนาของวัสดุเคลือบที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จะมีค่า 0.01 λ -0.06 λ ในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและทั้งในกรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก

จากตารางจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดของรัศมีของวัสดุทรงกระบอกตัวนำมีผลต่อขอบเขตการใช้งานค่าความหนาของวัสดุเคลือบน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามขนาดของทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการจำลองโดยการใช้โปรแกรม CST microwave studio เป็นอย่างมากดังแสดงในตารางที่ 3.2

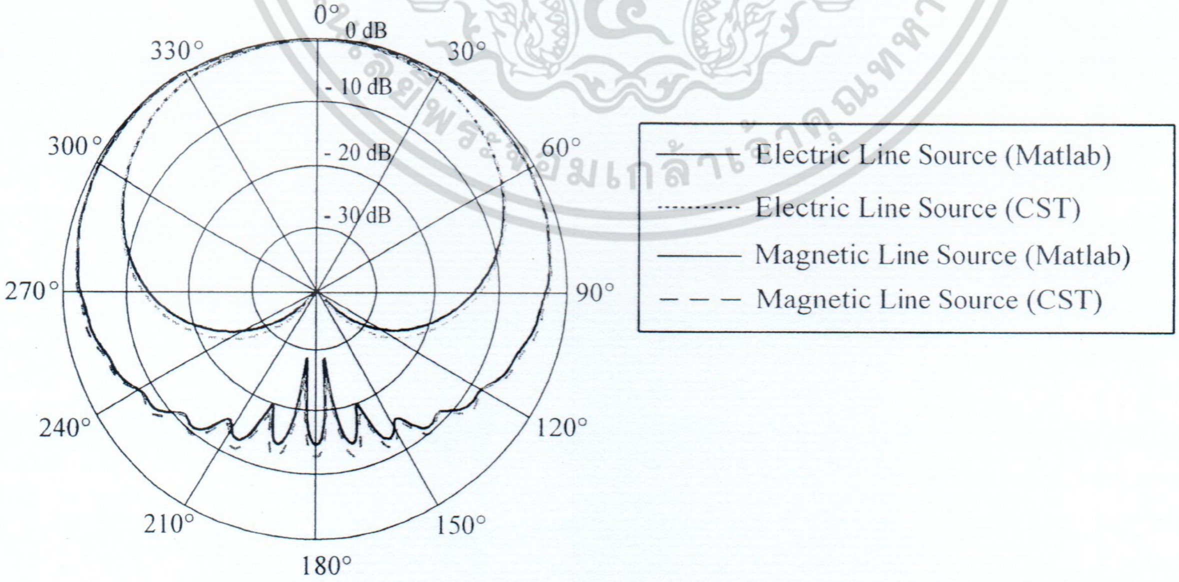
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างวิธีผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio กรณีของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก

กรณีที่	ขนาดรัศมี a	ความหนา t	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Intel(R) Core(TM) i7-2700K CPU @ 3.50 GHz, RAM 16.0 GB)	
			การจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio	วิธีการผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นโดยโปรแกรม Matlab
7	λ	0.02 λ	1.9.14	0.3.14
		0.06 λ	1.37.50	0.3.13
8	2 λ	0.02 λ	2.2.36	0.3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่	ขนาดรัศมี a	ความหนา t	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Intel(R) Core(TM) i7-2700K CPU @ 3.50 GHz, RAM 16.0 GB)	
			การจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave Studio	วิธีการผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นโดยโปรแกรม Matlab
		0.06λ	4.5.30	0.3.56
9	3λ	0.02λ	4.17.18	0.3.73
		0.06λ	8.48.56	0.3.70

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองโดยโปรแกรม CST microwave studio นั้นจะแปรผันตรงกับขนาดของทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นและใช้ระยะเวลาในการจำลองเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การเลือกใช้ผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยประมาณ 3.14 นาที และนอกจากระยะเวลาที่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วขึ้นแล้วประโยชน์ของงานวิจัยที่ได้ศึกษานี้คือ การที่พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังเมื่อนำเอาแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไปติดกับทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่ถูกลดทอนจากวัสดุดังกล่าวดีกว่าในกรณีของการนำเอากำเนิดคลื่นไฟฟ้าไปใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.152



รูปที่ 3.152 ตัวอย่างเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY-plane ของกรณีที่ 2 ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.152 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบรูปแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY-plane ของกรณีที่ 2 ของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำจะเป็นการยืนยันว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่มีการถูกลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำข้อดีของการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกไปใช้กับงานวิจัยเช่นการนำเอาสายอากาศไปติดกับวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกเช่นชั้นสีเป็นต้นและเนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุกำลังเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ อีกทั้งยังถูกนำมาใช้กับการใช้งานที่หลากหลาย โดยส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือเครื่องอ่าน, ส่วนควบคุมและแท็ก โดยส่วนงานที่เราสนใจในการทำวิจัยคือสายอากาศแท็ก ที่ถูกนำไปใช้กับถังเหล็ก หรือถังน้ำมันขนาดใหญ่ โดยโครงสร้างของสายอากาศที่สนใจคือ สายอากาศช่องเปิดเนื่องจากสายอากาศดังกล่าวสามารถที่จะสมมูลย์ให้เป็นแหล่งกำเนิดแม่เหล็กชนิดได้ [12] โดยในงานวิจัยนี้สายอากาศช่องเปิดได้ถูกนำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบสายอากาศแท็ก

4. การออกแบบสายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิดและผลการจำลอง

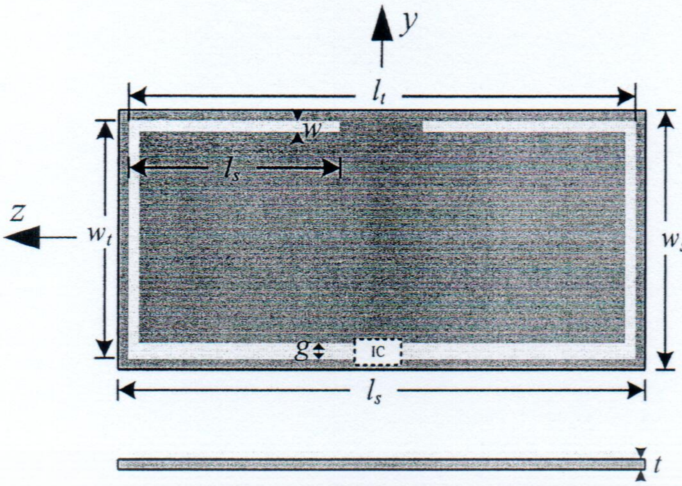
เนื่องจากงานที่ได้นำเสนอในเบื้องต้นว่าเมื่อนำแหล่งจ่ายแม่เหล็ก มาใช้กับทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยสารไดอิเล็กตริกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ดีกว่า ดังนั้นในส่วนงานที่สนใจในการออกแบบคือ สายอากาศที่มีคุณลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแม่เหล็กที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอสายอากาศขนาดเล็กช่องเปิดที่สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 โดยมีความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการศึกษาถึงโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศที่จะนำมาออกแบบ และโครงสร้างของสายอากาศที่มีความเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL โดยในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นไปทางด้านการออกแบบสายอากาศขนาดเล็ก มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถนำไปติดกับโลหะได้ โดยให้สายอากาศที่ออกแบบมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL ซึ่งจะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศแท็กไปยังชิปวงจรรวม โดยวัตถุประสงค์ในเนื้อหาของบทนี้คือการให้ได้มาซึ่งสายอากาศที่มีขนาดจำกัดภายใต้ข้อกำหนดเบื้องต้นแต่ยังสามารถมีสมรรถนะในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิด

เพื่อที่จะให้สายอากาศสามารถส่งต่อพลังงานไปยังชิปวงจรรวมให้ได้สูงที่สุดนั้น สายอากาศแท็กควรที่จะแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวมที่จะนำมาออกแบบ ดังนั้นจากการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในข้างต้นทำให้เราทราบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กพิจารณาที่ค่าความถี่ 922.5 MHz ควรมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 15.87+j148.7 โอห์ม การออกแบบสายอากาศแท็กในเบื้องต้นนั้น สายอากาศช่องเปิดจะถูกนำมาพิจารณาเป็นส่วนแรก ขนาดของสายอากาศจะถูกกำหนดให้มีขนาดความยาวเท่ากับ 0.32 λ_d หรือ 50 มิลลิเมตร และมีความกว้างเท่ากับ 0.064 λ_d หรือ 10 มิลลิเมตร เมื่อ λ_d คือค่าความยาวคลื่นในวัสดุ โครงสร้างที่ถูกกำหนดค่าในเบื้องต้นอีกส่วนหนึ่งนั้นคือโครงสร้างในส่วนที่เป็นฐานรองของชิปวงจรรวมโดยพารามิเตอร์ของโครงสร้างดังกล่าวคือความกว้างของช่องเปิด g โดยมีขนาดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร โดยสายอากาศจะถูกจำลองและสร้างบนวัสดุชนิด FR-4 ชนิดบางที่มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร (ε_r = 4.3, $\tan\delta$ = 0.025) โดยโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบของสายอากาศนั้นจะแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สายอากาศแท็กขนาดเล็กช่องเปิด

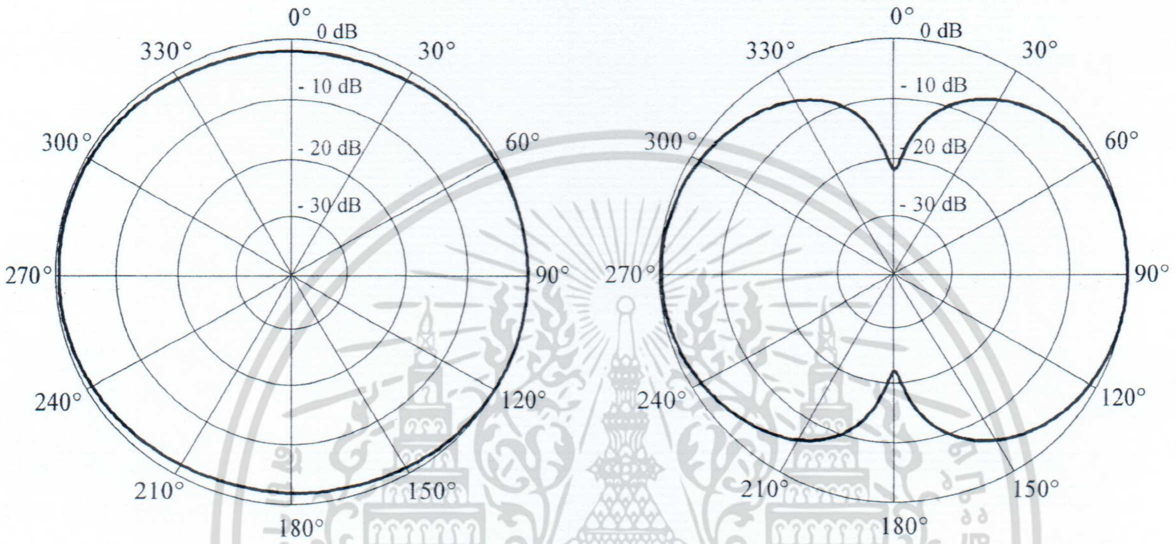
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_d)
g	1.5	0.0095
l_b	19.9	0.127
l_s	50.0	0.32
l_t	48.0	0.31
w	1.0	0.0064
w_s	24.5	0.156
w_t	22.5	0.143
t_k	1.5	0.0095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลอง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงผลการจำลองของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กรูปบ่วงคู่โดยการจำลองด้วยโปรแกรม CST @ Microwave Studio โดยในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้นำเสนอเช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และอัตราขยายของสายอากาศ

4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก



(ก) (H_θ) ในระนาบ XY (XY-plane) (ข) (H_θ) ในระนาบ XZ (XZ-plane)

รูปที่ 4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก

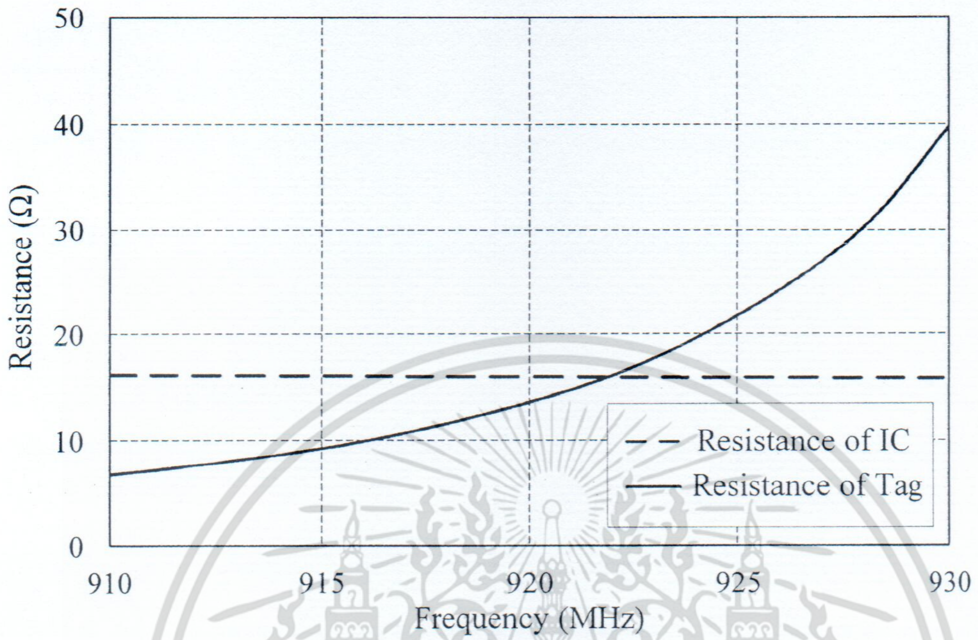
ในรูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบสนามแม่เหล็ก (H_θ) ในระนาบ XY (XY-plane) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบสนามแม่เหล็ก (H_θ) ในระนาบ XZ (XZ-plane) พบว่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth) จะมีค่าเท่ากับ 89 องศา

4.2.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก

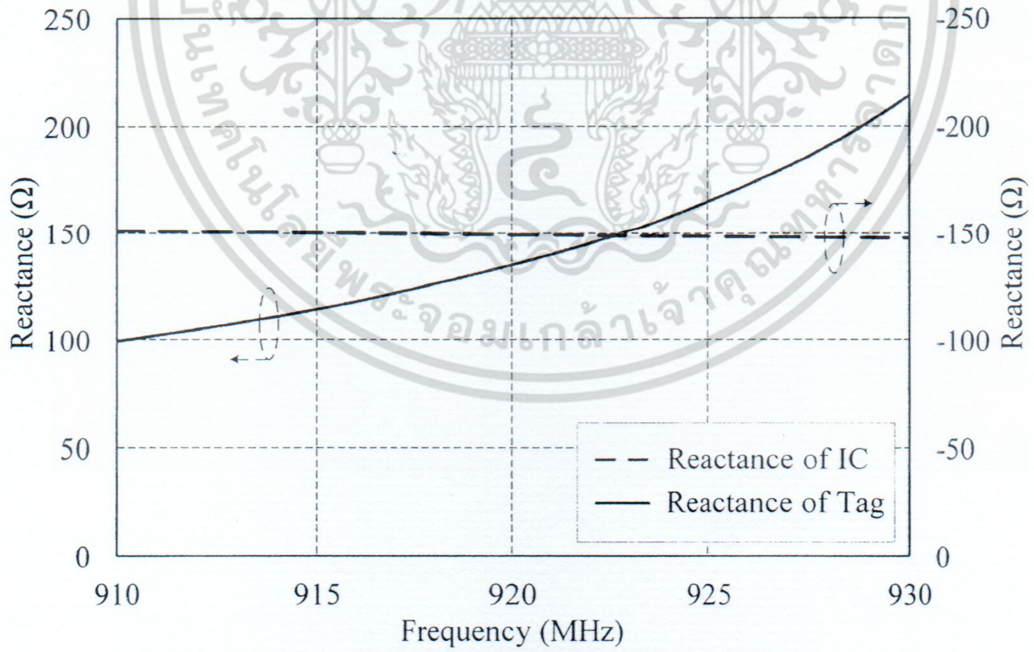
ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปจะพบว่าสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอยู่ระหว่าง 13.5 โอห์ม ถึง 21.9 โอห์ม ในย่านความถี่ระหว่าง 920-925 MHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 15.8-16 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นในรูปที่ 4.3 ยังแสดงผลของค่ารีแอ็กแตนซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 134.75-165.47 โอห์ม เมื่อพิจารณาที่กลางความถี่ที่ใช้งานที่ 922.5 MHz สายอากาศจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 17.01+j148.53 โอห์ม



(ก) ความต้านทาน

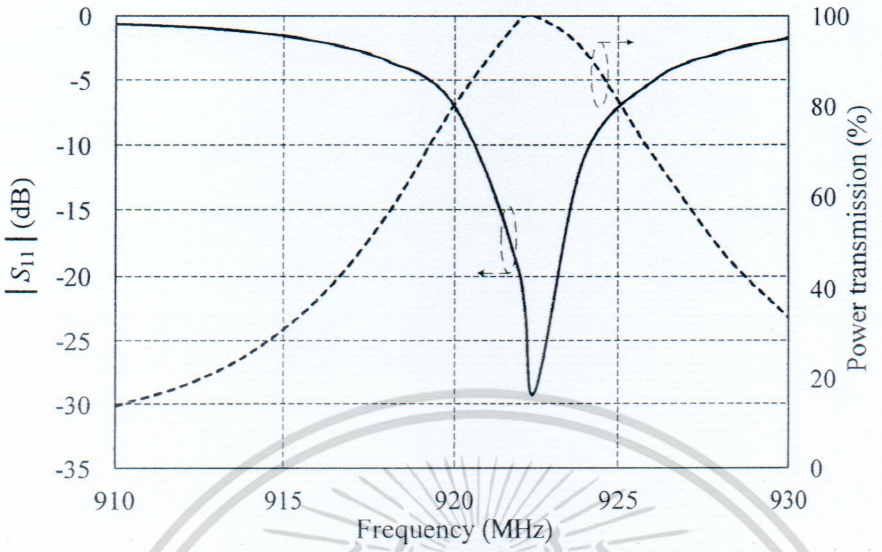


(ข) รีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

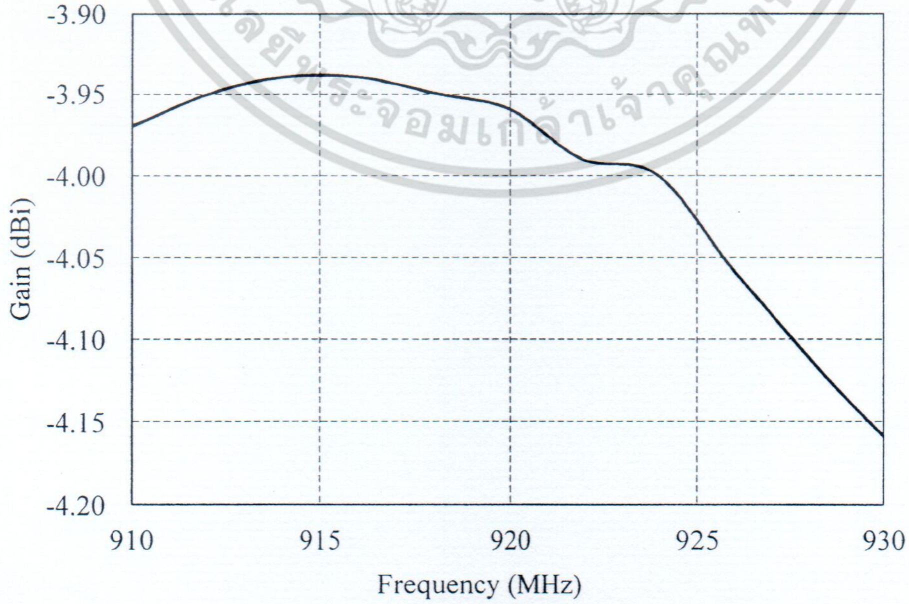
4.2.3 ค่า $|S_{11}|$(dB) และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก



รูปที่ 4.4 ค่า$|S_{11}|$และค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก

ในรูปที่ 4.3 แสดงค่า$|S_{11}|$ของสายอากาศแท็กขนาดเล็กรูปบ่วงคู่โดยพิจารณาที่ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -3 dB โดยจะพบว่าสามารถครอบคลุมย่านความถี่ 917-926 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่เป็นไปตามมาตรฐานภายในประเทศไทยคือ 920-925 MHz และเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ใช้งาน ณ 922.5 MHz ค่า$|S_{11}|$ของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ -29.14 dB โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่าน 99.87%

4.2.4 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ



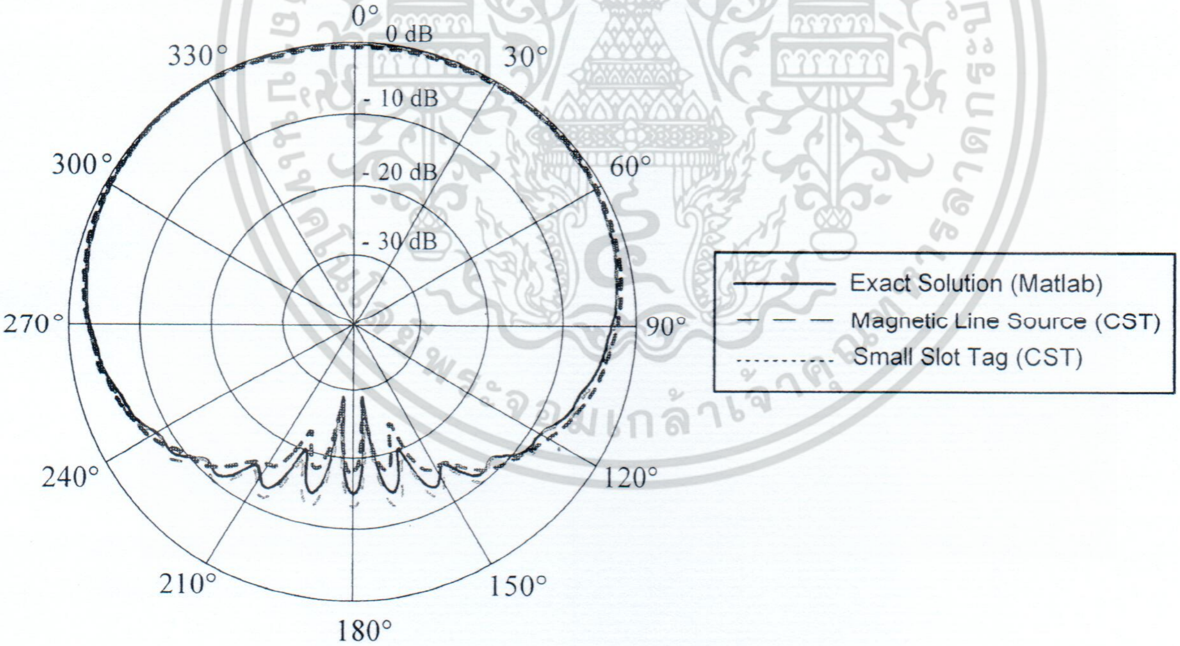
รูปที่ 4.5 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.5 แสดงค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยอัตราขยายของสายอากาศระหว่างย่านความถี่ 920-925 MHz โดยอัตราขยายของสายอากาศจะลดต่ำลง โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -3.9 ถึง-4.2 dBi เมื่อพิจารณาในช่วงความถี่ที่เป็นไปตามมาตรฐานภายในประเทศซึ่งมีย่านความถี่ 920-925 MHz สายอากาศจะมีค่าอัตราขยายเฉลี่ยเท่ากับ -4 dBi และเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ใช้งานสายอากาศจะมีอัตราขยายเท่ากับ -4 dBi

4.3 สายอากาศแท็กบนวัสดุทรงกระบอก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กที่ได้ทำการออกแบบร่วมกับทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ รัศมี 1λ ที่เคลือบด้วย Teflon $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ หนา 0.02 λ ด้วยโปรแกรม CST microwave studio และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นและผลที่ได้จากการจำลองแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กยาวอนันต์ที่วางอยู่บนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดรัศมี 1λ ที่เคลือบด้วย Teflon $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ หนา 0.02 λ เพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กที่ออกแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทางด้านหลังที่ไม่ถูกลดทอนจากการนำไปติดบนวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่หุ้มด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในระนาบ xy-plane ของทั้งสามกรณี



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบสนามแม่เหล็ก (H_θ)
ในระนาบ XY (XY-plane)

จากการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST microwave studio จากกรณีที่มีแหล่งกำเนิดแม่เหล็กชนิดเส้นวางอยู่บน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทรงกระบอกตัวนำที่หุ้มด้วย Teflon $(\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1)$ เปรียบเทียบกับกรณีที่นำเอาแท็กช่องเปิดขนาดเล็กมาติดกับวัสดุดังกล่าว จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่ออกแบบไม่เกิดการลดทอนที่ด้านหลังมากนัก ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำเอาแท็กดังกล่าวไปใช้กับวัสดุตัวนำที่เคลือบด้วยชั้นวัสดุไดอิเล็กตริกเช่น ถังแก็สหรือถังน้ำมันเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล

งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์การแพร่กระจายทางแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กชนิดเส้นที่วางอยู่บนพื้นผิวอิมพีแดนซ์จากการใช้วิธีการคำนวณผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นโดยผ่านโปรแกรม Matlab และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave studio โดยกรณีการศึกษาจะแบ่งออกเป็นการศึกษาทั้งแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรงกระบอกตัวนำที่ถูกเคลือบด้วยวัสดุไดอิเล็กตริกโดยขนาดที่ทำการศึกษาคือทรงกระบอกตัวนำที่มีรัศมี λ, 2λ และ 3λ นอกจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังได้ถูกนำมาพิจารณาโดยแบ่งออกเป็นอีกสามกรณีศึกษาคือ กรณีที่เป็น Teflon ($\varepsilon_r = 2.1, \mu = 1$) กรณีที่เป็น FR-4 ($\varepsilon_r = 4.3, \mu = 1$) และกรณีที่วัสดุมีค่า $\varepsilon_r = 6.0, \mu = 1$ และความหนาของวัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาเคลือบได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้เป็นขอบเขตในการใช้งานของผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave studio โดยผ่านค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย(ต่ำกว่า-20 dB) โดยจะพบว่าเมื่อความหนาของวัสดุเคลือบเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นกับผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม CST Microwave studio จะเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้นและขนาดที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลกระทบที่น้อยมากกับค่าขอบเขตความหนาที่สามารถนำมาใช้งานได้ของวัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาเคลือบ แต่อย่างไรก็ตามทั้งค่าความหนาที่เพิ่มขึ้นและขนาดของทรงกระบอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาในการจำลองจากการใช้โปรแกรม CST Microwave studio ซึ่งในบางกรณีจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่มากกว่า 8 ชั่วโมง ในขณะที่การคำนวณจากการผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นโดยผ่านโปรแกรม Matlab จะใช้ระยะเวลาในการคำนวณเฉลี่ยประมาณ 3 นาที ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยใช้ผลเฉลยไอเกนฟังค์ชันของคลื่นที่ได้นำเสนอสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณได้เป็นอย่างมาก

นอกจากนั้นจากการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแบบรูปแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY-plane ของกรณี แหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าและแม่เหล็กที่วางอยู่บนทรงกระบอกตัวนำจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่มีการถูกลดทอนน้อยกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นไฟฟ้าดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก มีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับการนำไปติดตั้งกับวัสดุทรงกระบอกตัวนำมากกว่าแหล่งกำเนิดคลื่นชนิดไฟฟ้า

และเนื่องจากการศึกษาและวิเคราะห์ในข้างต้นและความน่าสนใจของเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในปัจจุบันทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอการออกแบบสายอากาศที่มีลักษณะเสมือนแหล่งจ่ายคลื่นชนิดแม่เหล็ก เพื่อมีวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้กับวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริกเช่นชั้นสี โดยสายอากาศที่นำเสนอคือสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ 920-925 MHz โดยสายอากาศที่ออกแบบมีขนาด 2.45x5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเซนติเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio มีค่าเท่ากับ 17.01+j148.53 Ω ณ ค่าความถี่กลางที่ 922.5 MHz โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 99.87% มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง มีอัตราขยายเท่ากับ -4 dBi และจากการจำลองสายอากาศแท็กช่องเปิดขนาดเล็กเมื่อนำไปติดกับวัสดุทรงกระบอกตัวนำขนาดรัศมี 2 λ ที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริกหนา 0.02 λ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กที่ได้นำเสนอมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับวัสดุทรงกระบอกที่เคลือบด้วยชั้นไดอิเล็กตริก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

[1] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, RFID Systems: Research Trends and Challenges, John Wiley& Sons, 2010.

[2] G. Marrocco, "**The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques,**" IEEE Antennas Propagation Magazine., vol. 50, no. 1, pp. 66-79, 2008.

[3] S. Preradovic, Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications, InTech, 2011.

[4] C.A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics (Second edition), John Wiley& Sons, 2012.

[5] T.B.A. Senior, J.L. Volakis, "**Generalized impedance boundary conditions in scattering,**" **Proceedings of the IEEE**, vol. 79, issue 10, pp. 1413-1420, 1991.

[6] Z. N. Chen, **RFID tag antenna, antennas for portable devices**, England, John Wiley & Sons, 2007.

[7] G. Marrocco, "**Multiport sensor RFIDs for wireless passive sensing of objects-basic theory and early results**" IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 8, pp. 2691 – 2702, Aug 2008.

[8] Available http://www.ti.com

[9] Available www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/wifch6.html

[10] D. M. Dobkin, **The RF in RFID passive UHF in practice**, United States of America, Newnes, 2008

[11] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency smart label ICs [online] Available www.nxp.com/acrobat_download/ literature/9397/75016225.pdf

[12] Y. Huang, K. Boyle, **Antennas from Theory to Practice**, John Wiley & Sons, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

เพศ ☑ ชาย ☐ หญิง วันเดือนปีเกิด 11 กันยายน 2517 อายุ 38 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2544
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2541
วศ.บ.(เกียรตินิยมอันดับสอง)	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2539

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ชื่อผลงาน	**ชื่อรางวัลและหน่วยงานที่มอบ**	**ปี**
Synthesis of the Antenna Array Pattern Accomplishing the Tapered Minor Lobe Distributions	Outstanding Contribution Paper in the 5th International Symposium on Antennas, Propagation and Electromagnetic Theory	2543
Theory and Experiment of a Circularly Polarized Conical Beam Spherical Slot Array Antenna	Honorable Mention in the Student Paper Competition in the 2001 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting	2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2551-ปัจจุบัน	Propagation Modeling in Durian Orchard for Wireless Sensor Network	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย
2551-2552	Performance Enhancement of RFID Antennas for Animal Identification	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
2550	Antenna for Wireless Sensor Network at 433 MHz	
2549-2550	Design of RF-ID Antennas for Animal Identification	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
2547-2549	Research and Development in 3rd Generation Mobile Telecommunication Systems	
2546-2547	A High Gain Antenna using Circular Ring above the Reflector for Wireless LAN System	
2545-2546	Development of Dielectric Property Measurement for Export Quality Control	
2540-2542	Steerable Spherical Slot Array Antenna	

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Design of a Novel Dual-Loop Gate Antenna for Radio Frequency Identification (RFID) Systems at Low Frequency Band	S. Kawdungta C. Phongcharoenpanich D. Torrungrueng	Progress in Electromagnetics Research C	2553
A Two-Slot Array Antenna on a Concentric	P.Wounchoum	Progress in	2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Coupling Slot	D.Worasawate C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	Electromagnetics Research	
Bidirectional Ultra-Wideband Antenna Using Rectangular Ring Fed By Stepped Monopole	S.Lamultree C.Phongcharoenpanich	Progress in Electromagnetics Research	2551
Dual-Band Microstrip-to-Coplanar Strip Balun Transition and Loop Antenna Application	K.Meelarpkit M.Chongcheawchamnan C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh L.B.Lok I.D.Robertson	IET Microwaves, Antennas & Propagation	2551
A Multibeam Antenna using Quasi-Optical Antenna-Mixers	S Janin K.Sripimanwat C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	AEU-International Journal of Electronics and Communications	2551
Characteristics of An Elliptical Ring Antenna Excited by A Linear Electric Probe	K.Chawanonphithak C.Phongcharoenpanich S.Kosulvit M.Krairiksh	International Journal of Electronics	2550
Probe-Fed Rectangular Ring Antenna with a Cross Strip for Low Cross Polarization	D.Srimoon C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	IEEE Trans. Antennas Propagat	2549
A Probe-Fed U-Shaped Cross-Sectional Antenna with Tuning Stubs on a U-Shaped	D.Srimoon C.Phongcharoenpanich	IEICE Trans. Communications	2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Ground Plane	M.Krairiksh		
Signal-to-Interference Ratio Improvement by Using a Phased Array Antenna of Switched-Beam Elements	P.Ngamjanyaporn C.Phongcharoenpanich P.Akkaraekthalin M.Krairiksh	IEEE Trans. Antennas Propagat	2548
Impedance Characteristic Analysis of an Axial Slot Antenna on a Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Probe using Method of Moments	R.Wongsan C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh J.Takada	IEICE Trans. Fundamentals	2546
Covariance Matrix Adjustment for Interference Cancellation Improvement in Adaptive Beamforming	T.Sukontapong P.Ngamjanyaporn C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communicationss	2546
A Spherical Array Self-Mixing Oscillator Antenna	M.Krairiksh W.Buasomboon P.Ngamjanyaporn C.Phongcharoenpanich	Electronics Letters	2545
A Simple and Cost-Effective Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Circular Ring	S.Kosulvit M.Krairiksh C.Phongcharoenpanich T.Wakabayashi	IEICE Trans. Electronics	2545
A Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Rectangular Ring	S.Kosulvit C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	Science Asia	2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
Theoretical Investigations of Radiation and Impedance Characteristics of a Probe Excited Rectangular Cavity-Backed Slot Antenna	T.Lertwiriyaprapa C.Phongcharoenpanich M.Krairiksh	International Journal of Science and Technology	2543

การเสนอผลงานวิชาการ

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

....

....

....

อื่นๆ

....

....

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

เพศ ☐ ชาย ☑ หญิง วันเดือนปีเกิด 23 เมษายน 2528 อายุ 27 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	**2552**
วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับสอง)	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	**2550**

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ....

....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2554	ทุน คปก. รุ่นที่ 14	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ชื่อโครงการ	ปี
RFID Sensor for Quality Determination of Some Agricultural Products	2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

บทความวิชาการระดับนานาชาติ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
1	Design of a UHF RFID Tag Antenna Using Tapered-Meander-Line Antenna Structure	Pitchanun.Wongsiritorn and Chuwong Phongcharoenpanich	Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics vol 17	2552

การเสนอผลงานวิชาการ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
1	Meander-Line UHF RFID Tag Antenna with Semi-Circular Structure	Pitchanun. Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich, Danai. and Monai.Krairiksh	Proceedings of The 2009 International Symposium On Antennas and Propagation	2552
2	UHF RFID Tag Antenna Design Using Meander-Line with Semi-Circular Structure	Pitchanun. Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich, Danai. Torrungrueng and Monai.Krairiksh	Proceedings of Thailand - Japan MicroWave	2552
3	UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines	Pitchanun. Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich, Danai.	Proceedings of Electrical Engineering/Electronics,	2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
		Torrungrueng and Monai.Krairiksh	Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference	
4	A Tapered-Meander-Line Antenna for UHF RFID Tag	Pitchanun. Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich,	Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics	2551
5	Parasitic Array of Circular Plate for UWB Applications	Pitchanun. Wongsiritorn, Chuwong Phongcharoenpanich and Sompol. Kosulvit	Proceedings of Joint International Conference on Information and Communication Technology (JICT 2007)	2550

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

....

....

....

อื่นๆ

....

....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นางสาวกิตติมา เลิศศักดิ์วิมาน

เพศ ☐ชาย ☑ หญิง วันเดือนปีเกิด 29 สิงหาคม 2530 อายุ 25 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	**2554**
วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับสอง)	วิศวกรรมไฟฟ้า	มหาวิทยาลัยบูรพา	**2551**

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2554	ทุน คปก. รุ่นที่ 12	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ชื่อโครงการ	ปี
RFID Sensor for Quality Determination of Some Agricultural Products	2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

บทความวิชาการระดับนานาชาติ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี

การเสนอผลงานวิชาการ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
1	Characteristic of a simple UHF RFID tag antenna with T Structure	Kittima Lertsakwimarn Krison Aunchaleevarapan Chuwong Phongcharoenpanich	The 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2010)	2553
2	A Miniatured UHF RFID Tag Antenna with Double Loop Structure	Kittima Lertsakwimarn Krison Aunchaleevarapan Chuwong Phongcharoenpanich	International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2010	2553
3	UHF RFID Tag Antenna using T]Structure with Two Parasitic Lines for Weapons Management System	Kittima Lertsakwimarn Krison Aunchaleevarapan Chuwong Phongcharoenpanich	Proceeding of 2009 IEEE International Conferencr on Antennes, Propagation and System (JICT 2010)	2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

....

....

....

อื่นๆ

....

....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน

เพศ ☑ชาย ☐หญิง วันเดือนปีเกิด 6 กันยายน 2530 อายุ 28 ปี

สถานภาพ ☑ โสด ☐ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	**2554**
วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับสอง)	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	**2550**

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ....

....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2554	ทุน คปก. รุ่นที่ 12	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ชื่อโครงการ	ปี
RFID Sensor for Quality Determination of Some Agricultural Products	2552

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

บทความวิชาการระดับนานาชาติ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี

การเสนอผลงานวิชาการ

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
1	Dual-Band Microstrip Bandpass Filter	Nattaset Mhudtongon Kittisak Phaebua Chuwong Phongcharoenpanich	2009 IEEE International Conference on Antennas, Propagation and Systems (INAS 2009)	2552
2	Dual-band Microstrip Filter with Modified E-shape Resonator	Nattaset Mhudtongon Kittisak Phaebua Chuwong Phongcharoenpanich	International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2010	2553
3	Dual-band Microstrip Filter with Modified E-shape Resonator	Nattaset Mhudtongon Kittisak Phaebua Chuwong Phongcharoenpanich	The 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and	2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ชื่อบทความ	ผู้แต่ง	เผยแพร่ใน	ปี
			Communications (ITC-CSCC 2010)	
4	Dual-Band Microstrip Bandpass Filter	Nattaset Mhudtongon Kittisak Phaebua Chuwong Phongcharoenpanich	2009 IEEE International Conference on Antennas, Propagation and Systems (INAS 2009)	2552

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

....

....

....

อื่นๆ

....

....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้