PIN DIODE MODEL 1

ออกแบบและทดสอบ Unit Cell สำหรับ Reconfigurable Metasurface โดยใช้ PIN Diode เป็นอุปกรณ์ควบคุม Phase ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 20 GHz (K-Band) ผลลัพธ์สูงสุดคือการสาธิต Full Array ขนาด 8×8 ที่มี PIN Diode ทั้งสิ้น 64 ตัว ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งในโหมด ON ทั้งหมด โหมด OFF ทั้งหมด และโหมด Random ON-OFF

1. วัตถุประสงค์

1. ออกแบบ Unit Cell รูปตัว I ให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 20 GHz
2. หา PIN Diode ที่สร้าง Phase Difference ระหว่าง ON-OFF ได้ 180 ± 10 องศา
3. ตรวจสอบประสิทธิภาพของแผ่น Full Array ขนาด 8×8 ผ่านการ Simulation

2. ผลลัพธ์ที่ต้องการ

1. สร้าง Unit Cell รูปตัว I อย่างง่ายที่มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 20 GHz
2. เพิ่ม PIN Diode ลงใน Unit Cell โดยให้ Phase Difference (ON – OFF) มีค่า 180 ± 10 องศา
3. ได้กราฟ S11 (dB และ Phase) พร้อม Surface Current ที่ 20 GHz สำหรับแต่ละ PIN Diode
4. นำ Unit Cell ที่เลือกได้มาจัดเรียงเป็น Full Array 8×8 และทำการ Simulation 3 โหมดหลัก
5. บันทึก RCS ในรูปแบบ 1D (Polar และ Cartesian) และ 3D (Top view) ทั้งแบบ Linear และ dB

3. แผนการทำงาน

Step 1: การออกแบบ Unit Cell รูปตัว I

- กำหนดวัสดุ (Substrate) ที่เหมาะสมจากความถี่เรโซแนนซ์เป้าหมาย 20 GHz
- คำนวณขนาดโครงสร้างเบื้องต้นและสร้าง Model ใน Simulation Software
- ทำ Simulation เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง Resonance Point
- Optimization พารามิเตอร์ (ความยาว ความกว้าง ช่องว่าง) เพื่อให้ Resonance อยู่ที่ 20 GHz

- บันทึกกราฟ S11 (dB) และ S11 (Phase)

Step 2: การหา PIN Diode ที่เหมาะสม

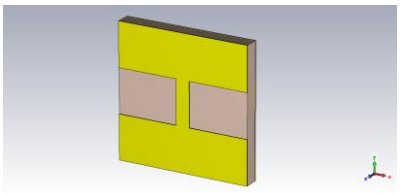
- คัดเลือก PIN Diode ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ 14–26 GHz
- จำลอง PIN Diode แต่ละรุ่นทั้งสิ้น 5 รุ่น บน Unit Cell
- เปรียบเทียบ Phase Difference (ON – OFF) และเลือกรุ่นที่ให้ค่าใกล้เคียง 180 องศา
- บันทึก S11 (dB, Phase) และ Surface Current ที่ 20 GHz สำหรับทุกรุ่น

Step 3: Full Array 8×8 และ Phase Coding

- จัดเรียง Unit Cell เป็น Full Array 8×8 รวม PIN Diode 64 ตัว
- ทดสอบ 5 โหมด ON ทั้งหมด โหมด OFF ทั้งหมด และโหมด Random ON-OFF
- บันทึก Surface Current, RCS 1D (Polar & Cartesian, dB & Linear), RCS 3D (Top view)

4. โครงสร้าง Unit Cell

4.1 การออกแบบ Unit Cell

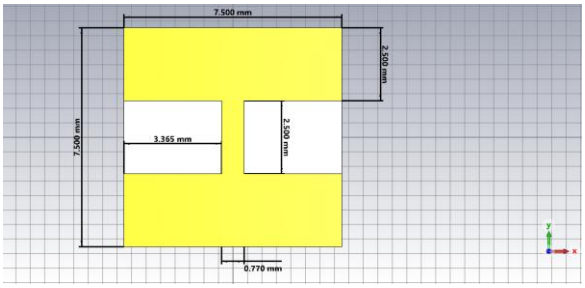


รูปที่ 1 แสดงโครงสร้าง Unit Cell รูปตัว I

Unit Cell ถูกออกแบบในรูปทรงตัว I (I-shaped patch) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบบ่อยในงาน Frequency Selective Surface (FSS) และ Metasurface เนื่องจากมีลักษณะสมมาตร ควบคุมพารามิเตอร์ได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นในการ Tune ความถี่เรโซแนนซ์

พารามิเตอร์หลักของ Unit Cell

- ความถี่เรโซแนนซ์เป้าหมาย: 20 GHz
- ช่วงความถี่ทำงาน: 14 – 26 GHz
- รูปแบบโครงสร้าง: I-Shaped Patch (ตัว I)
- ชั้นโลหะ: Copper (σ = 5.8×10^{7} S/m)
- Substrate: Rogers RO4003C (εr ≈ 3.55, tan δ ≈ 0.0027)



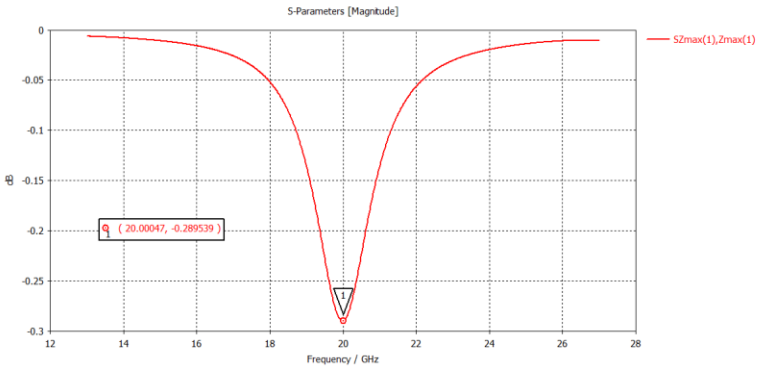
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้าง Unit Cell รูปตัว I

4.2 การปรับโครงสร้าง

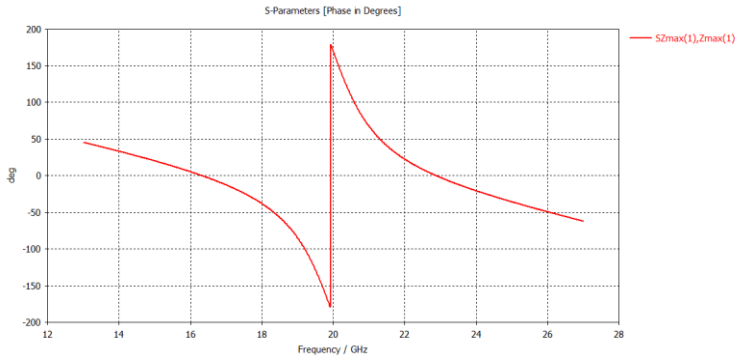
- ความยาวแขนบนและล่างของรูป I ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์หลัก
- ความกว้างของลำตัวกลาง ส่งผลต่อ Bandwidth และ Q-factor

- ช่องว่างสำหรับติดตั้ง PIN Diode (Gap) กำหนดตามข้อกำหนดของ PIN Diode แต่ละรุ่น

เป้าหมายของการ Optimization คือให้ S11 มีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่ 20 GHz และมี Phase Difference ระหว่าง Mode ON กับ Mode OFF ประมาณ 180 ± 10 องศา



รูปที่ 3 แสดงกราฟ S11 (dB) ของ Unit Cell ก่อนใส่ PIN Diode



รูปที่ 4 แสดงกราฟ S11 (Phase) ของ Unit Cell ก่อนใส่ PIN Diode

4.3 การเลือก PIN Diode

ในการเลือก PIN Diode พิจารณาจากช่วงความถี่ที่ใช้งาน (24-28 GHz) และ Simulation เพื่อพิจารณา S-parameter เมื่อทำการ ON-OFF ที่ทำให้เกิด Phase ต่างกัน 180 องศา ซึ่ง PIN Diode ที่เลือกมามีดังนี้

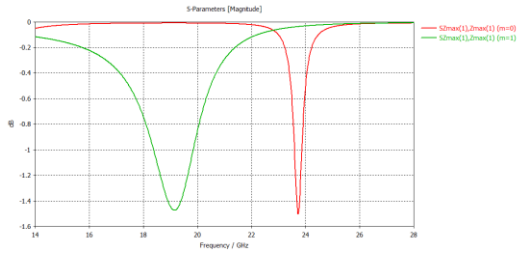
ตารางที่ 1 ตารางสรุปพารามิเตอร์ของ PIN Diode แต่ละรุ่น

ลำดับ	รุ่นอุปกรณ์	Gap (mm)	On Mode (State = 1)	Off Mode (State = 0)
1	MA4AGP907 PIN Diode	0.33	Rs = 4.2 Ω	Ct = 0.025 pF
2	SMP1345-079LF PIN Diode (SC-79)	0.50	Rs = 1.5 Ω, L = 0.7 nH	Ct = 0.18 pF, L = 0.7 nH
3	SMP1345-079LF PIN Diode (SOD-882)	0.50	Rs = 1.5 Ω, L = 0.45 nH	Ct = 0.18 pF, L = 0.45 nH
4	MA4AGP907 PIN Diode	0.33	Rs = 5.2 Ω	Ct = 0.025 pF
5	MLP7140-11 PIN Diode	0.28	Rs = 2 Ω	Ct = 0.10 pF

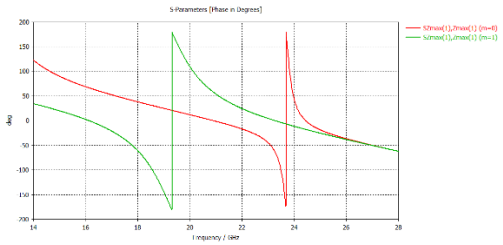
4.4 Simulation PIN Diode

ทำการ Simulation Unit Cell ร่วมกับ PIN Diode แต่ละรุ่น โดยวิเคราะห์ S11 (dB และ Phase) และ Surface Current ที่ความถี่ 20 GHz ในสภาวะ ON และ OFF

4.4.1 MA4AGP907 PIN Diode

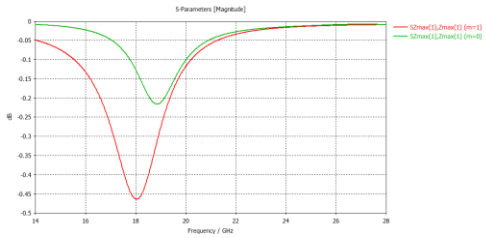


รูปที่ 5 กราฟ S11 (dB) ของ MA4AGP907 (Rs = 4.2 Ω)

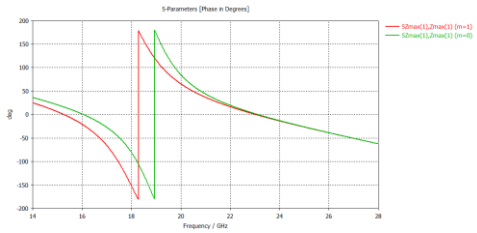


รูปที่ 6 กราฟ S11 (Phase) ของ MA4AGP907 (Rs = 4.2 **Ω**)

4.4.2 SMP1345-079LF PIN Diode (SC-79)

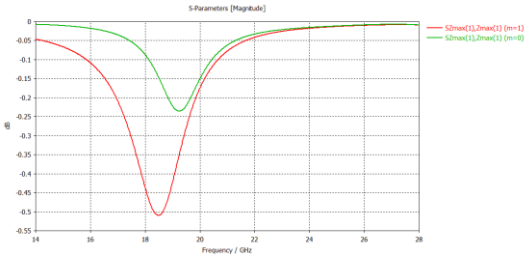


รูปที่ 7 กราฟ S11 (dB) ของ SMP1345-079LF (SC-79)

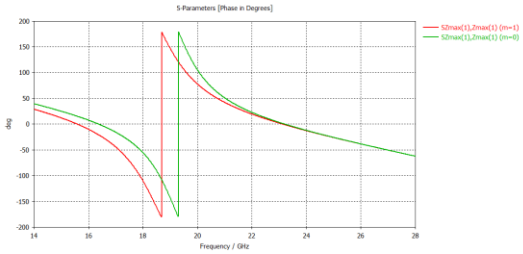


รูปที่ 8 กราฟ S11 (Phase) ของ SMP1345-079LF (SC-79)

4.4.3 SMP1345-079LF PIN Diode (SOD-882)

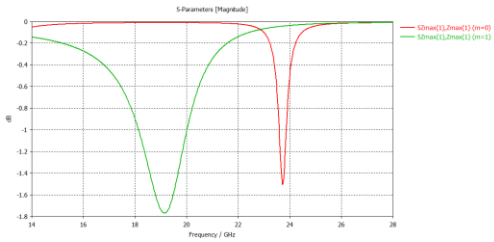


รูปที่ 9 กราฟ S11 (dB) ของ SMP1345-079LF (SOD-882)

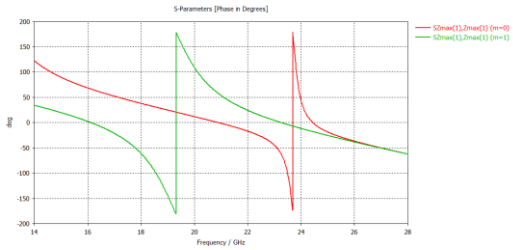


รูปที่ 10 กราฟ S11 (Phase) ของ SMP1345-079LF (SOD-882)

4.4.4 MA4AGP907 PIN Diode

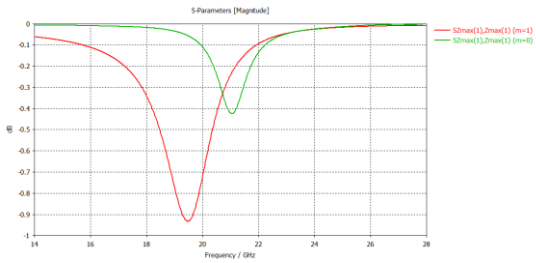


รูปที่ 11 กราฟ S11 (dB) ของ MA4AGP907 (Rs = 5.2 Ω)

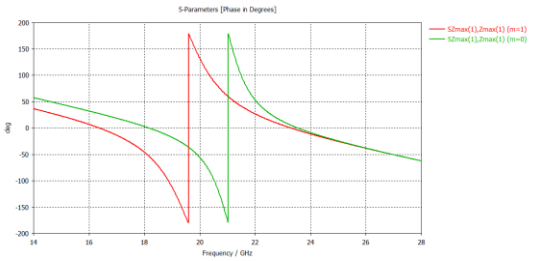


รูปที่ 12 กราฟ S11 (Phase) ของ MA4AGP907 (Rs = 5.2 Ω)

4.4.5 MLP7140-11 PIN Diode



รูปที่ 13 กราฟ S11 (dB) ของ MLP7140-11 (Rs = 2 Ω)



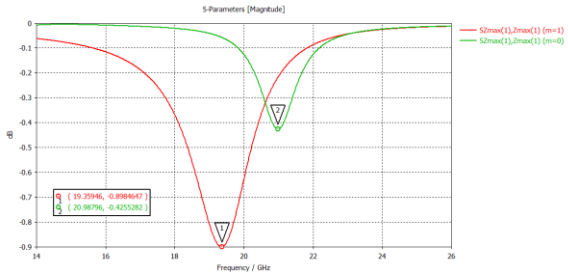
รูปที่ 14 กราฟ S11 (phase) ของ MLP7140-11 (Rs = 2 Ω)

4.5 สรุปโครงสร้าง Unit Cell

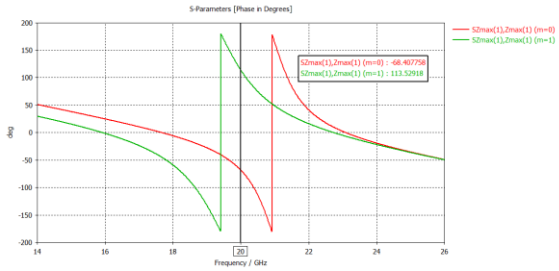
จากการ Simulation PIN Diode ทั้ง 5 รุ่น ผลสรุปคือเลือกใช้ MLP7140-11 เนื่องจากให้ Phase Difference ที่ 180 ± 10 องศา ที่ความถี่ 20 GHz ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการสร้าง 1-bit Reconfigurable Metasurface

Unit Cell สุดท้ายที่นำไปใช้ใน Full Array 8×8 มีลักษณะดังนี้

- โครงสร้าง: I-shaped patch พร้อม PIN Diode MLP7140-11 วางที่ตำแหน่ง Gap กลาง
- Gap: 0.28 mm
- Mode ON (State = 1): PIN Diode Forward Bias, Rs = 2 Ω
- Mode OFF (State = 0): PIN Diode Reverse Bias, Ct = 0.10 pF
- Phase Difference: 180 ± 10 องศา ที่ 20 GHz

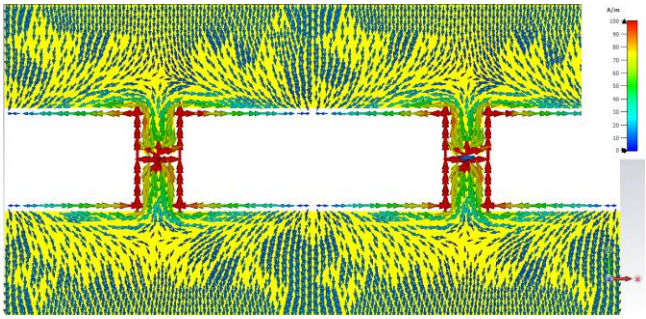


รูปที่ 15 กราฟ S11 (dB) Mode ON และ Mode OFF ของ MLP7140-11



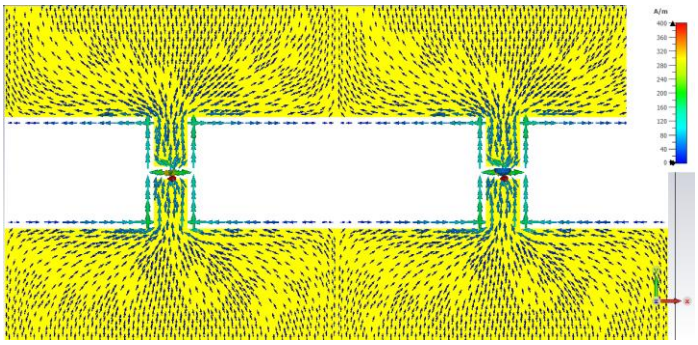
รูปที่ 16 กราฟ S11 (Phase) Mode ON และ Mode OFF ของ MLP7140-11

- **MODE ON**



รูปที่ 17 Surface Current ที่ 20 GHz โหมด ON ของ MLP7140-11

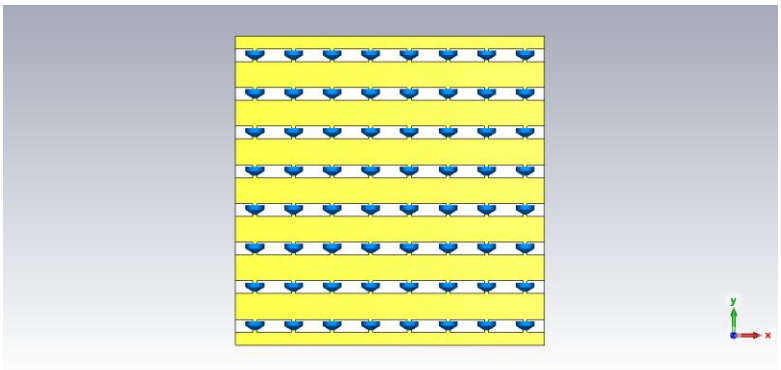
- **MODE OFF**



รูปที่ 18 Surface Current ที่ 20 GHz โหมด OFF ของ MLP7140-11

5. Full Array 8x8

นำ Unit Cell ที่ออกแบบได้มาจัดเรียงเป็นอาร์เรย์ขนาด 8×8 รวม PIN Diode ทั้งสิ้น 64 ตัว เพื่อทดสอบสมรรถนะของ Metasurface ในระดับอาร์เรย์ โดยการทดสอบใช้ Plane Wave ในการกระตุ้น (Incident Wave) ที่มุมต่างกัน 3 ค่า คือ 0°, 30° และ 60°



รูปที่ 19 Full Array 8x8

5.1 Plane Wave

การ Simulation ใช้ Plane Wave เป็น Excitation เพื่อจำลองการทำงานจริงของ Metasurface เมื่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นวิทยุจากระยะไกล (Far-field Incidence)

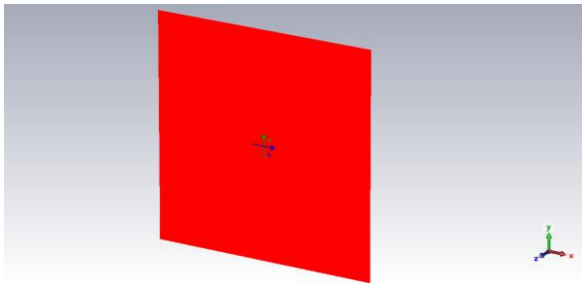
พารามิเตอร์การ Simulation Full Array:

- ความถี่: 20 GHz
- Excitation: Plane Wave
- มุมกระทบ (θnc): 0°, 30°, 60°
- ข้อมูลที่บันทึก: Surface Current, RCS 1D (Polar & Cartesian), RCS 3D (Top view)
- รูปแบบข้อมูล: Linear scale และ dB scale

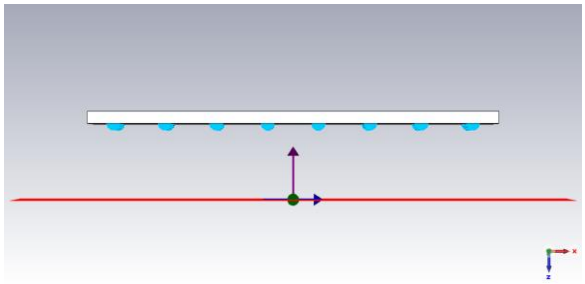
เมื่อ Plane Wave ตกกระทบแผ่น Full Array ส่วนหนึ่งของคลื่นจะถูกสะท้อนกลับโดยแผ่นโลหะ ในขณะที่ส่วนที่ผ่านช่องว่างรอบขอบแผ่นจะวิ่งต่อเนื่องไปทางด้านหลัง บริเวณด้านหลังแผ่นที่ถูกบังทางกายภาพจะเกิดเป็น Shadow Region ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับฉายของแผ่น ปรากฏการณ์นี้ทำให้โปรแกรม Simulation บันทึก Peak ขนาดใหญ่ที่มุมทิศทางเดียวกับที่คลื่นวิ่งไป ซึ่งเป็น Forward Scattering ไม่ใช่ Back Scattering

5.1.1 ทิศทางการยิง Plane Wave ที่ 0 องศา

Plane Wave กระทบตั้งฉากกับแผ่น Metasurface (Normal Incidence, θ = 0°) ซึ่งเป็นกรณีที่คลื่นตกกระทบตรงที่สุดและเป็นกรณีอ้างอิงมาตรฐาน



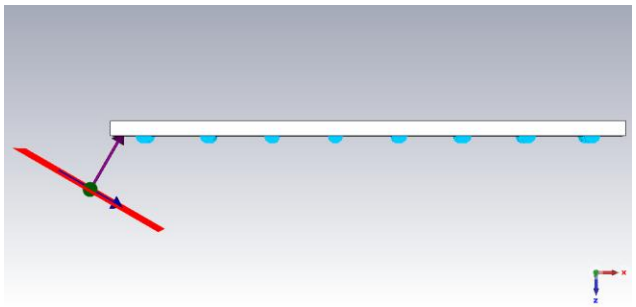
รูปที่ 20 แผนภาพทิศทาง Plan Wave มุม 0 องศา



รูปที่ 21 แผนภาพทิศทาง Plan Wave มุม 0 องศา

5.1.2 ทิศทางการยิง Plane Wave ที่ 30 องศา

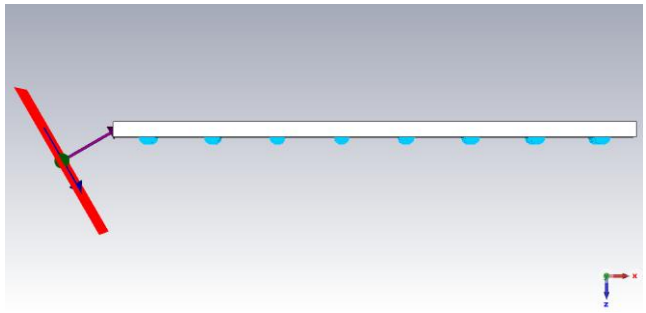
Plane Wave กระทบทำมุม 30° กับแกนปกติ (Oblique Incidence) เป็นการทดสอบสมรรถนะเมื่อคลื่นมาจากมุมเฉียง ซึ่งมักพบในการใช้งานจริง



รูปที่ 22 แผนภาพทิศทาง Plane Wave มุม 30 องศา

5.1.3 ทิศทางการยิง Plane Wave ที่ 60 องศา

Plane Wave กระทบทำมุม 60° ซึ่งเป็นมุมเฉียงสูง ใช้ทดสอบขอบเขตสมรรถนะของ Metasurface เมื่อมุมตกกระทบมีค่าสูง



รูปที่ 23 แผนภาพทิศทาง Plane Wave มุม 60 องศา

5.2 การ Simulation Full Array

ในการทดสอบนี้ทำการ Simulation ทั้งหมด 9 กรณี (3 โหมด × 3 มุม) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

หัวข้อ	**การกำหนดค่า PIN Diode**	**Plane Wave**	**ข้อมูลที่บันทึก**
5.2.1	MODE ON ทั้งหมด (64 ตัว ON)	Plane Wave 0°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 30°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 60°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)

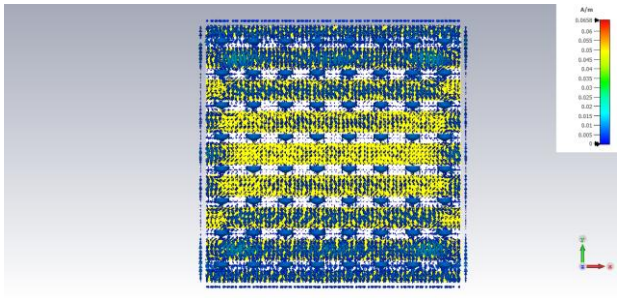
5.2.2	MODE OFF ทั้งหมด (64 ตัว OFF)	Plane Wave 0°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 30°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 60°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
5.2.3	Column 1-2, 5-6 ON / Column 3-4, 7-8 OFF	Plane Wave 0°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 30°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)
		Plane Wave 60°	Surface Current, RCS 1D/3D (Polar & Cartesian, dB & Linear)

5.2.1 MODE ON ทั้งหมด (PIN Diode 64 ตัว ON)

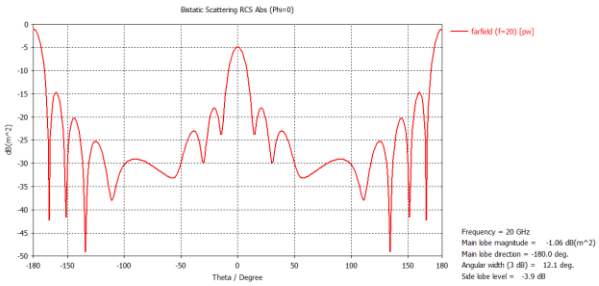
ในโหมดนี้ PIN Diode ทั้ง 64 ตัวอยู่ในสภาวะ Forward Bias (State = 1) คลื่นที่สะท้อนจาก Metasurface จะมี Phase ตรงกันทั่วทั้งแผ่น ทำให้เกิดการสะท้อนแบบ Specular Reflection

5.2.1.1 Plane Wave มุม 0 องศา

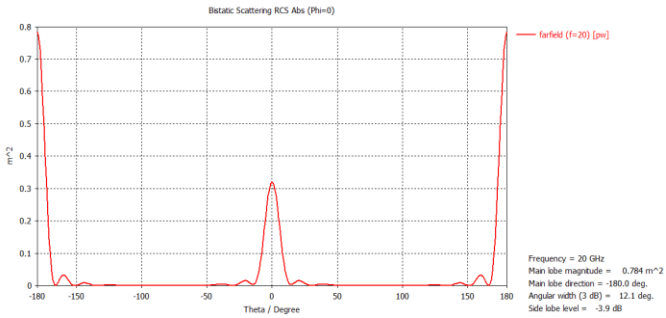
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: จาก Surface Current พบว่าการกระจายกระแสมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น สอดคล้องกับโหมด ON ที่ PIN Diode ทุกตัวอยู่ใน Forward Bias ส่งผลให้ Phase ของคลื่นสะท้อนมีความต่อเนื่องกันทั่วทั้ง Array เมื่อ Plane Wave ตกกระทบตั้งฉาก (θ = 0°) กับแผ่นที่มี Phase สม่ำเสมอ คลื่นสะท้อนจะเกิดการรวมเฟสแบบ Constructive Interference ไปในทิศทางตรงข้าม กราฟ RCS 1D จึงแสดง Peak หลักที่ 0° (Backscattering) ซึ่งเป็นพฤติกรรม Specular Reflection ตามทฤษฎี นอกจากนี้ยังพบ Peak ขนาดใหญ่ที่ 180° ซึ่งเกิดจาก Shadow Region ด้านหลังแผ่น คลื่นที่วิ่งผ่านขอบแผ่นโดยไม่ถูกสะท้อนยังคงแพร่กระจายต่อไปทางด้านหลัง ทำให้โปรแกรมบันทึกค่า RCS สูงในทิศทางที่คลื่นวิ่งไป (Forward Scattering) กราฟ 3D Top View ยืนยันรูปแบบการสะท้อนแบบ Symmetric รอบแกนปกติ



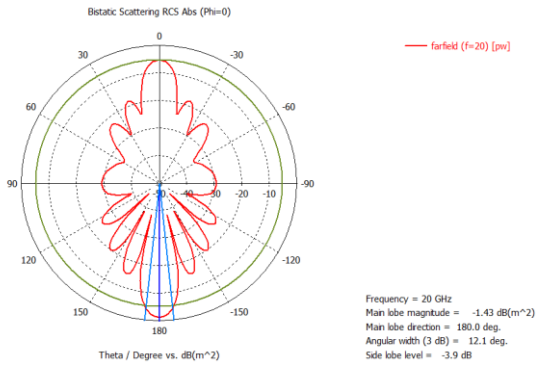
รูปที่ 24 Surface Current (20 GHz) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 0°



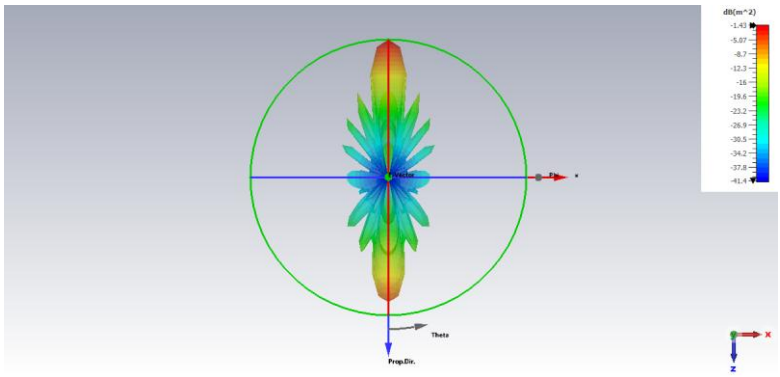
รูปที่ 25 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 0°



รูปที่ 26 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 0°



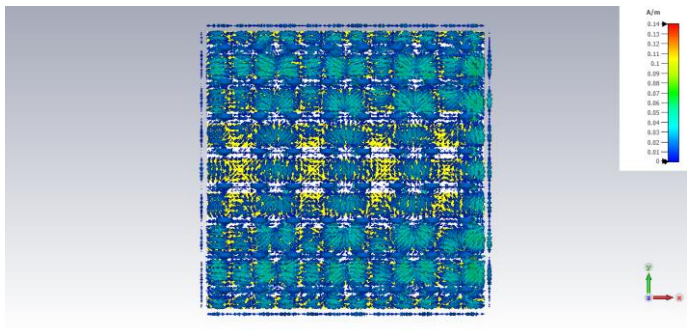
รูปที่ 27 RCS 1D Polar โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 0°



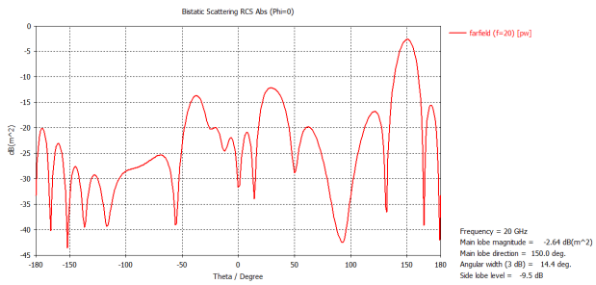
รูปที่ 28 RCS 3D Top view โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 0°

5.2.1.3 Plane Wave มุม 30 องศา

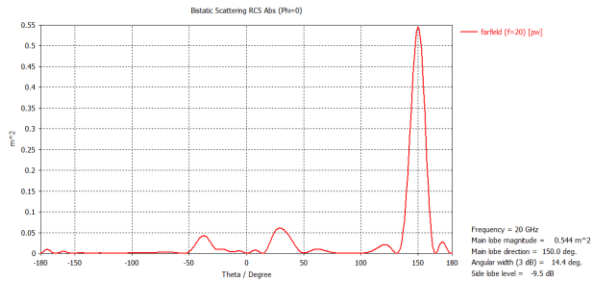
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: เมื่อ Plane Wave ตกกระทบที่มุม 30° (Oblique Incidence) แผ่น Metasurface ในโหมด ON ซึ่งมี Phase สม่ำเสมอจะสะท้อนคลื่นตาม Snell's Law คือคลื่นสะท้อนออกที่มุม 30° ด้านตรงข้าม (Specular Direction) กราฟ RCS 1D จึงแสดง Peak ที่ตำแหน่งมุม Specular แทนที่จะเป็น 0° เหมือนกรณีตกตั้งฉาก Peak ที่ 180° ยังคงปรากฏจากปรากฏการณ์ Shadow Region เช่นเดิม ส่วน Surface Current แสดงการกระจายที่เบ้ไปตามทิศทางการตกกระทบ สะท้อนถึงลักษณะของการตกกระทบแบบเฉียง



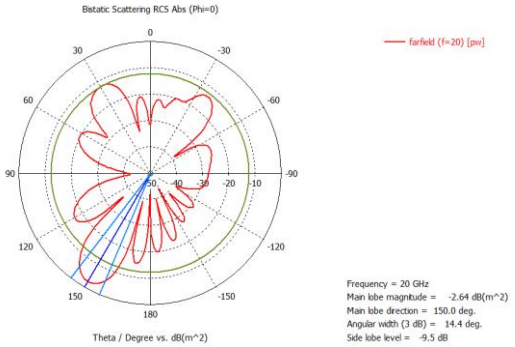
รูปที่ 29 Surface Current (20 GHz) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 30°



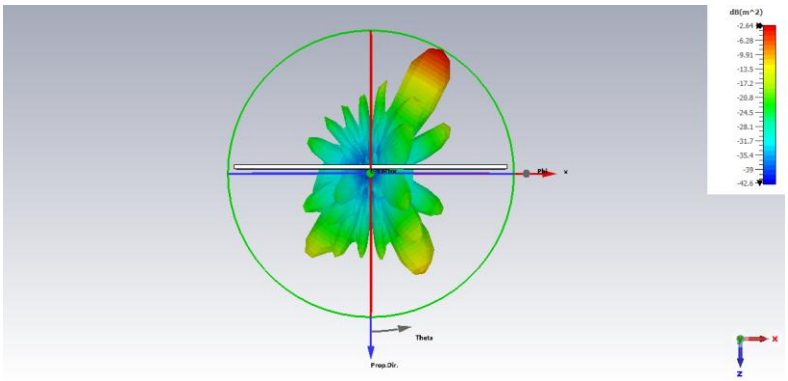
รูปที่ 30 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 30°



รูปที่ 31 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 30°



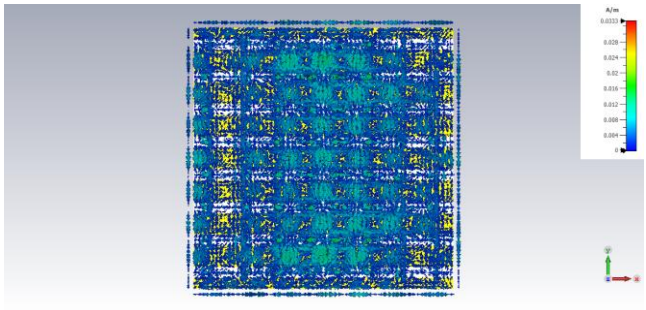
รูปที่ 32 RCS 1D Polar โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 30°



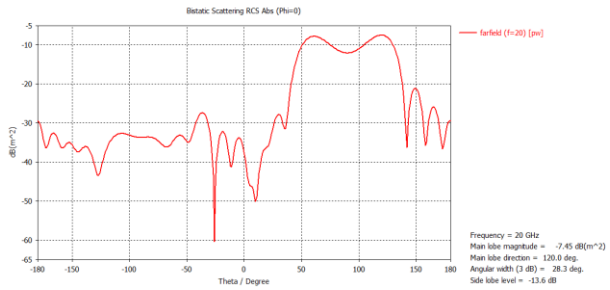
รูปที่ 33 RCS 3D Top view โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 30°

5.2.1.3 Plane Wave มุม 60 องศา

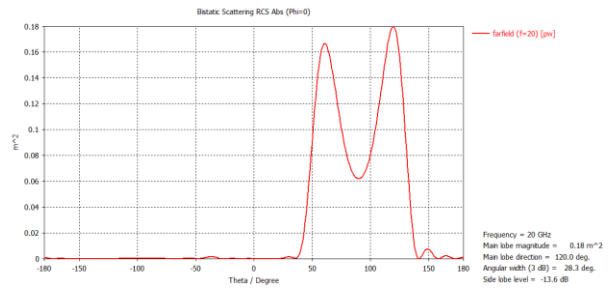
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: ที่มุมตกกระทบ 60° ซึ่งเป็นมุมเฉียงสูง คลื่นสะท้อนจากแผ่นโหมด ON จะออกที่มุม Specular ที่ 60° เช่นกัน แต่เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดการสะท้อน (Effective Aperture) ลดลงตาม cos(60°) ขนาด RCS Peak จึงมีค่าต่ำกว่ากรณี 0° และ 30° กราฟ RCS 1D แสดง Peak Specular ที่ชัดเจน พร้อมกับ Peak ที่ 180° จาก Shadow Region ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นสัมพัทธ์ เนื่องจากพลังงานที่สะท้อนกลับลดลง Surface Current บริเวณขอบแผ่นด้านที่รับคลื่นแสดงความเข้มสูงกว่าด้านอื่น ซึ่งเป็นผลจากมุมตกกระทบที่สูงทำให้การกระตุ้นไม่สม่ำเสมอ



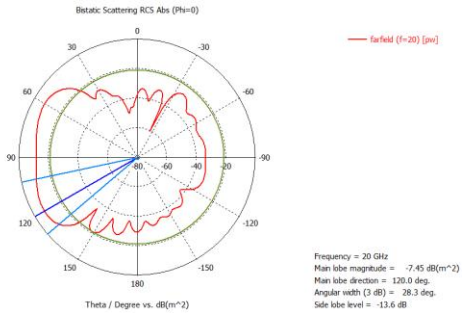
รูปที่ 34 Surface Current (20 GHz) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 60°



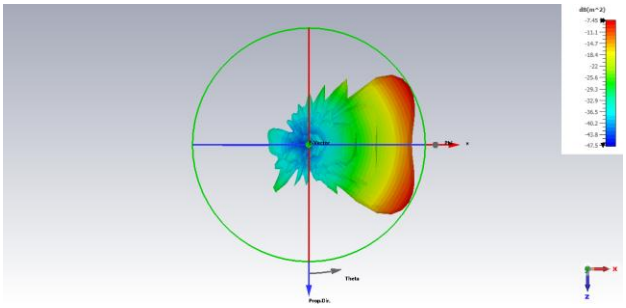
รูปที่ 35 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 60°



รูปที่ 36 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 60°



รูปที่ 37 RCS 1D Polar โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 60°



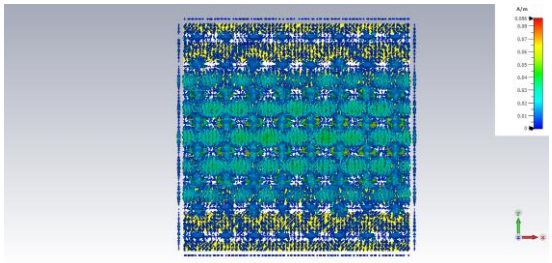
รูปที่ 38 RCS 3D Top view โหมด ON ทั้งหมด Plane Wave 60°

5.2.2 MODE OFF ทั้งหมด (PIN Diode 64 ตัว OFF)

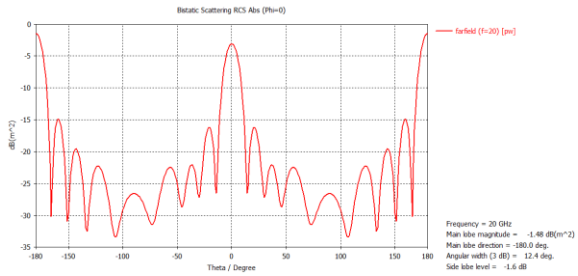
ในโหมดนี้ PIN Diode ทั้ง 64 ตัวอยู่ในสภาวะ Reverse Bias (State = 0) Phase ของคลื่นสะท้อนจาก Metasurface เปลี่ยนไป 180 องศาจากโหมด ON ทำให้เกิดรูปแบบการสะท้อนที่แตกต่างกัน

5.2.2.1 Plane Wave มุม 0 องศา

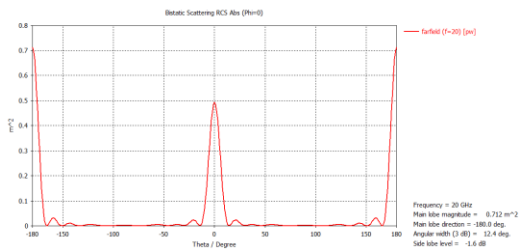
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: ในโหมด OFF PIN Diode ทั้ง 64 ตัวอยู่ใน Reverse Bias ทำให้ Phase ของคลื่นสะท้อนเปลี่ยนไปจากโหมด ON ประมาณ 180° อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น สำหรับ Plane Wave 0° รูปแบบ RCS โดยรวมยังคงแสดง Peak หลักที่ 0° เนื่องจาก Phase สม่ำเสมอยังคงทำให้เกิด Specular Reflection ตามทิศเดิม อย่างไรก็ตาม Amplitude ของ Peak อาจแตกต่างจากโหมด ON เนื่องจากค่า Impedance ของ Unit Cell ในโหมด OFF ต่างกัน ทำให้ Reflection Coefficient มีค่าไม่เท่ากัน Peak ที่ 180° จาก Shadow Region ยังคงปรากฏชัดเจน Surface Current แสดงการกระจายที่สม่ำเสมอแต่มีขนาดและ Pattern แตกต่างจากโหมด ON เนื่องจาก Impedance Loading ต่างกัน



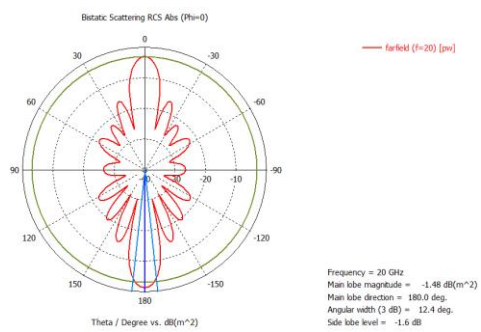
รูปที่ 39 Surface Current (20 GHz) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°



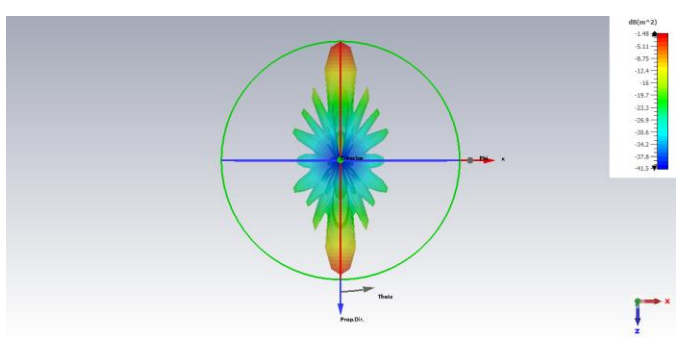
รูปที่ 40 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°



รูปที่ 41 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°



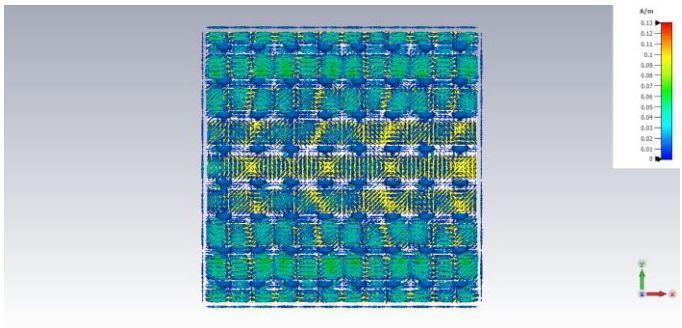
รูปที่ 42 RCS 1D Polar โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°



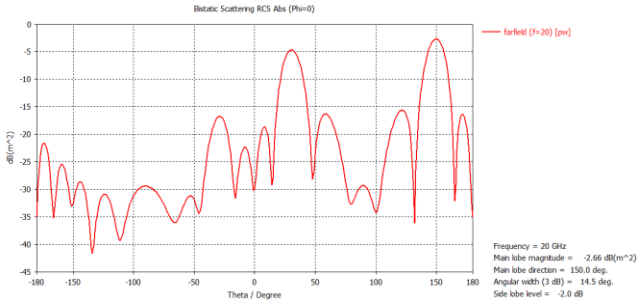
รูปที่ 43 RCS 3D Top view โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°

5.2.2.2 Plane Wave มุม 30 องศา

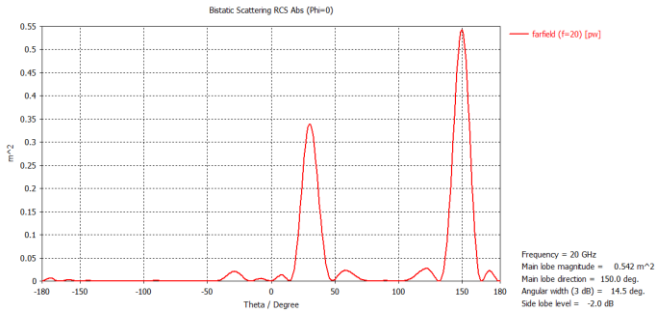
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: โหมด OFF ที่มุม 30° แสดงพฤติกรรม Specular Reflection ที่ตำแหน่งมุม Specular เช่นเดียวกับโหมด ON ที่มุมเดียวกัน เนื่องจาก Phase ยังคงสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ความแตกต่างหลักอยู่ที่ Absolute Phase ของคลื่นสะท้อน ซึ่งต่างจากโหมด ON ประมาณ 180° รูปแบบ RCS 1D ในเชิง Magnitude จึงคล้ายกับโหมด ON ที่ 30° แต่หากพิจารณาร่วมกับผลโหมด ON จะเห็นว่า Phase Difference นี้คือพื้นฐานของการทำงานแบบ 1-bit Coding Metasurface Peak ที่ 180° จาก Shadow Region ยังคงปรากฏ และ Surface Current แสดงการกระจายแบบเบ้ตามทิศการตกกระทบ



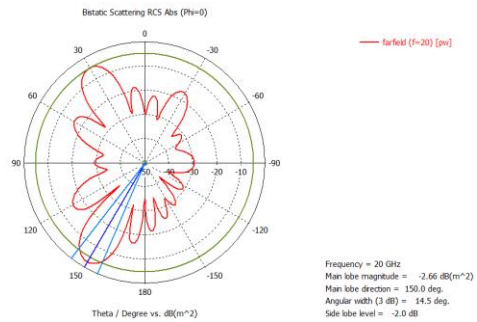
รูปที่ 44 Surface Current (20 GHz) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 30°



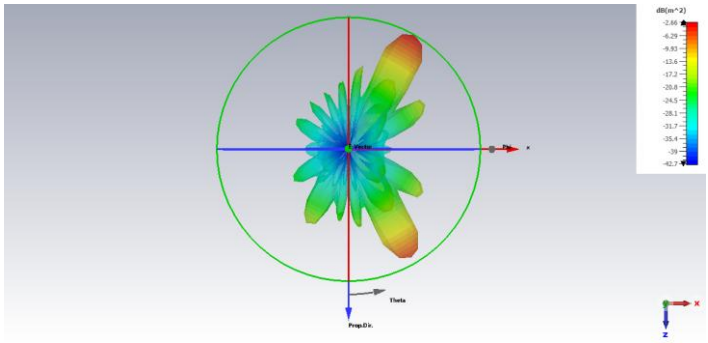
รูปที่ 45 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 30°



รูปที่ 46 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 0°



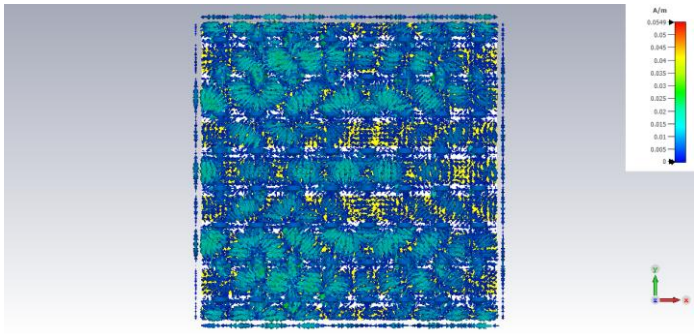
รูปที่ 47 RCS 1D Polar โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 30°



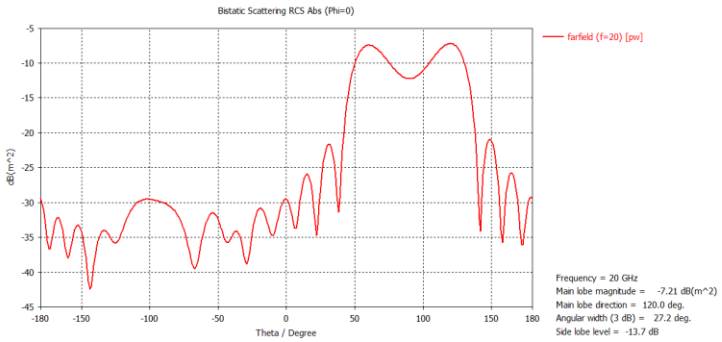
รูปที่ 48 RCS 3D Top view โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 30°

5.2.2.3 Plane Wave มุม 60 องศา

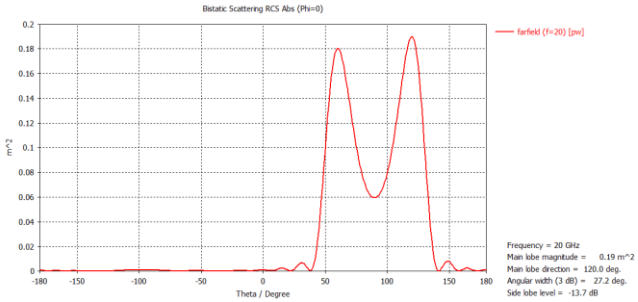
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: ที่มุมตกกระทบ 60° โหมด OFF แสดงรูปแบบ RCS ที่คล้ายคลึงกับโหมด ON แต่เมื่อพิจารณา Phase ของคลื่นสะท้อนจะพบความแตกต่าง 180 องศา ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของหลักการ 1-bit Metasurface



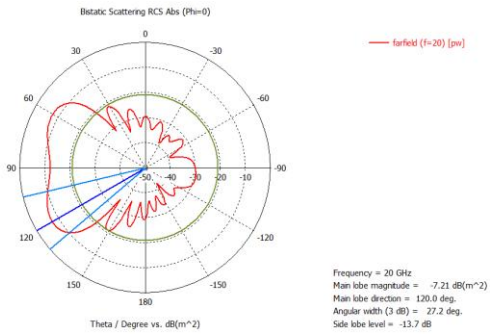
รูปที่ 49 Surface Current (20 GHz) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 60°



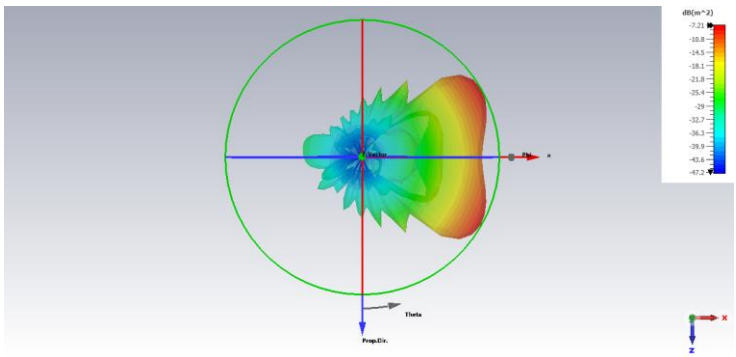
รูปที่ 50 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 60°



รูปที่ 51 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 60°



รูปที่ 52 RCS 1D Polar โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 60°



รูปที่ 53 RCS 3D Top view โหมด OFF ทั้งหมด Plane Wave 60°

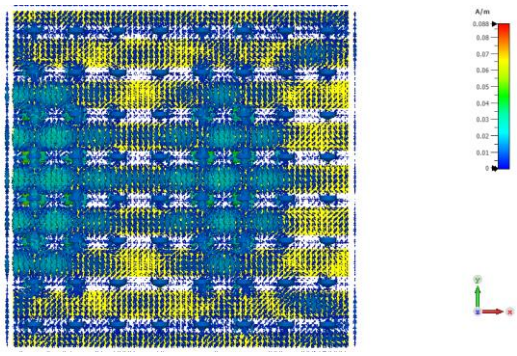
5.2.3 ทดลอง ON-OFF แบบสลับ (Column 1-2, 5-6 ON / Column 3-4, 7-8 OFF)

การกำหนดค่านี้สร้าง Phase Gradient บนแผ่น Metasurface โดยแบ่ง Column เป็นกลุ่ม ON และ OFF สลับกัน ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของ Beam Steering โดยใช้ Generalized Snell's Law

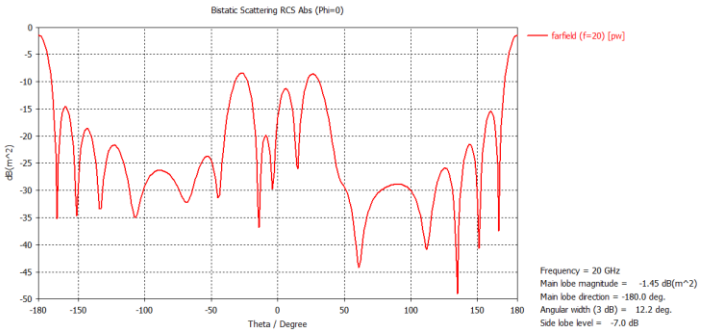
5.2.3.1 Plane Wave มุม 0 องศา

การวิเคราะห์ผลการ Simulation: การกำหนด Phase Coding แบบ Column 1-2, 5-6 ON และ Column 3-4, 7-8 OFF สร้าง Phase Gradient บนแผ่น Metasurface ด้วย Period การสลับ 4 Column ซึ่งสอดคล้องกับ Supercell ขนาด 4 Unit Cell เมื่อ Plane Wave ตกกระทบตั้งฉาก Phase Gradient นี้จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนคลื่นสะท้อน (Beam Deflection) ออกจากทิศ Specular ตาม Generalized Snell's Law กราฟ RCS 1D จึงแสดง Peak ที่มุมเบี่ยงเบนออกจาก 0° แทนที่จะเป็น

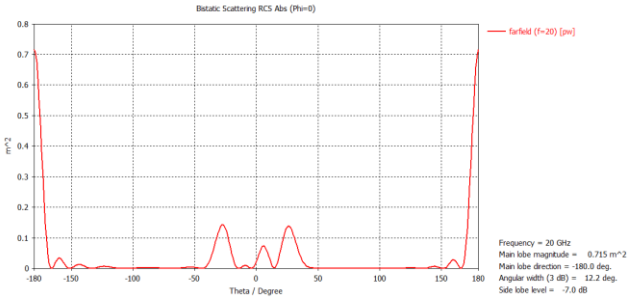
Specular Reflection ตรง ๆ ซึ่งเป็นหลักฐานชัดเจนของ Beam Steering Surface Current แสดงการกระจายแบบ Non-uniform สลับระหว่าง Column ON และ OFF



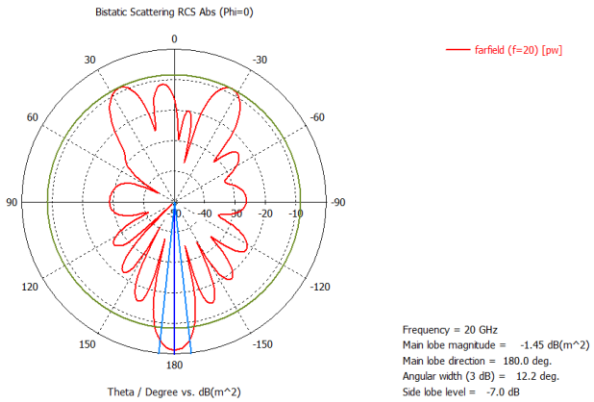
รูปที่ 54 Surface Current (20 GHz) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 0°



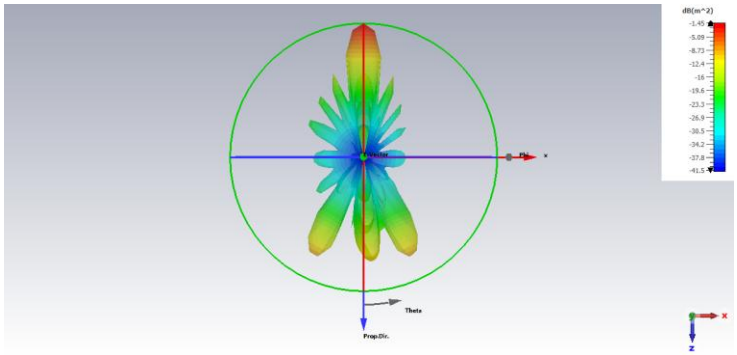
รูปที่ 55 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 0°



รูปที่ 56 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 0°



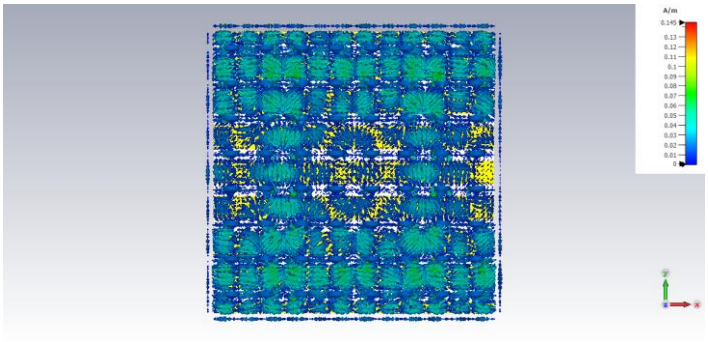
รูปที่ 57 RCS 1D Polar โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 0°



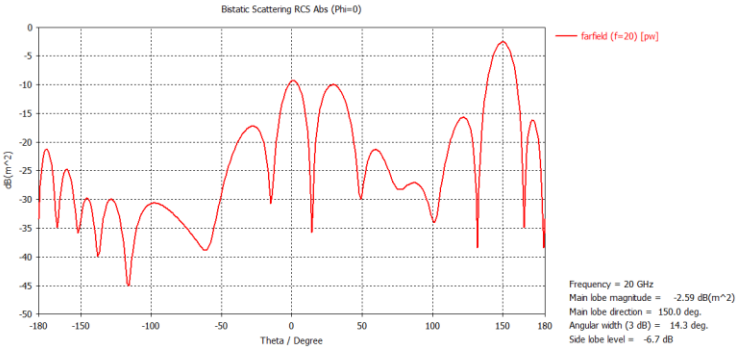
รูปที่ 58 RCS 3D Top view โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 0°

5.2.3.2 Plane Wave มุม 30 องศา

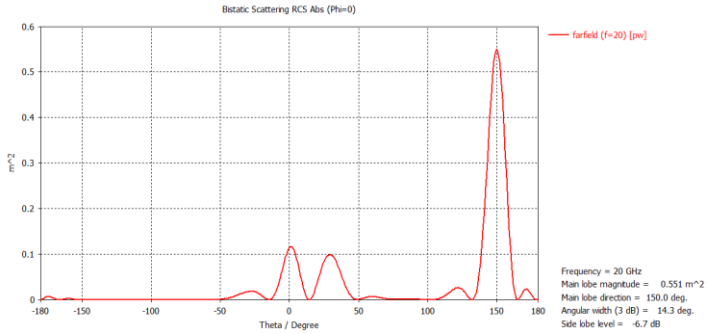
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: เมื่อ Plane Wave ตกกระทบที่ 30° ร่วมกับ Phase Gradient ของการ Coding แบบ Column ON-OFF สลับ ทิศทางคลื่นสะท้อนจะถูกกำหนดโดยผลรวมของ Specular Component และ Grating Component จาก Phase Gradient กราฟ RCS 1D แสดง Peak ที่ตำแหน่งต่างจากกรณี Plane Wave 30° โหมด ON หรือ OFF ทั้งหมด โดย Peak สามารถเบี่ยงไปทางใดทางหนึ่งขึ้นกับทิศทางของ Phase Gradient เทียบกับทิศการตกกระทบ Surface Current แสดงการกระจายที่ซับซ้อนกว่าโหมด Uniform เนื่องจากมีทั้ง Excitation จากมุมเฉียงและ Coupling ระหว่าง Column ON-OFF



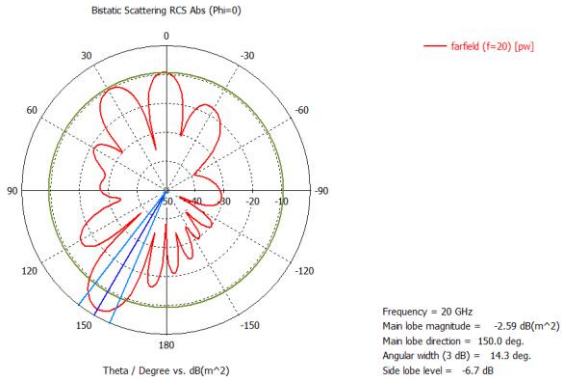
รูปที่ 59 Surface Current (20 GHz) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 30°



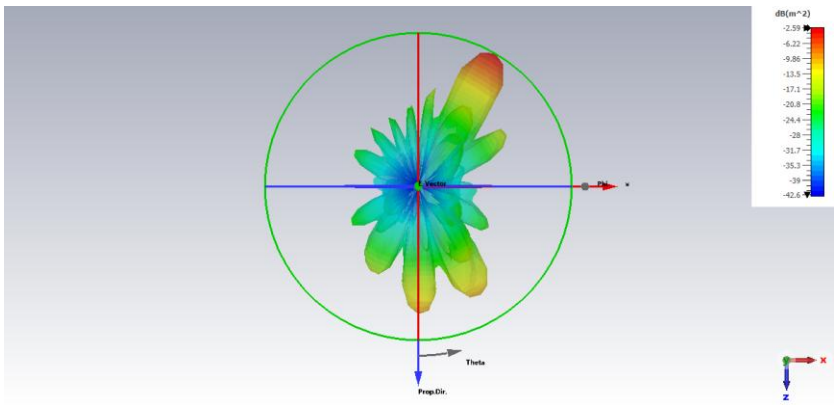
รูปที่ 60 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 30°



รูปที่ 62 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 30°



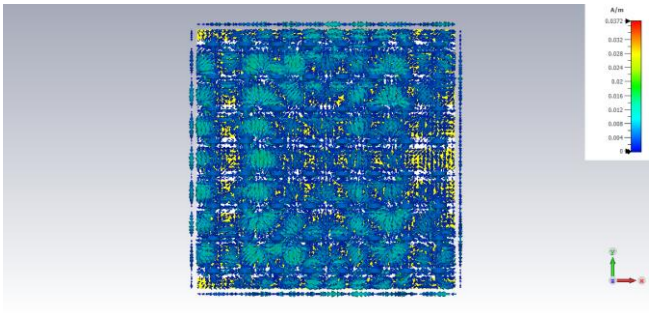
รูปที่ 63 RCS 1D Polar โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 30°



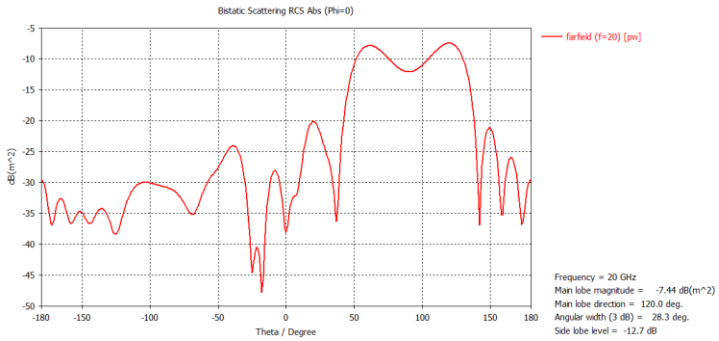
รูปที่ 64 RCS 3D Top view โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 30°

5.2.3.3 Plane Wave มุม 60 องศา

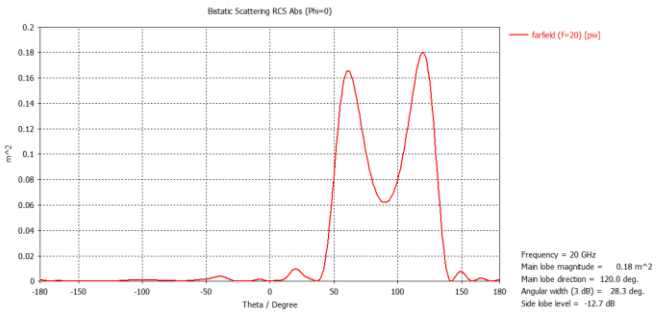
การวิเคราะห์ผลการ Simulation: ที่มุมตกกระทบ 60° ร่วมกับ Phase Gradient แบบ Column ON-OFF พฤติกรรม Beam Steering มีความซับซ้อนสูงที่สุดในชุดการทดสอบนี้ เนื่องจากทั้งมุมเฉียงสูงและ Phase Gradient ต่างมีผลต่อทิศทางคลื่นสะท้อนพร้อมกัน กราฟ RCS 1D อาจแสดง Peak หลายตำแหน่ง (Grating Lobes) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของ Specular Order และ Diffraction Order ต่าง ๆ จาก Phase Coding Period Peak ที่ 180° จาก Shadow Region ยังคงปรากฏ Surface Current แสดงการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอและมี Coupling Effect ระหว่าง Column อย่างชัดเจน กรณีนี้เป็นการทดสอบขีดจำกัดของ Array และสะท้อนถึงความท้าทายในการ Steer Beam ที่มุมสูง



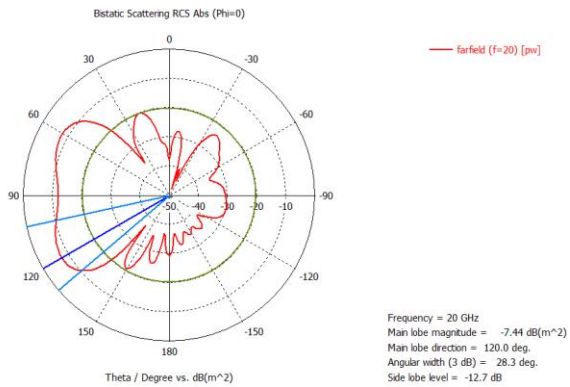
รูปที่ 65 Surface Current (20 GHz) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 60°



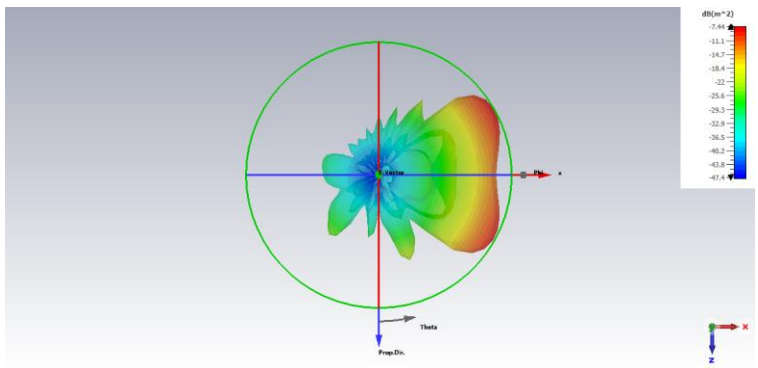
รูปที่ 66 RCS 1D Cartesian (dB) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 60°



รูปที่ 67 RCS 1D Cartesian (linear) โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 60°



รูปที่ 68 RCS 1D Polar โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 60°



รูปที่ 69 RCS 3D Top view โหมด ON-OFF สลับ Plane Wave 60°

6. สรุปผล

1. Unit Cell รูปตัว I ที่ออกแบบมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงตาม 20 GHz ที่ต้องการ หลังจากผ่านกระบวนการ Optimization
2. จากการทดสอบ PIN Diode 5 รุ่น MLP7140-11 เป็นรุ่นที่เหมาะสมที่สุด ให้ Phase Difference 180 ± 10 องศา ที่ความถี่ 20 GHz ด้วย Gap ขนาด 0.28 mm
3. Full Array 8×8 ที่มี PIN Diode 64 ตัว สามารถทำงานได้ทั้ง 3 โหมด (ON ทั้งหมด / OFF ทั้งหมด / ON-OFF สลับ Column) และแสดงผล RCS ที่สอดคล้องกับทฤษฎีในทุกกรณี
4. การกำหนด Phase Coding แบบ Column 1-2, 5-6 ON / Column 3-4, 7-8 OFF แสดงหลักฐานของการ Beam Steering ตาม Generalized Snell's Law

7. สิ่งที่ได้เรียนรู้

- หลักการออกแบบ Unit Cell สำหรับ Metasurface โดยใช้โครงสร้าง I-shaped patch และการปรับ Resonance ผ่าน Parametric Optimization
- การเลือก PIN Diode สำหรับงาน Reconfigurable Metasurface ต้องพิจารณาทั้งค่า Rs (โหมด ON) Ct (โหมด OFF) และ Package Inductance ร่วมกัน ไม่ใช่พิจารณาเพียงค่าเดียว
- การจำลอง Full Array ต้องการทรัพยากรการประมวลผลสูงกว่า Unit Cell มาก การวางแผน Simulation อย่างเป็นระบบช่วยประหยัดเวลา
- Phase Coding บน Metasurface ส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบ RCS และทิศทางการสะท้อน ซึ่งสามารถทำนายได้ด้วย Generalized Snell's Law
- การบันทึกข้อมูลทั้ง 1D และ 3D ในหลายรูปแบบ (dB, Linear, Polar, Cartesian) ช่วยให้วิเคราะห์และนำเสนอผลได้ครบถ้วน

8. ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน

- การ Simulation Full Array ขนาดใหญ่ใช้เวลานานและต้องการหน่วยความจำสูง อาจต้องปรับ Mesh Settings ให้เหมาะสม
- บาง PIN Diode รุ่นที่ทดสอบมีค่า Package Inductance สูง ทำให้ Self-resonance เกิดขึ้นในย่านความถี่ที่สนใจ ส่งผลกระทบต่อ Phase Difference
- การกำหนด Gap ขนาดเล็ก (< 0.30 mm) ต้องการความละเอียดสูงในการ Mesh ซึ่งส่งผลต่อเวลาการ Simulation

9. แนวทางที่คาดว่าจะดำเนินการต่อไป

ขั้นตอนถัดไปหลังจากสำเร็จในระดับ Simulation มีดังนี้

1. ออกแบบ Pattern ในการ ON-OFF เพื่อให้ได้การสะท้อนตามที่ต้องการ
2. ออกแบบ Bias Circuit สำหรับควบคุม PIN Diode Unit cell อย่างง่าย