

การออกแบบราโดมแบนด์กว้างสำหรับสายอากาศอาร์เรย์สำหรับการแพร่ภาพโทรทัศน์ระบบดิจิทัล

Design of Wideband Radome for Antenna Array for Digital TV Broadcasting

สิทธิชัย เต็นตรี^{1*} และบัญชา เหลือแดง²

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

² ภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถนน พุทธมณฑล สาย 5 ตำบล ศาลายา อำเภอ พุทธมณฑล จังหวัด นครปฐม 73170

Sitthichai Dentri^{1*} and Bancha Luadang²

¹ Department of Electronics Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

² Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

96 Moo 3 Thanon Phutthamonthon Sai 5 Salaya Phutthamonthon Nakhon Pathom 73170

* ผู้รับผิดชอบบทความ: sitthichai.d@kmutnb.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 6330

บทคัดย่อ

การพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อออกแบบราโดม (Radome) ของการประยุกต์ใช้งานแบนด์กว้าง (Wideband) ของสายอากาศอาร์เรย์โทรทัศน์ระบบดิจิทัล (Digital TV Antenna) ที่ใช้สำหรับการส่งออกอากาศ วัสดุที่ออกแบบด้วยรูปทรงเรขาคณิตได้รับการเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้สมรรถนะการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม แนวทางการออกแบบราโดมสำหรับสายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลแบนด์กว้างสำหรับการออกอากาศสัญญาณเสนอ โดยมีกำลังการแพร่กระจายมากกว่า 90% ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz และสายอากาศมีอัตราขยายเมื่อมีราโดมเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi โดยข้อมูลที่น่าเสนอมีความสำคัญสำหรับสายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่จะมีการพัฒนาในอนาคต

คำสำคัญ ราโดม สายอากาศโทรทัศน์ระบบดิจิทัล การส่งออกอากาศ

Abstract

Considerations of electromagnetic properties for radome design of wideband applications of digital TV antenna array for broadcasting. Geometrically-designed materials are appropriately chosen for optimal wave propagation performance. The radome design guidelines for wideband digital television broadcasting was presented. Radiated power is spread over 90% throughout the frequency range 510 to 790 MHz and the antenna gain when the radome is equal to 8.741 to 11.65 dBi. The information presented is important for digital television antennas to be developed in the future.

Keywords: Radome, DTV antenna, broadcasting

1. บทนำ

ราโดมออกแบบเพื่อปกป้องระบบการสื่อสารภายนอกอาคารทั้งการติดตั้งภาคพื้นดินและบนพาหนะเคลื่อนที่ตลอดจนการติดตั้งร่วมกับสายอากาศเรดาร์บนอากาศยานซึ่งต้องเป็นโครงสร้างที่ทนทานต่อสภาวะอากาศ [1] คุณสมบัติพื้นฐานของราโดมคือการสร้างฝาครอบป้องกัน

ระหว่างสายอากาศและสิ่งแวดล้อมโดยที่มีผลกระทบต่อที่สุดต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมนั้นแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่มีผลต่อราโดม โดยที่ราโดมจะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอยู่กับการจับคู่ระหว่างคุณลักษณะของสายอากาศและส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้กับช่วงความถี่วิทยุ [2]

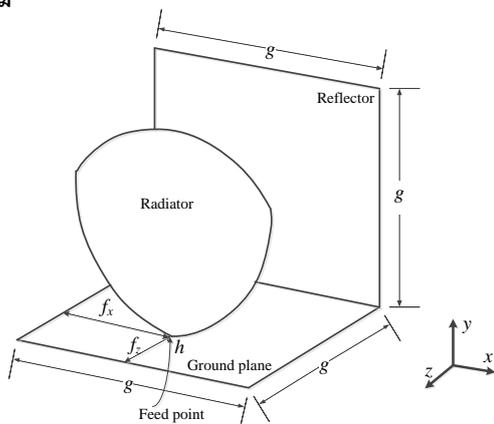


โดยที่ราโดมสามารถแบ่งหลายประเภทคือ ราโดมชั้นเดียวหรือราโดมที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.1 ของความยาวคลื่น ราโดมครึ่งความยาวคลื่น ราโดม A แชนวิช ราโดม B แชนวิช ราโดม C แชนวิช และราโดมอื่น ๆ [3] วัสดุที่ใช้ทำราโดมจะมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความหนาของราโดมมีผลกระทบต่อตรงจากการดูดซึมและการสะท้อนของการแพร่กระจายคลื่นที่ตัวสายอากาศ ปัจจัยเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายประเภทของวัสดุที่ใช้ทำราโดม ยกตัวอย่างเช่นพลาสติกเสริมไฟเบอร์ (FRPs) แก้วเสริมพลาสติก (GRPs) โพรพิลีน (PP) เทอร์โมพลาสติก (ABS), ASA, Polystyrene, UPVC และโพลีคาร์บอเนต เป็นต้น

ประเทศไทยได้เลือกใช้การรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล แบบ DVB-T2 ซึ่งพัฒนาจาก DVB-T ตามประเทศในแถบยุโรป โดยมีคณะกรรมการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช. เป็นผู้จัดทำมาตรฐานการรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล และได้กำหนดให้มีมาตรฐาน กสทช. มส. 4002-2555 ซึ่งเป็นมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับเครื่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล

ในเอกสารฉบับนี้ขอเสนอราโดมชั้นเดียวหรือราโดมที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.1 ของความยาวคลื่นเพื่อกำลั้งงานการแพร่กระจายและอัตราขยายที่ดีที่สุด โดยที่สายอากาศที่นำเสนอมีกำลังงานแพร่กระจายมากกว่า 90% ตามย่านความถี่ปฏิบัติการที่มีค่าอัตราขยายต่ำสุดและสูงสุด 8.741 ถึง 11.65 dBi ตามลำดับ

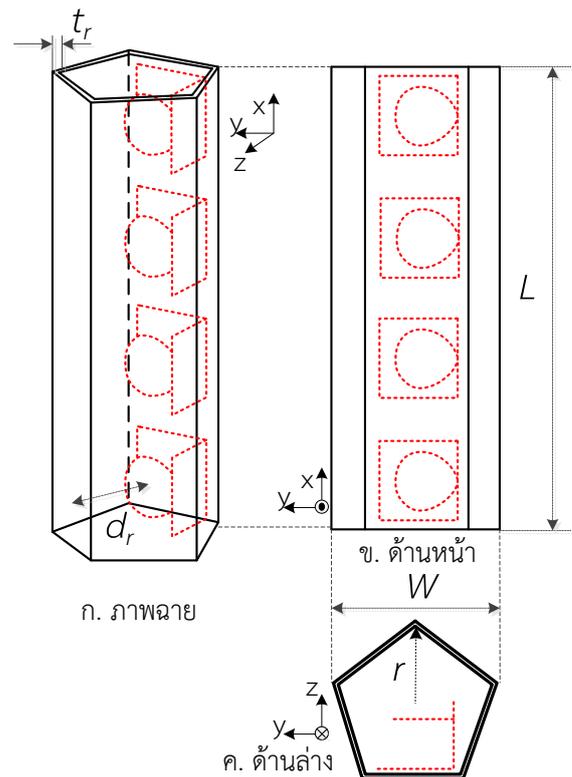
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 1 สายอากาศส่งโทรทัศน์ดิจิทัล

สายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นจาก [4] โดยรูปที่ 1 แสดงสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และวัสดุราโดมเลือกใช้ Preperm L270 [5] มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.7 ตลอดย่านความถี่ 300 MHz ถึง

1000 MHz มีค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.0006 [6] รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลกับราโดมครอบคลุมโครงสร้างสายอากาศทั้งหมดตรงกลางของด้านหน้าเป็นรูปทรงจั่วและมีขอบลาดที่ทั้งสองด้านเพื่อลดแรงกระแทกจากลม ขณะที่ด้านหลังจะแบนราบเพื่อยึดติดกับฐานยึด โดยที่งานวิจัยนี้อ้างอิงกำลังส่งสัญญาณแบบจำลองตามมาตรฐาน MIL-R-7705B สำหรับราโดมแบนด์กว้างประเภท V



รูปที่ 2 การติดตั้งสายอากาศระบบโทรทัศน์ดิจิทัลกับราโดม

ซึ่งจะให้กำลังการแพร่กระจายด้านเอาพุตที่มากกว่า 70% และกำลังส่งเฉลี่ยมากกว่า 80% [3] อย่างไรก็ตามเป้าหมายของการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้กำลังการแพร่กระจายสูงสุดที่มากกว่า 90% ตามความถี่ในการใช้งานที่ 510-790 MHz นอกจากนี้ผลการจำลองจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาของราโดม (t_r) และระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) จะได้รับการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

โครงสร้างของราโดมที่ได้ออกแบบเป็นโครงสร้างทรงกระบอกห้าเหลี่ยมเพื่อให้ระนาบกราวด์ของสายอากาศติดอยู่ด้านหนึ่งของโครงสร้างห้าเหลี่ยมและมุมหน้าของสายอากาศมีลำคลื่นพุ่งออกไปทางมุมสามเหลี่ยมของโครงสร้างห้าเหลี่ยมเพื่อให้มีผลผลิตต่อคลื่นที่ออกจากสายอากาศ ถ้าปรับเปลี่ยนโครงสร้างของราโดม เช่น มุมหน้าของสายอากาศมีโครงสร้างราโดมที่แบนราบ อาจจะทำให้

คลื่นที่ออกจากสายอากาศมากระทบราโดมมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังกว้างขึ้น ส่งผลให้อัตราขยายน้อยลงได้

2.1 ความหนาวัสดุราโดม (t_r)

ความยาวคลื่นของวัสดุราโดม (λ_r) จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งความยาวคลื่นของวัสดุราโดมจะสั้นกว่าความยาวคลื่นในอวกาศว่าง โดยที่ราโดมชั้นเดียวที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.7 [7] ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_h} = \frac{3 \times 10^8}{790 \times 10^6} = 380 \text{ mm} \quad (1)$$

และ

$$\lambda_r = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{380}{\sqrt{2.7}} = 231 \text{ mm} \quad (2)$$

เมื่อ f_h คือความถี่ด้านสูง 790 MHz

c_0 คือความเร็วแสง 3×10^8

λ_0 คือความยาวคลื่นในอวกาศว่าง

λ_r คือความยาวคลื่นในวัสดุราโดม

จะได้

$$\frac{0.05\lambda_r}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{11.55}{\sqrt{\epsilon_r}}, t_r < \frac{11.55}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

เมื่อ t_r คือความหนาของราโดม

ดังนั้นจากการคำนวณความหนาที่เหมาะสมของวัสดุราโดม $t_r = 7 \text{ mm}$ โดยที่ข้อเท็จจริงที่ว่าถ้าความหนาวัสดุราโดมบางเกินไปจะส่งผลให้ราโดมมีความแข็งแรงน้อยลง ถ้าหนาเกินไปก็ส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นและต้นทุนที่สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าราโดมมีผลต่อ $|S_{11}|$ น้อยมาก ดังนั้นจึงได้มีการวิเคราะห์กำลังการแผ่กระจายและอัตราขยายจากสายอากาศเพื่อหาความหนาและระยะห่างของราโดมที่ดีที่สุด

2.2 ระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแผ่กระจายคลื่น (d_r)

ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างราโดมกับตัวแผ่กระจายคลื่น (d_r) หมายถึงระยะห่างที่ก่อให้เกิดคลื่นสะท้อนต่ำสุดหรือระยะของคลื่นสะท้อนที่อยู่ในเฟสเดียวกับคลื่นที่ส่ง ดังนั้นระยะห่างเริ่มต้นเท่ากับ

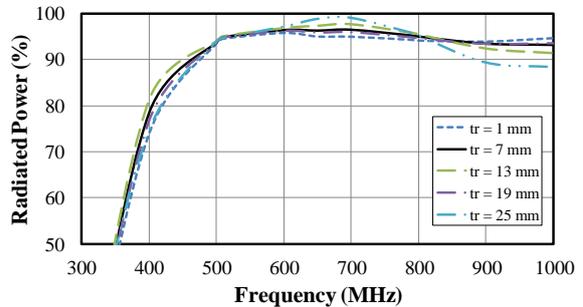
$$d_r < \frac{\lambda_0}{4} = \frac{380}{4} = 95 \text{ mm} \quad (4)$$

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

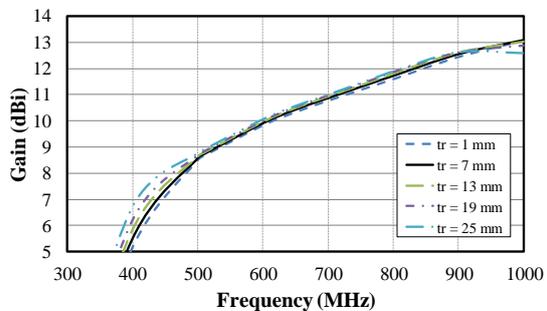
พารามิเตอร์เริ่มต้นของวัสดุราโดมถูกกำหนดด้วย $L = 950 \text{ mm}$ $W = 322 \text{ mm}$ $r = 150 \text{ mm}$ $t_r = 7 \text{ mm}$ และ $d_r = 102 \text{ mm}$ เพื่อกำหนดความหนาของวัสดุราโดมที่เหมาะสม ดังนั้นความแตกต่างของ t_r จะศึกษาผลของขนาด

ความหนา 1 7 13 19 และ 25 mm ที่แตกต่างกันไป ตามโครงสร้างราโดมที่แสดงในรูปที่ 2

3.1 ความหนาราโดม



รูปที่ 3 การจำลองกำลังการแผ่กระจายของการเปลี่ยนความหนาวัสดุราโดม (t_r)



รูปที่ 4 การจำลองอัตราขยายของการเปลี่ยนความหนาวัสดุราโดม (t_r)

รูปที่ 3 และตารางที่ 2 แสดงผลของพลังงานการแผ่กระจายของสายอากาศ พบว่าเมื่อความหนาของวัสดุราโดมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กำลังงานการแผ่กระจายของช่วงความถี่ที่ใช้งาน 510 ถึง 790MHz เปลี่ยนแปลงอย่างไม่คงที่ และในช่วงความถี่ขอบสูงที่ใช้งานได้ของสายอากาศลดลง ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ ซึ่งมีกำลังการแผ่กระจายมากกว่า 90% ของกำลังงานรวมที่จ่ายให้สายอากาศ และมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตลอดช่วงความถี่ใช้งาน เมื่อเทียบกับ $t_r = 7 13 19$ และ 25 mm ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ ได้รับการคัดเลือกเนื่องจากน้ำหนักโดยรวมและเพียงพอที่จะป้องกันความเสียหายจากสิ่งแวดล้อม ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างราโดมและตัวแผ่กระจายคลื่น (d_r) จะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

รูปที่ 4 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าความหนาวัสดุราโดมเพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีผลเห็นได้ชัดที่ความถี่ต่ำของสายอากาศ ซึ่งการเพิ่มความหนาทำให้เพิ่มน้ำหนักของสายอากาศ ดังนั้น $t_r = 7 \text{ mm}$ จึงเหมาะสมกับการออกแบบใช้งาน โดยความหนาวัสดุราโดมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังแคบลง ส่งผลให้มีอัตราขยายที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง $t_r = 7 \text{ mm}$ มีความหนาที่จะป้องกัน

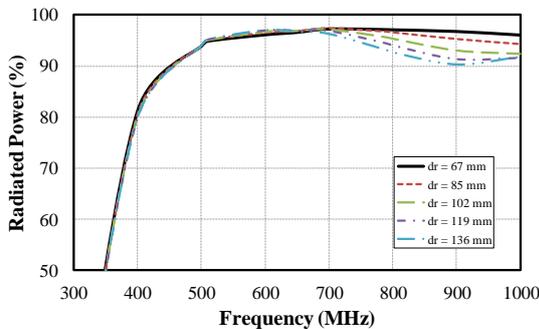


ความเสียหายเมื่อนำไปติดตั้งใช้งานบนเสาส่งสัญญาณ เช่น ความเสียหายจาก ฝน ลม นก เป็นต้น และยังคงไม่มีผลต่อสัญญาณที่ส่งออกของสายอากาศ

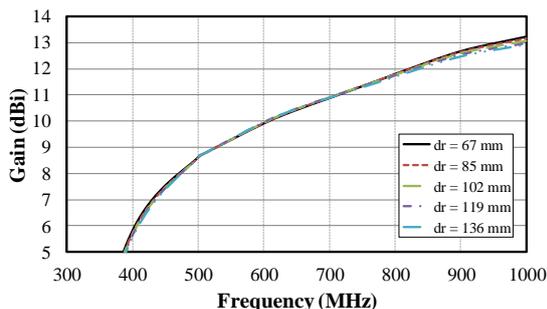
ตารางที่ 1 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศสำหรับการเปลี่ยนความหนาวัสดุราโดมที่ให้กำลังการแพร่กระจายมากกว่า 90% ของกำลังงานรวมที่จ่ายให้สายอากาศ ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz

ความหนาวัสดุราโดม (t_r) mm	อัตราขยาย (dBi)		
	510 MHz	650 MHz	790 MHz
1	8.667	10.33	11.51
7	8.734	10.49	11.64
13	8.788	10.49	11.71
19	8.836	10.53	11.77
25	8.908	10.57	11.81

3.2 ระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 5 การจำลองกำลังการแพร่กระจายของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r)



รูปที่ 6 การจำลองอัตราขยายของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r)

เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) มีค่าแตกต่างกันคือ 67 85 102 119 และ 136 mm กำลังการแพร่กระจายที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 2 พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่าง ราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้กำลังการแพร่กระจายลดลง จะเห็นผลชัดเจนที่ขอบความถี่ด้านสูง ในขณะที่ $d_r = 67$ mm สร้างกำลังการแพร่กระจายที่มี

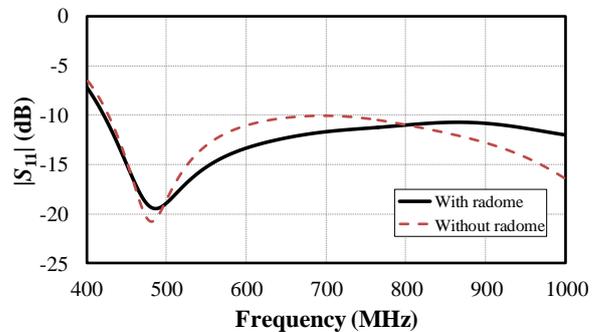
เสถียรภาพมากที่สุดในช่วงความถี่ 510 ถึง 970 MHz เทียบกับ $d_r = 85$ 102 119 และ 136 mm ดังนั้นจึงเลือก $d_r = 67$ mm สำหรับการศึกษา

รูปที่ 6 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) เพิ่มขึ้นทำให้อัตราขยายลดลงเล็กน้อย มีผลเห็นได้ชัดที่ความถี่สูงของสายอากาศ โดยที่จากการคำนวณได้ $d_r = 95$ mm นั้นคำนวณมาจากความถี่เดียว จึงนำมาจำลองเพื่อหา d_r ที่ได้ผลอัตราขยายที่ดีที่สุดตลอดย่าน ดังนั้น $d_r = 67$ mm จึงเหมาะสมกับการออกแบบใช้งาน

ตารางที่ 2 การจำลองอัตราขยายของสายอากาศสำหรับการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างราโดมกับตัวแพร่กระจายคลื่น (d_r) ที่ให้กำลังการแพร่กระจายมากกว่า 90% ของกำลังงานรวมที่จ่ายให้สายอากาศ ตลอดย่านความถี่ใช้งาน 510 ถึง 790 MHz

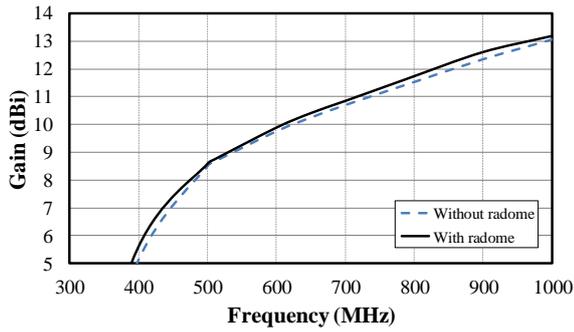
ความหนาวัสดุราโดม (d_r) mm	อัตราขยาย (dBi)		
	510 MHz	650 MHz	790 MHz
67	8.773	10.43	11.70
85	8.762	10.45	11.70
102	8.763	10.47	11.68
119	8.774	10.48	11.66
136	8.773	10.47	11.61

3.3 สายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ



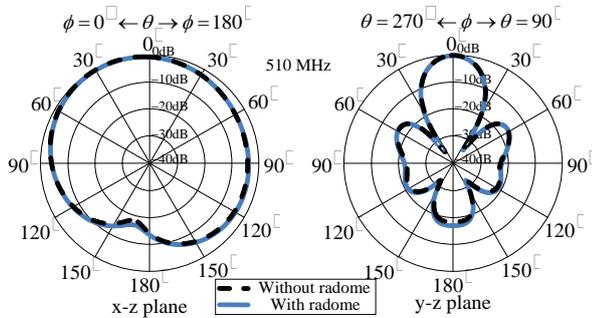
รูปที่ 7 $|S_{11}|$ ของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

รูปที่ 7 แสดง $|S_{11}|$ ของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ พบว่าสายอากาศมี $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 420 ถึง 1000 MHz ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน 510 ถึง 790 MHz ซึ่งสายอากาศมีแบนด์วิดธ์มากกว่า 80% แบนด์วิดธ์ สามารถใช้สำหรับการรับส่งทางสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลของประเทศไทย

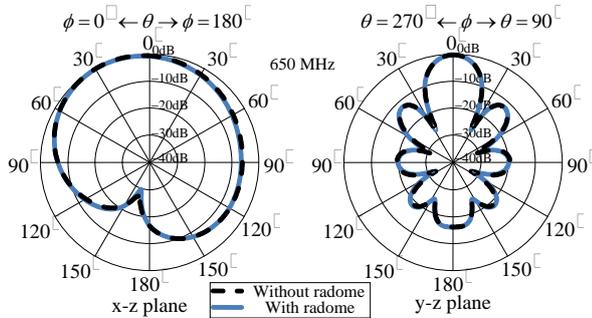


รูปที่ 8 อัตราขยายของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

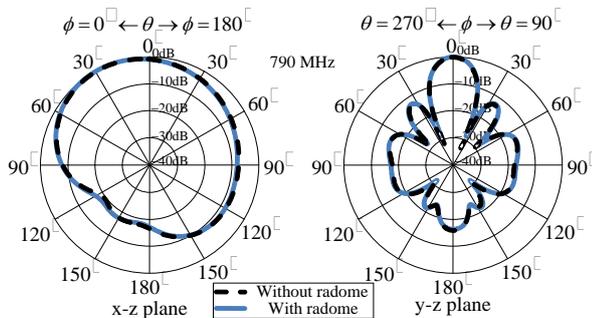
รูปที่ 8 แสดงผลของอัตราขยาย พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายเมื่อมีราโดมและไม่มีราโดมมีค่าเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi และ 8.622 ถึง 11.45 dBi ซึ่งราโดมช่วยเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศได้เล็กน้อย



ก. 510 MHz



ข. 650 MHz



ค. 790 MHz

รูปที่ 9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมกับราโดมต้นแบบ

รูปที่ 9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรวมกับราโดม ที่ความถี่ 510 650 และ 790 MHz พบว่าเมื่อมีราโดมทำให้ลำคลื่นหลักขยับไป 1 องศาตลอดย่านความถี่ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวตลอดย่านความถี่

4. บทสรุป

สายอากาศที่ได้รับการออกแบบร่วมกับโครงสร้างและวัสดุราโดมอย่างเหมาะสมจะให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ดีที่สุดพร้อมด้วยการปกป้องตัวสายอากาศจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะยืดอายุการใช้งานของสายอากาศและส่วนประกอบต่าง ๆ ในบทความนี้สายอากาศที่นำเสนอสร้างกำลังการแพร่กระจาย $\geq 90\%$ ตลอดความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 510 MHz ถึง 790 MHz ซึ่งไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์อัตราขยายต่ำสุดและสูงสุดของสายอากาศรวมกับราโดมมีค่าเท่ากับ 8.741 ถึง 11.65 dBi ตามลำดับ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Audone, A. Delogu, and P. Moriondo, "Radome Design and Measurements," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 37. no. 2. June 1988
- [2] J. Moreno, M. Fernandez, A. Somolinos, L. Lozano, F. Catedra, and I. Gonzalez, "Analysis and Design of Antenna Radomes," Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013), Tel Aviv, Israel, 21-23 Oct. 2013.
- [3] U. S. Department of Defense. "MIL-R-7705B: General specification for radomes," U. S. Government Printing Office, Jan. 1975.
- [4] S. Dentre, C. Phongcharoenpanich, and K. Kaemarungsi, "Scutcheon Antenna for UWB-GPR Applications," Proceedings of the 2012 Thailand-Japan Microwave, Bangkok, 4 pages, Aug. 2012.
- [5] PREPERM L270 Premix OY. Available from: <https://www.plastle.com/raw-materials-catalog/PREPERM-L270> [Accessed 30th April 2018].
- [6] D. V. Rosato, N. R. Schott, and M. G. Rosato. Plastics engineering manufacturing and data handbook/Plastics Institute of America. 2001 ed., Boston: Kluwer Academic Publishers. 2001



- [7] Y. M. Pei, A. M. Zeng, L. C. Zhou, R. B. Zhang, and K. X. Xu, “Electromagnetic optimal design for dual-band radome wall with alternating layers of staggered composite and kagome lattice structure,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol.122, 2012. pp.437–452