การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การศึกษาหาตำแหน่งวัตถุแนวลึกผ่านสิ่งกีดขวางด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟ

A Study on Objective Depth Position through Obstacle by Using Microwave

ภูมิกร จันทร์แป้น[1] ณัฐชนน สุขเกษม[2] จิรกิตติ์ โล่สัมฤทธิ์[3] ไพบูลณ์ ย้อยหยด[4*] สุพัฒนา นิรัคฆนาภรณ์[5]

ภูมินทร์ ขวัญมุณี[6] และ กิตติศักดิ์ ไตรพิพัฒพรชัย[7]

[1]phumi.hill@gmail.com, [2]dreamkaek1968@gmail.com, [3]jirakit.l65@rsu.ac.th, [4]paiboon@rsu.ac.th*, [5]supattana@rsu.ac.th,
[6]phumin_kw@rsu.ac.th, [7]kittisak@rsu.ac.th
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

บทคัดย่อ

การศึกษาการตรวจจับตำแหน่งวัตถุผ่านสิ่งกีดขวางด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือค่าการกระเจิง S_{11} เมื่อคลื่นเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง ตกกระทบวัตถุ และสะท้อนกลับมายังสายอากาศตัวเดียวกัน ใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็วผกผัน (IFFT) เพื่อหาค่าตำแหน่งของสิ่งกีดขวางและวัตถุที่อยู่ด้านหลัง ผลการทดลองส่งคลื่นผ่านแผ่นไม้อัดความหนา 10 mm และวางวัตถุทรงกลมไว้ด้านหลัง พบว่าสามารถตรวจจับวัตถุหลังแผ่นไม้ได้ กรณีวัตถุทรงกลมสแตนเลสมีระยะความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 7.91% และกรณีวัตถุทรงกลมพลาสติกมีระยะความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.85%

คำสำคัญ: วัตถุทรงกลม ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน การแปลงฟูริเยร์แบบเร็วผกผัน คลื่นไมโครเวฟ

Abstract

A study of object detection through obstacles using microwaves by analyzing the reflection coefficient or scattering parameter of S_{11} when the wave travels through obstacles, hits the object, and reflects back to the same antenna. Fast Inverse Fourier Transform (IFFT) is used to find the position of the obstacle and the object behind it. The experimental results of sending waves through a 10 mm thick plywood sheet and placing a spherical object behind it show that the object behind the wooden sheet can be detected. In the case of stainless steel spherical objects, the average error range is 7.91% and in the case of plastic spherical objects, the average error range is 6.85%.

Keywords: Spherical object, Reflection Coefficient, Inverse Fast Fourier Transform, Microwave

1. บทนำ

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงจากคลื่นวิทยุและต่ำกว่าคลื่นอินฟราเรด ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในช่วง 300 MHz ถึง 300 GHz โดยมีคุณสมบัติในการทะลุผ่านสิ่งกีดขวางและมีความสามารถในการตรวจจับวัตถุ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานวิศวกรรมที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในหลายรูปแบบที่ไม่ต้องสัมผัสกับตัวอย่างทดสอบและไม่ทำลายตัวอย่างทดสอบ [1]-[3] ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการทดลองหรือบทวิเคราะห์เกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟมากมาย เช่น

การศึกษาคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟและวัดคลื่นรั่วไหลจากตู้อบไมโครเวฟ [4] ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟและหาวิธีการตรวจจับคลื่นไมโครเวฟที่รั่วไหลออกจากตู้อบ ซึ่งผลสรุปที่ได้คือระยะทางมีค่าแปรผกผันกับความเข้มของคลื่นไมโครเวฟ และจุดที่มีการรั่วไหลมากที่สุดของตู้อบไมโครเวฟคือด้านหน้าตู้

การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่มะม่วง [5] โดยในการทดลองนี้เป็นการศึกษาลักษณะการให้ความร้อน ซึ่งแพร่กระจายในเนื้อมะม่วงภายหลังจากการให้ความร้อน ด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาแนวโน้มในการกำจัดหนอนแมลงวันทองในมะม่วง ซึ่งผลสรุปที่ได้คือการใช้ไมโครเวฟเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในขั้นต้น แล้วตามด้วยการอบไอน้ำ จะมีประสิทธิภาพ มากกว่าการใช้วิธีอบไอน้ำอย่างเดียว

นวัตกรรมใหม่ในการรักษามะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ [6] งานวิจัยนี้ได้ทบทวนและนำเสนอบทความที่ศึกษา พัฒนาออกแบบสายอากาศ และวิธีการทางความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟสำหรับรักษาเนื้องอกตับ หรือมะเร็งตับ ซึ่งวิธีการ MCT นั้น คาดหวังว่าสามารถรองรับการรักษามะเร็งตับและทำลายโซนเนื้อร้ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 3 cm ได้สำเร็จ

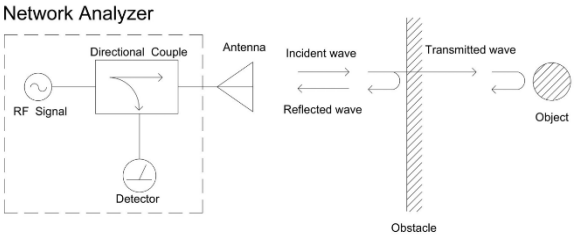
การใช้คลื่นไมโครเวฟในการตรวจจับวัตถุหลังสิ่งกีดขวางมีที่มาจากการพัฒนาเทคโนโลยีเรดาร์ (Radar) โดยอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่น การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในลักษณะนี้ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในด้านการทหารและการรักษาความปลอดภัย [7] ด้านการแพทย์ [8] การตรวจสอบโครงสร้างและอุตสาหกรรม [9] งานวิจัยนี้จะศึกษาคลื่นไมโครเวฟเกี่ยวกับคุณสมบัติการตกกระทบ การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น เพื่อศึกษาความสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุผ่านสิ่งกีดขวาง และเป็นแนวทางต่อยอดการหาขนาดวัตถุและทิศทางของวัตถุเพื่อสร้างเครื่องมือที่สามารถตรวจหาวัตถุผ่านสิ่งกีดขวางได้อย่างแม่นยำ

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

2. หลักการการตรวจจับวัตถุผ่านสิ่งกีดขวาง

2.1 การตรวจจับวัตถุผ่านสิ่งกีดขวาง

เครื่องกำเนิดความถี่จะสร้างคลื่นไมโครเวฟส่งผ่านคัปเปลอร์ทิศทาง (Directional couple) เพื่อส่งคลื่นออกทางสายอากาศ (Antenna) คลื่นจะเดินทางตกกระทบสิ่งกีดขวาง เกิดคลื่นสะท้อนกลับ บริเวณรอยต่อตัวกลางอากาศและตัวกลางสิ่งกีดขวางและคลื่นส่งผ่านทะลุสิ่งกีดขวางไปยังวัตถุหลังสิ่งกีดขวาง และสะท้อนกลับ ผ่านสิ่งกีดขวางกลับมายังสายอากาศแล้วส่งเข้าไปยังคัปเปลอร์ทิศทาง เพื่อแยกสัญญาณสะท้อนกลับด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) แสดงการตรวจพบวัตถุ



รูปที่ 1 การตรวจจับวัตถุผ่านสิ่งกีดขวาง

2.2 การคำนวณหาขนาดของวัตถุสิ่งกีดขวาง และระยะสนามไกล

คลื่นความถี่ที่ใช้ในการทดลองคือช่วง 800 MHz ถึง 3 GHz ดังนั้นความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะเป็นค่าความถี่กลางคือ 1 GHz

การหาความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่น (m) c คือความเร็วของคลื่นไมโครเวฟในอากาศเท่ากับ 3×10^8 m/s และ f คือ ความถี่ (Hz) จะได้ $\lambda = (3\times10^8)/(1\times10^9) = 0.3$ m ดังนั้น ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.3 m หรือ 30 cm

จากทฤษฎีขนาดของสิ่งกีดขวางที่จะไม่เกิดอิทธิพลคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบวัตถุสิ่งกีดขวาง[10] เมื่อวัตถุมีขนาดอยู่ในช่วง 3λ - 5λ ดังนั้นเส้นแนวทแยงของวัตถุสิ่งกีดขวางควรที่จะอยู่ในช่วงระหว่างขนาดวัตถุสิ่งกีดขวาง 3(30 cm) ถึง 5(30 cm) นั่นคือ 90 cm ถึง 150 cm จากการคำนวณขนาดวัตถุสิ่งกีดขวางสามารถเลือกขนาดของแผ่นไม้ได้ คือ แผ่นไม้อัดขนาด (กxยxส): 600×1200×10 mm

การคำนวณหาระยะสนามไกล (Far field)

การหาระยะสนามไกล

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

โดยที่ r คือระยะสนามไกล (m) D คือขนาดของสายอากาศเท่ากับ 30 cm จะได้ $r = (2\times30^2)/(30) = 60$ cm

ดังนั้นระยะสนามไกลคือ 60 cm หมายความว่าต้องกำหนดระยะสิ่งกีดขวางให้วางห่างจากสายอากาศเป็นระยะเท่ากับหรือมากกว่า 60 cm คลื่นที่ส่งไปยังสิ่งกีดขวางและวัตถุจึงจะเป็นคลื่นระนาบ

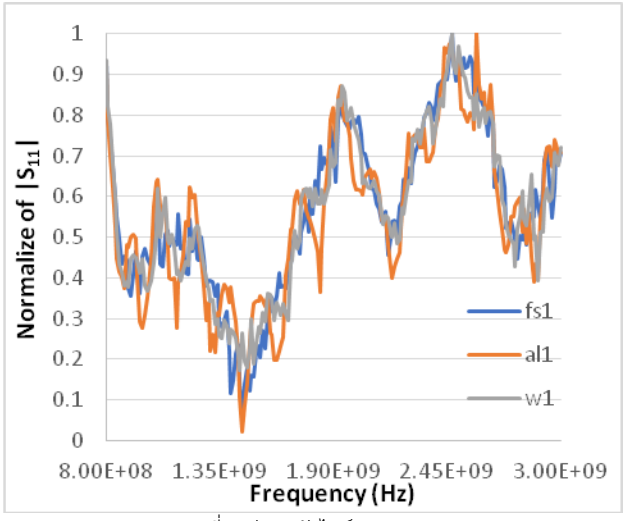
3. ผลการทดลองอภิปราย

การทดลองจะวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ (S_{11}) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในช่วงความถี่ 800 MHz ถึง 3 GHz โดยการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่โล่ง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นไม้อัดหนา กรณีวางวัตถุทรงกลมสแตนเลสและพลาสติก ลูกละสองระยะ ไว้หลังแผ่นไม้อัดความหนา 10 mm ข้อมูล S_{11} ที่ได้จากการวัดเป็นโดเมนทางความถี่จะถูกแปลงเป็นโดเมนทางเวลา ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วผกผัน (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) เพื่อนำมาวิเคราะห์ตำแหน่งของวัตถุแนวลึกที่สะท้อนคลื่น พร้อมทั้งใช้วิธีทางสถิติหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของการสะท้อนในวัสดุ

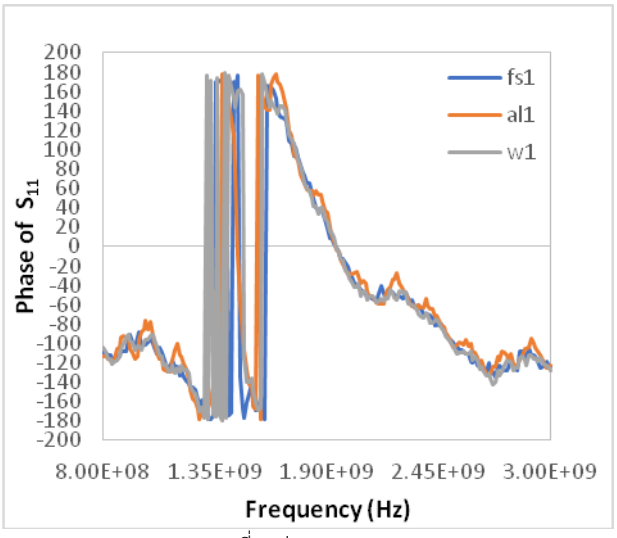
การทดลองวัดค่าการกระเจิงคลื่น S_{11} แสดงดังรูปที่ 2 วัดกรณีคลื่นเดินทางผ่านพื้นที่โล่ง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นไม้อัด ค่า S_{11} ที่ได้จากการวัดจะทำการการนอมัลไลซ์ดังรูปที่ 3

(ก) (ข)

รูปที่ 2 การวัดการกระเจิงคลื่น S_{11} ของ (ก) แผ่นอลูมิเนียม และ (ข) แผ่นไม้อัด

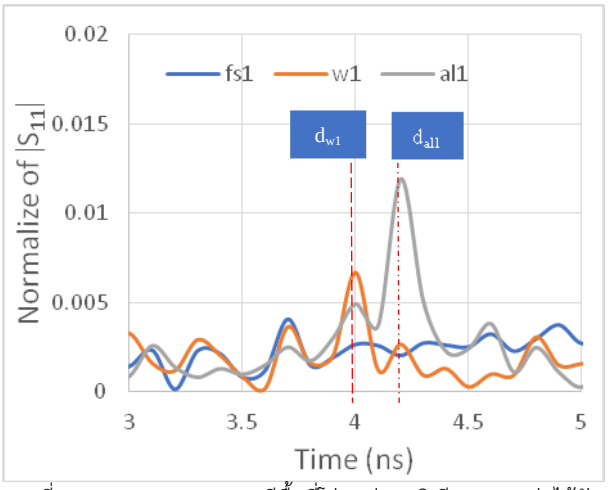


รูปที่ 3 ค่านอมัลไลซ์ขนาด S_{11}



รูปที่ 4 ค่าเฟสของ S_{11}

จากรูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าขนาดของ S_{11} โดย fs1 คือพื้นที่โล่ง al1 คือแผ่นอลูมิเนียม และ w1 คือแผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และนำค่าที่ได้พล็อตด้วยโปรแกรม Excel จะเห็นว่า al1 มีการสะท้อนกลับมากที่สุด ตามด้วย w1 และ fs1 ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติที่แผ่นอลูมิเนียมที่เป็นโลหะจะมีการสะท้อนกลับที่มากที่สุด และรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฟสของ S_{11} โดย fs1 คือพื้นที่โล่ง al1 คือ แผ่นอลูมิเนียม และ w1 คือแผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และนำค่าที่ได้พล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Excel จะได้ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ของทั้ง 3 กรณี คือ 180 องศา และ -180 องศา



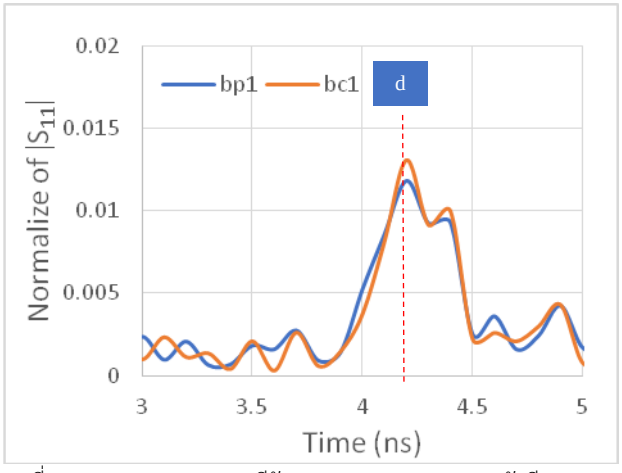
รูปที่ 5 ผลการแปลง IFFT กรณีพื้นที่โล่ง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นไม้อัด

จากรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการแปลง IFFT ของค่าขนาด S_{11} กรณีพื้นที่โล่ง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นไม้อัด โดยตำแหน่งการวางแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นไม้อัดอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ 60 cm สามารถคำนวณหาตำแหน่งแผ่นอลูมิเนียม (al1) ที่เวลา 4.2 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.012 คำนวณตำแหน่ง $d_{al1} = 3 \times 10^8 \times (4.2 \times 10^{-9}/2) = 63$ cm ความคลาดเคลื่อน $|(60-63)/60| \times 100 = 5\%$ และคำนวณหาตำแหน่งแผ่นไม้อัด(w1) ที่เวลา 4 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.007 คำนวณตำแหน่ง $d_{w1} = 3 \times 10^8 \times (4 \times 10^{-9}/2) = 60$ cm ความคลาดเคลื่อน $|(60-60)/60| \times 100 = 0\%$

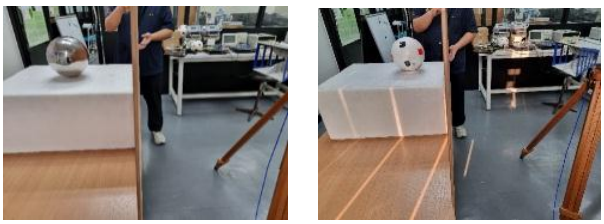
(ก) (ข)

รูปที่ 6 การทดลองวัดคลื่นผ่าน (ก) วัตถุทรงกลมแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm (ข) วัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลการแปลง IFFT ของค่าขนาด S_{11} กรณีวางวัตถุทรงกลมสแตนเลสและพลาสติกห่างจากสายอากาศปากแตรเป็นระยะสนามไกล 60 cm โดยตลอดทุกช่วงความถี่มีการกระจายตัวของการสะท้อนที่ใกล้เคียงกัน ที่เวลา 4.2 ns วัตถุทรงกลมสแตนเลสมีค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.013 และวัตถุทรงกลมพลาสติกมีค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.011 คำนวณระยะ $d = 3 \times 10^8 \times (4.2 \times 10^{-9}/2) = 63$ cm คลาดเคลื่อน $= |(60-63)/60| \times 100 = 5\%$



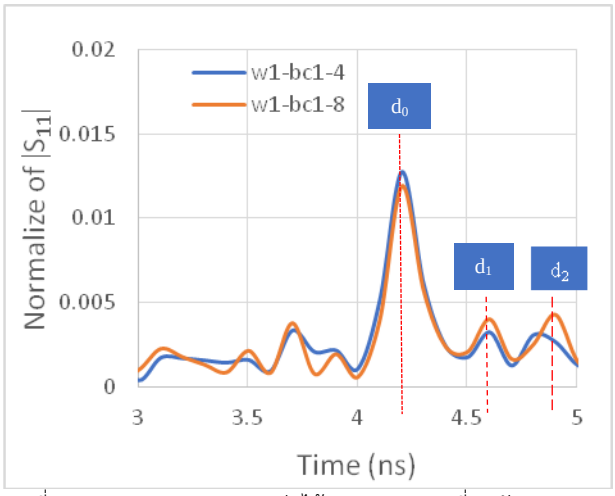
รูปที่ 7 ผลการแปลง IFFT กรณีวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm และพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm



(ก) (ข)

รูปที่ 8 การทดลองวัดคลื่นผ่านแผ่นไม้และมี (ก) วัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm และ (ข) วัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm วางอยู่ด้านหลัง

จากรูปที่ 8 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์โดยวางวัตถุทรงกลมสแตนเลสและพลาสติกวางอยู่ด้านหลังแผ่นไม้อัดหนา 10 mm โดยแผ่นไม้ห่างจากสายอากาศ 60 mm และวัตถุทรงกลมมีการเปลี่ยนระยะห่างจากแผ่นไม้ที่ 4 cm และ 8 cm ตามลำดับ



รูปที่ 9 ผลการแปลง IFFT ของแผ่นไม้ขนาด 10 mm ที่วางวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm ที่ระยะ 4 cm และ 8 cm

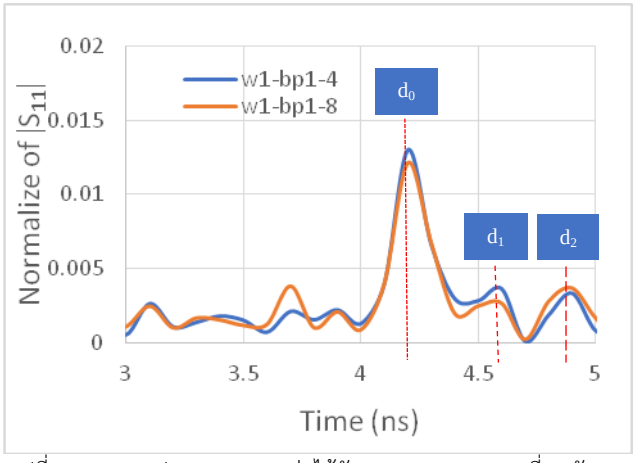
จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลการแปลง IFFT ของแผ่นไม้ขนาด 10 mm ที่วางวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm ห่างกัน 4 cm และ 8 cm โดย w1-bc1-4 คือ แผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm และมีวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm วางข้างหลังห่าง 4 cm w1-bc1-8 คือ แผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm และมีวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm วางข้างหลังห่าง 8 cm จะสามารถคำนวณตำแหน่งได้ดังนี้

ตำแหน่งแผ่นไม้ตั้งไว้ที่ 60 cm กรณี w1-bc1-4 และ w1-bc1-8 ที่เวลา 4.2 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.013 และ 0.012 ตามลำดับ คำนวณตำแหน่ง $d_0 = 3 \times 10^8 \times (4.2 \times 10^{-9}/2) = 63$ cm คลาดเคลื่อน $= |(60-63)/60| \times 100 = 5\%$

w1-bc1-4 ตั้งไว้ที่ 64 cm ที่เวลา 4.6 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.003 คำนวณตำแหน่ง $d_1 = 3 \times 10^8 \times (4.6 \times 10^{-9}/2) = 69$ cm คลาดเคลื่อน $= |(64-69)/64| \times 100 = 7.81\%$

w1-bc1-8 ตั้งไว้ที่ 68 cm ที่เวลา 4.9 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.004 คำนวณตำแหน่ง $d_2 = 3 \times 10^8 \times 4.9 \times 10^{-9}/2 = 73.5$ cm คลาดเคลื่อน $= |(68-73.5)/68| \times 100 = 8.01\%$

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการแปลง IFFT ของแผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm ที่วางวัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm ห่างกัน 4 cm และ 8 cm อยู่ด้านหลัง โดย w1-bp1-4 คือ แผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm และมีวัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm วางข้างหลังห่าง 4 cm w1-bp1-8 คือ แผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm และมีลูกบอลพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm วางข้างหลังห่าง 8 จะสามารถคำนวณตำแหน่งได้ดังนี้



รูปที่ 10 ผลการแปลง IFFT ของแผ่นไม้อัดหนาขนาด 10 mm ที่วางวัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm ห่างกัน 4 cm และ 8 cm

ตำแหน่งแผ่นไม้ตั้งไว้ที่ 60 cm กรณี w1-bp1-4 และ w1-bp1-8 ที่เวลา 4.2 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.012 และ 0.011 ตามลำดับ คำนวณตำแหน่ง $d_0 = 3 \times 10^8 \times (4.2 \times 10^{-9}/2) = 63$ cm คลาดเคลื่อน $= |(60-63)/60| \times 100 = 5\%$

w1-bp1-4 ตั้งไว้ที่ 64 cm ที่เวลา 4.6 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.0036 คำนวณตำแหน่ง $d_1 = 3 \times 10^8 \times (4.6 \times 10^{-9}/2) = 69$ cm, คลาดเคลื่อน $= |(64-69)/64| \times 100 = 7.81\%$

w1-bp1-8 ตั้งไว้ที่ 68 cm ที่เวลา 4.9 ns ค่าขนาด S_{11} สูงสุด 0.0037 คำนวณตำแหน่ง $d_2 = 3 \times 10^8 \times 4.9 \times 10^{-9}/2 = 72$ cm คลาดเคลื่อน $= |(68-72)/68| \times 100 = 5.88\%$

4. บทสรุป

การทดลองส่งคลื่นผ่านสายอากาศปากแตรไปยังสิ่งกีดขวางที่เป็นแผ่นตัวนำและฉนวนแล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ตั้งแต่ช่วงความถี่ 800 MHz ถึง 3 GHz นำผลการวัดเปรียบเทียบค่าขนาดของ S_{11} กรณีพื้นที่โล่ง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นไม้อัดที่ผ่านการนอมัลไลซ์เพื่อปรับสเกลของตัวกลางแต่ละประเภทให้เปรียบเทียบกันได้และคำนวณตำแหน่งวัตถุแนวลึกหลังสิ่งกีดขวางด้วยการใช้ IFFT พบว่าสามารถระบุตำแหน่งวัตถุทรงกลมสแตนเลส และพลาสติกได้หลังแผ่นไม้อัดหนา 10 mm การเปลี่ยนตำแหน่งวางวัตถุทรงกลมอยู่หลังแผ่นไม้อัดลูกละสองระยะ พบว่าสามารถตรวจจับวัตถุทรงกลมสแตนเลสและพลาสติกได้ทั้งสองประเภท โดยวัตถุทรงกลมสแตนเลสขนาดรัศมี 6.3 cm มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย คือ 7.91% และกรณีวัตถุทรงกลมพลาสติกขนาดรัศมี 7 cm มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคือ 6.85% จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นเครื่องมือตรวจสอบต่างๆ เช่น เครื่องตรวจหาวัตถุแปลกปลอม เครื่องตรวจสอบโลหะ เครื่องตรวจสอบวัตถุระเบิด เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Yoiyod and M. Krairiksh, “Dielectric properties determination of a stratified medium,” *Journal of Radioengineering*, vol. 24, no. 1, pp. 70-79, Apr. 2015.

[2] Ioannis K. Kapoulas, Antonios Hatziefremidis, A. K. Baldoukas, Evangelos S. Valamontes and J. C. Statha, “Small Fixed-Wing UAV Radar Cross-Section Signature Investigation and Detection and Classification of Distance Estimation Using Realistic Parameters of a Commercial Anti-Drone System,” *Journal of Drones*, vol. 7, no. 39, pp. 1-26, Jan. 2023.

[3] จิรกิตติ์ โล่สัมฤทธิ์ ไพบูลณ์ ย้อยหยด ภมินทร์ ขวัญมณี พรเทพ บญยเนตร และ กิตติศักดิ์ ไตรพิพัฒพรชัย “การศึกษาการวัดความชื้นข้าวเปลือกหอมมะลิสุรินทร์ (กข 15) ด้วยการใช้คลื่นไมโครเวฟ,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46, 15-17 พฤศจิกายน 2566, หน้า 570-573.

[4] นภดนย์ ตำนานทอง, วีรวัฒน์ อ่อนแก้ว และ สุวิทย์ ทองปิ่น(2548), การศึกษาคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟและวัดคลื่นรั่วไหลจากตู้อบไมโครเวฟ(ปริญญานิพนธ์), พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] จาตุพงศ์ วาฤทธิ์, วารุณี ศิริขจรจารุ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2548), การใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่มะม่วง(รายงานผลการวิจัย), กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[6] มนตรี ไชยชาญยุทธ์ และสุพันธ์ ตั้งจิตกุศลมั่น, “นวัตกรรมใหม่ในการรักษามะเร็งตับด้วยคลื่นความถี่ไมโครเวฟ,”*วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* ปีที่ 24 ฉบับที่ 2, พ.ค.-ส.ค. 2557.

[7] P. Yoiyod, S. Pathoumvanh, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, “Analysis of a Sensor using Rician k-factor for Identification of a Spherical Conductor Submerged in Soil,” *In Proc. 23th International Symposium Antennas and Propagation (ISAP2018)*, Busan, Korea, Dec. 2018.

[8] Rémi Baqué, Luc Vignaud, Valentine Wasik, Nicolas Castet, Reinhold Herschel, Harun Cetinkaya and Thomas Brandes, “MIC: Microwave Imaging Curtain for Dynamic and Automatic Detection of Weapons and Explosive Belts,” *Journal of Sensors*, vol. 23, no. 9531, pp.1-26, Nov. 2023.

[9] Yanlong Zheng, Zian He, Huanyu Fu, Qi Zhang and Jianchun Li, “Microwave heating and fracturing of concrete with different aggregates: An experimental and numerical study,” *Journal of Construction and Building Materials*, vol.47, pp.1-13, Mar. 2025.

[10] โมโนย ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ พิมพ์สวย, 2544.

นาย ภูมิกร จันทร์แป้น นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจทางด้านไฟฟ้ากำลัง

นาย ณัฐชนน สุขเกษม นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจทางด้านไฟฟ้ากำลัง

นาย จิรกิตติ์ โล่สัมฤทธิ์ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจทางด้านไฟฟ้าสื่อสารและการประยุกต์คลื่นไมโครเวฟ

ผศ.ดร.ไพบูลณ์ ย้อยหยด อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟทางการเกษตร

ผศ.ดร.สุพัฒนา นิรัคฆนาภรณ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจด้านการวางแผนระบบไฟฟ้า การวางแผนและนโยบายพลังงาน การอนุรักษ์พลังงาน และพลังงานหมุนเวียน

อาจารย์ภูมินทร์ ขวัญมุณี อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจด้านระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานหมุนเวียน

อาจารย์กิตติศักดิ์ ไตรพิพัฒพรชัย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต งานวิจัยที่สนใจด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการออกแบบระบบไฟฟ้า