

สายอากาศแฉวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบโดยใช้แฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรสำหรับการตรวจจับ โพรงใต้ดินด้วยเรดาร์ทะลุพื้นดิน

Planar Log-Periodic Dipole Array Antenna Using Dragon Curve Fractal for Underground Cavity Detection with Ground Penetrating Radar

ฉัตรชัย โชคชัย¹ จิรยุ คณธิตามิ^{2*} และ ศักรินทร์ แก้วทอง³

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี chatchai_c@mutt.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี jerayu.k@en.mutt.ac.th

³แผนกวิจัยและพัฒนา บริษัท โดมอนด์ พาย จำกัด sakkarin.k@diamond-pi.com

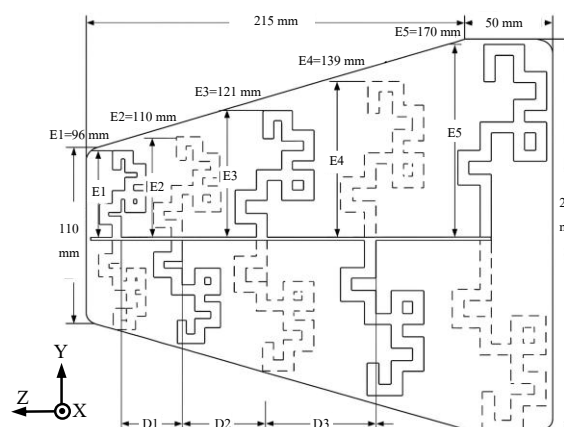
บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอสายอากาศแฉวลำดับแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบโดยใช้แฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรสำหรับการตรวจจับโพรงใต้ดินด้วยเรดาร์ทะลุพื้นดิน โดยออกแบบโครงสร้างด้วยแฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรที่การซ้ำระดับ 4 เพื่อลดขนาดและเพิ่มแบนด์วิดท์ครึ่งกำลังของสายอากาศ ซึ่งมีขนาด $265 \times 240 \times 1.6$ มม.³ จากการทดสอบพบว่าสายอากาศมีแบนด์วิดท์ 400 MHz (72.7%) มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทาง มีอัตราขยายสูงสุดที่มุม 0 องศา เท่ากับ 7.24 dBi และมีแบนด์วิดท์ครึ่งกำลัง เท่ากับ 80 องศา ในระนาบ XZ สามารถลดขนาดจากสายอากาศแฉวลำดับไดโพลแบบปกติได้ถึง 33% จากการทดสอบพบว่า การตรวจจับโพรงใต้ดินจากการสะท้อนของคลื่นสามารถตรวจพบได้เมื่อโพรงมีขนาดและความลึกมากกว่า 30 ซม. ขึ้นไป โดยที่ความลึก 40 ซม. ให้ผลการตรวจจับที่แม่นยำที่สุด

คำสำคัญ: สายอากาศแบบแฉวลำดับ, แฟร็กทัลเส้นโค้งมังกร, โพรงใต้ดิน, เรดาร์ทะลุพื้นดิน

Abstract

This paper presents a planar log-periodic dipole array (LPDA) antenna utilizing a dragon curve fractal design for underground cavity detection via ground-penetrating radar (GPR). The antenna structure is designed using a 4th iteration of the dragon curve fractal to achieve size reduction and increase the half-power beamwidth of the antenna, which has dimensions of $265 \times 240 \times 1.6$ mm³. Measurement results show that the antenna operates over a bandwidth of 350–750 MHz (72.7%). The antenna exhibits directional radiation patterns with a maximum gain of 7.24 dBi and a half-power beamwidth of 80 degrees in the XZ plane. Compared to conventional dipole array antennas, the design achieves a 33% reduction in size. Experimental results confirm that underground cavity detection is achievable when the cavity size and depth exceed 30 cm, with the most precise detection observed at a depth of 40 cm.



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศแฉวลำดับแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบ
โดยใช้แฟร็กทัลเส้นโค้งมังกร

Keywords: Array Antennas, Dragon Curves Fractal, Underground cavity, Ground Penetrating Radar

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการเกิดโพรงใต้ดิน (Underground Cavity) กลายเป็นภัยคุกคามที่อาจนำไปสู่การทรุดตัวของพื้นดินหรือการเกิดหลุมยุบ ซึ่งสร้างความเสียหายต่ออาคาร ถนน หรือโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ได้อย่างรุนแรง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการกัดเซาะจากน้ำใต้ดิน รวมไปถึงเหตุแผ่นดินไหว โพรงใต้ดินเหล่านี้มักไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยตาเปล่าหรือการตรวจสอบทั่วไป ดังนั้นระบบการสำรวจใต้พื้นดินจึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่สามารถสำรวจโครงสร้างของดินได้โดยไม่ทำลายพื้นผิว [1]

ระบบเรดาร์ทะลุทะลวงผิวพื้น (Ground Penetrating Radar: GPR) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งสัญญาณเข้าสู่พื้นดิน และตรวจวัดคลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุหรือชั้นดินที่มีคุณสมบัติต่างกัน เพื่อสร้างภาพหรือข้อมูลของโครงสร้างใต้ดินแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) [2] ซึ่ง GPR ได้รับความนิยมในการใช้งานหลายด้าน เช่น การสำรวจโบราณคดี, การตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน, การค้นหาโพรงหรือท่อใต้ดิน โดยจุดเด่นคือความแม่นยำในการตรวจสอบและความสามารถในการแสดงผลแบบเรียลไทม์

ในระบบเรดาร์ทะเลลวงผิวน้ำนั้น ในการออกแบบสายอากาศและความถี่ที่ใช้จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกของการสะท้อนผิวและการรับสัญญาณสะท้อนกลับอย่างมาก สายอากาศจึงมีความสำคัญ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสายอากาศที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน สายอากาศแถวลำดับแบบรายคาบล็อก (Log Periodic Dipole Array: LPDA) เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทาง และอัตราขยายสูง แต่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงมีการนำเสนอเทคนิคต่างๆ ในการลดขนาดของสายอากาศอย่างหลากหลาย แพร่กัทรลเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยม ใน [3] นำเสนอโครงสร้างแพร่กัทรลต้นไม่ร่วมกับสายอากาศแถวลำดับแบบรายคาบล็อกเพื่อเพิ่มสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ นอกจากนี้มีการนำเสนอสายอากาศแถวลำดับแบบรายคาบล็อกแบบระนาบสำหรับระบบระบุตำแหน่ง [4] และสายอากาศแถวลำดับแบบรายคาบล็อกแบบกึ่งระนาบ [5] สำหรับย่านความถี่ 5G

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบสำหรับการใช้งานในระบบเรดาร์ทะเลลวงผิวน้ำในการสำรวจโพรงใต้พื้นดิน ทำการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ โดยการประยุกต์ใช้รูปเลขาคณิตแพร่กัทรลเส้นโค้งม้งกรเพื่อลดขนาดของสายอากาศ เพิ่มอัตราขยายและเพิ่มบีมด์วิทท์ของกำลังครึ่งหนึ่ง (Half-power Beamwidth: HPBW)

2. การออกแบบ

2.1 การออกแบบสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบดังรูปที่ 1 ซึ่งสายอากาศทำการออกแบบบนแผ่น FR4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon_r = 4.3$ มีความหนาของวัสดุฐานรอง (Substrate) $h = 1.6$ มม. และมีค่าประกอบการสูญเสีย $\tan \delta = 0.019$ ด้านบนเป็นแผ่นโลหะทองแดงมีความหนา 0.035 มม. โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio [6] ในการจำลองสายอากาศ ขั้นตอนแรกในการออกแบบเริ่มจากการคำนวณขนาดของสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามทฤษฎีการออกแบบ [7] แสดงดังรูปที่ 2 โดยคำนวณค่าต่างๆ ตามสมการที่ (1) – (8) ของ [8] ค่าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 1

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (1)$$

หา B_{ar}

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot \alpha \quad (2)$$

และจะได้ B_s จากสมการ (3)

$$B_s = B_{ar} = B[1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot \alpha] \quad (3)$$

จะได้จำนวนอีลิเมนต์ N จากสมการ (4)

$$N = 1 + \frac{\ln B_s}{\ln(1/\tau)} \quad (4)$$

หาค่า l , R , d และ s ได้จากสมการ (5)

$$\frac{l}{\tau} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} \quad (5)$$

หาค่า $\lambda_{\max}$ จากสมการ (6)

$$\lambda_{\max} = 2l_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} \quad (6)$$

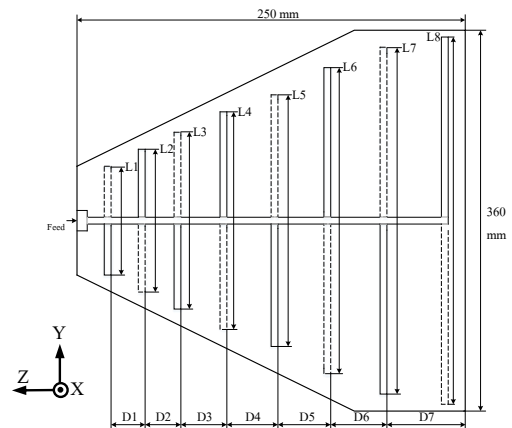
หาค่า l จากสมการ (7)

$$\frac{l}{\tau} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l_{n+1}}{l_n} \quad (7)$$

หาค่า d จากสมการ (8)

$$\frac{l}{\tau} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_{n+1}}{d_n} \quad (8)$$

ขั้นตอนที่สองนำโครงสร้างแพร่กัทรลเส้นโค้งม้งกร มาประยุกต์ใช้กับสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกแบบปกติ (ทำซ้ำระดับที่ 0) เพื่อลดขนาดของสายอากาศ โครงสร้างแพร่กัทรลเส้นโค้งม้งกร [9] ระดับการทำซ้ำตั้งแต่ระดับ 0-4 แสดงดังรูปที่ 3 ใช้การทำซ้ำที่มุม 90 องศา โดยค่าเริ่มต้นของ $A = l_8$ จากนั้นทำการจำลองผลเพื่อศึกษาแนวโน้มความเป็นไปได้ของการลดขนาดของสายอากาศและเพิ่มอัตราขยายโดยที่บีมด์วิทท์ของกำลังครึ่งหนึ่งมีมุมที่กว้าง แบบรูปการแผ่พลังงานจากการจำลองของสายอากาศที่ความถี่ 600 MHz ในระดับที่ 0-4 แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกแบบปกติ (ทำซ้ำระดับที่ 0) นั้น มีค่า HPBW=75.8 องศา และอัตราขยายที่มุม 0 องศา เท่ากับ 2.65 dBi

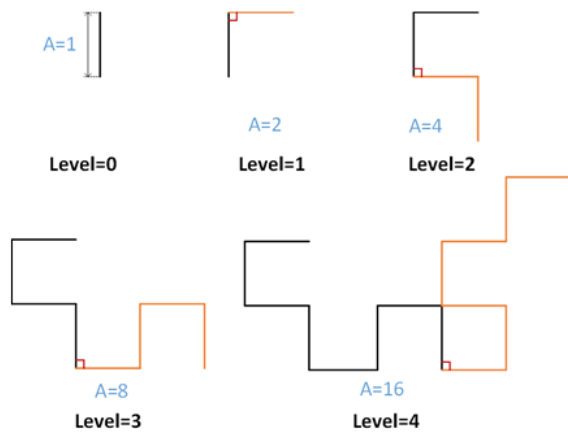


รูปที่ 2 โครงสร้างแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกแบบระนาบ

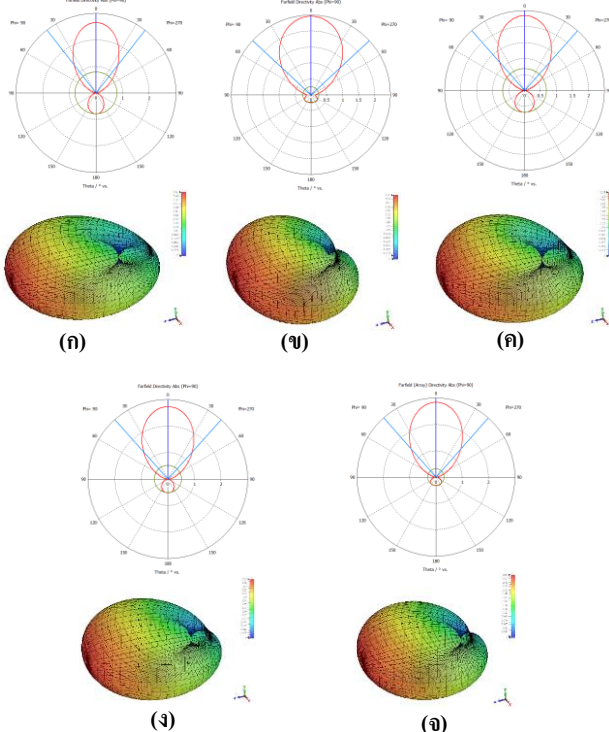
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ

ความยาวของไดโพล	ความยาว (mm)	ระยะห่างของแถวลำดับ	ระยะห่าง (mm)
l_1	100	d_1	23
l_2	110	d_2	25
l_3	140	d_3	28
l_4	170	d_4	32
l_5	210	d_5	36
l_6	250	d_6	42
l_7	310	d_7	45
l_8	380		

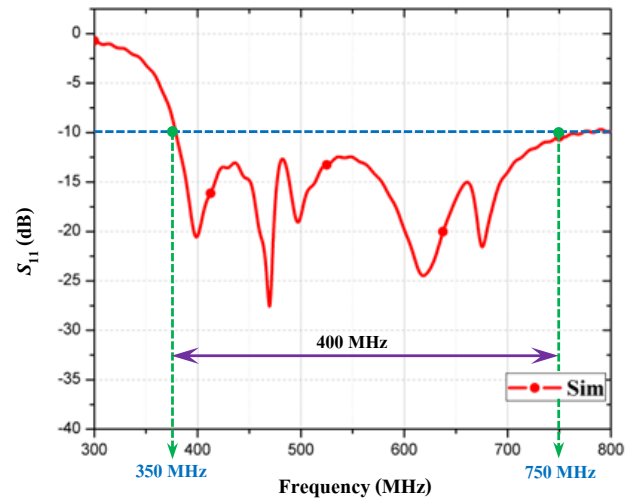
ในขณะที่สายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อก โครงสร้างแฟร็กทัลเส้นโค้งมังกร ที่มีระดับการทำซ้ำ 1-4 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของบีบอัดตัวของกำลังครึ่งหนึ่งและอัตราขยาย โดยที่ระดับการทำซ้ำที่ 4 มีค่า HPBW=82.7 องศา และอัตราขยายที่มุม 0 องศา เท่ากับ 2.84 dBi ซึ่งมีขนาดโดยรวมของสายอากาศที่เล็กลงเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับการทำซ้ำเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มความกว้างของบีบอัดตัวของกำลังครึ่งหนึ่งและอัตราขยายที่สอดคล้องกันในลักษณะเชิงเส้นโดยที่HPBW เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลกระทบต่ออัตราขยายที่ลดลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 3 ระดับการทำซ้ำของแฟร็กทัลเส้นโค้งมังกร ระดับ 0 - 4



รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 600 MHz
(ก) ระดับ 0 (ข) ระดับ 1 (ค) ระดับ 2 (ง) ระดับ 3 และ (จ) ระดับ 4

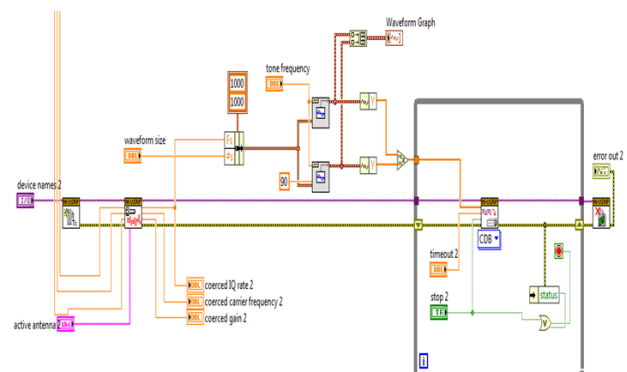


รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากการจำลอง

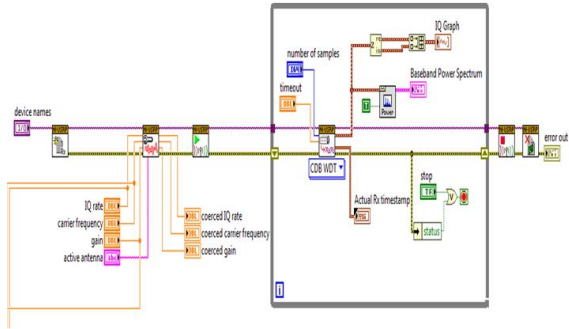
จากนั้นนำสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อก โครงสร้างแฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรที่มีระดับการทำซ้ำ ที่ระดับ 4 ไปทำการเพิ่มอีลิเมนต์จาก 3E ไปเป็น 5E และทำการปรับแต่งขนาดให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด โดยขนาดของสายอากาศแสดงไว้ในรูปที่ 1 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB มีแบนด์วิดท์ 350-750 MHz (400 MHz) และลดขนาดของสายอากาศที่นำเสนอเทียบกับสายอากาศแถวลำดับไดโพลแบบรายคาบล็อกแบบปกติ (ทำซ้ำระดับที่ 0) ได้ถึง 33 % มีอัตราขยายสูงสุดที่มุม 0 องศา เท่ากับ 7.54 dBi

2.2 การออกแบบโปรแกรมสำหรับเรดาร์ทะเลพื้นดิน

การออกแบบโปรแกรมควบคุมจะใช้โปรแกรม LabVIEW [10] โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วนหลักๆ ก็คือการออกแบบภาคส่ง (Tx) แสดงดังรูปที่ 6 และภาครับ (Rx) แสดงดังรูปที่ 7 โปรแกรมที่ออกแบบจะนำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ USRP (Universal Radio Peripheral) [11]



รูปที่ 6 โปรแกรมภาคส่ง (Tx)



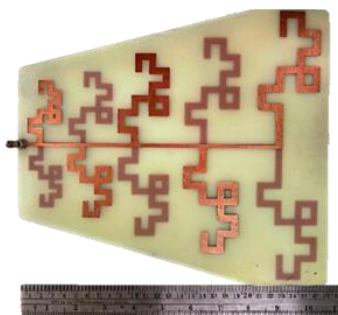
รูปที่ 7 โปรแกรมภาครับ (Rx)

โปรแกรมออกแบบให้ให้มีส่วนของสัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์ และสัญญาณความถี่กลางเพื่อรองรับการออกแบบระบบสื่อสารโดยใช้เทคโนโลยีกำหนดสัญญาณวิทยุด้วยซอฟต์แวร์ หน้าที่หลัก คือประมวลผลสัญญาณวิทยุ เช่น การมอดูเลต การดีมอดูเลต การขยายความถี่ และการแปลงสัญญาณ

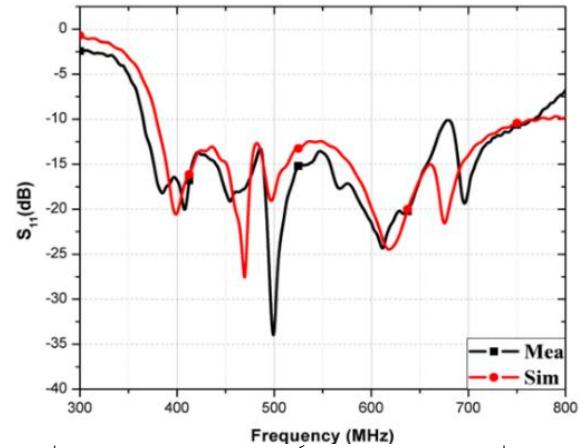
โดยฝั่งภาคส่งจะเริ่มจากการกำหนดชื่ออุปกรณ์ ความถี่พาหะ อัตราสุ่มสัญญาณ (IQ rate) และกำลังส่ง จากนั้นจะสร้างคลื่นความถี่ที่ต้องการส่ง และส่งออกทางพอร์ต TX ของ USRP ในขณะที่ฝั่งภาครับจะรับสัญญาณกลับมาผ่านพอร์ต RX โดยมีการตั้งค่าคลื่นความถี่และกำลังรับให้สอดคล้องกัน พร้อมกำหนดจำนวน sample ที่ต้องการและวิเคราะห์ค่ากำลังในโดเมนความถี่เพื่อนำมาแสดงเป็นกราฟ

3. การวัดทดสอบและอภิปรายผล

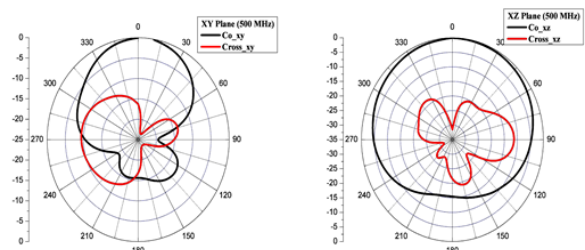
ผลจากการทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จนได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงนำขนาดของสายอากาศจากการจำลองไปสร้างชิ้นงานดังรูปที่ 8 จากนั้นนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนโดยใช้เครื่อง (Vector Network Analyzer) รุ่น Rohde & Schwarz ZVA40 10 MHz – 40 GHz จากรูปที่ 9 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ จากการวัดจริงพบว่ามีแบนด์วิดท์ 350 MHz -750 MHz (400 MHz) จากรูปที่ 10 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 500 MHz โดยทำการวัดในห้องปิดกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้สายอากาศมาตรฐานฮอร์น รุ่น HF907 (Rohde & Schwarz) เป็นสายอากาศตัวส่งและใช้สายอากาศต้นแบบเป็นตัวรับ ซึ่งในระนาบ XZ และ YZ พบว่ามีลักษณะแผ่พลังงานแบบเจาะจงทิศทางที่ระนาบ XZ โดยมีมีมิตวัดที่ครึ่งกำลังในระนาบ XZ เท่ากับ 80 องศา และมีอัตราขยายสูงสุดที่มุม 0 องศา เท่ากับ 7.24 dBi



รูปที่ 8 ชิ้นงานต้นแบบของสายอากาศที่นำเสนอ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศที่นำเสนอ



รูปที่ 10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่นำเสนอจากการวัดที่ความถี่ 600 MHz

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแกลวาล์วแบบรายคาบล็อกชนิดระนาบโดยใช้แฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรสำหรับการตรวจจับโพรงใต้ดินด้วยเรดาร์ทะลุพื้นดิน โครงสร้างแฟร็กทัลเส้นโค้งมังกรสามารถลดขนาดของสายอากาศได้ 33% เทียบกับสายอากาศปกติ จากผลทดสอบจากชิ้นงานจริง มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 400 MHz มีอัตราขยายสูงสุดที่มุม 0 องศา เท่ากับ 7.24 dBi และมีมิตวัดที่ครึ่งกำลังเท่ากับ 80 องศา ในระนาบ XZ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่ออกแบบมีผลการตอบสนองครอบคลุมความถี่ใช้งานรวมทั้งมีอัตราขยายที่ดี มีขนาดที่เหมาะสม สามารถใช้งานร่วมกับเรดาร์ทะลุพื้นดินอย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการงานวิจัยสื่อสารไร้สายภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือสำหรับการวัดและทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.-S. Kang, N. Kim, J. J. Lee, and Y.-K. An, "Deep learning-based automated underground cavity detection using three-dimensional ground penetrating radar," *Struct. Health Monit.*, vol. 18, no. 6, pp. 1811–1823, 2019.

- [2] Z. Liu, S. Wang, X. Gu, and Q. Dong, “Non-destructive testing and intelligent evaluation of road structural conditions using GPR and FWD,” *J. Traffic Transp. Eng.*, 2025.
- [3] A. K. Mondal, P. Kumar, P. Saxena, and K. Premkumar, “A planar log periodic dipole array antenna for IEMI detection,” *2022 IEEE Microw. Antennas Propag. Conf.*, Bangalore, India, Dec. 2022, pp.1763–1768.
- [4] P. Phaisan, S. Thainiramit, and P. Akkaraekthalin, “Design and implementation of planar log periodic dipole array antenna for UHF passive coherent location system,” *2022 19th Int. Conf. Elect. Eng./Electron., Comput., Telecommun. Int. Technol. (ECTI-CON)*, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 476–479.
- [5] A. Venouil, M. Egels, M. Benwadih, C. Serbutoviez, and P. Pannier, “Planar quasi log periodic dipole antenna for millimeter wave 5G band,” *2023 17th Eur. Conf. Antennas Propaga. (EuCAP)*, Florence, Italy, Mar. 2023, pp. 1–4.
- [6] CST Microwave Studio 2024, www.cst.com.
- [7] C.A.Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. Third Edition, John Wiley & Sons Ins. 2005, Ch. 11, pp. 623-636.
- [8] C. Chokchai, “A tree fractal log-periodic dipole array antenna for UHF RFID reader,” *The 41st Elect. Eng. Conf. (EECON-41)*, Vol. 2, pp. 41-44, Thailand, Nov. 2018.
- [9] S.Tabachnikov, “Dragon curves revisite,” *The Math. Intell.*, vol. 36, no. 1, pp. 13–17, 2014.
- [10] National Instruments, *LabVIEW 2017 System Design Software*, Austin, TX, USA: National Instruments, 2017.
- [11] Ettus Research, *USRP B200 Universal Software Radio Peripheral*, Austin, TX, USA: Ettus Research, 2023.