

อภิวัดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านสายอากาศ Metamaterials for Antenna Applications

ศราวุธ ชัยมูล^{1*} และ ประยูทธ อัครเอกพาลิน²

Sarawuth Chaimool^{1*} and Prayoot Akkaraekthalin²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทบทวนคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้อภิวัดสำหรับสายอากาศ เนื่องจากอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ปรากฏในวัสดุตามธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นมีดัชนีหักเหเป็นลบ มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าหรือค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบหรือเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้ อภิวัดยังชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากมายในอนาคตและเป็นสิ่งที่ท้าทายที่สำคัญที่มุ่งไปสู่การออกแบบอภิวัดสำหรับสายอากาศยุคใหม่

คำสำคัญ: อภิวัด วัสดุประดิษฐ์ สายอากาศ สภาพยอมทางไฟฟ้า ความซึมซาบแม่เหล็ก

Abstract

In this article, we review some properties and potential applications of Metamaterials (MTMs) and its utilization for antenna's techniques. MTMs are engineered media characterized by electromagnetic constitute parameters with anomalous values such as negative refractive index or near zero permittivity and permeability. Moreover, it suggests numerous

potential future applications and points out important challenges to design MTMs for next generation antennas.

Keywords: Metamaterials, Artificial Materials, Antenna, Permittivity, Permeability

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อภิวัดหรือวัสดุเมธา (Metamaterial) ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ วิศวกรและนักวิจัยเป็นอย่างมาก เนื่องจากอภิวัดมีคุณสมบัติพิเศษซึ่งไม่ปรากฏโดยทั่วไปในวัสดุตามธรรมชาติและคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำมาใช้งานชดเชยหรือทดแทนข้อจำกัดของวัสดุตามธรรมชาติ ทำให้เกิดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นตามมา

อภิวัดถูกนิยามว่าเป็น วัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านั้นปกติเกิดจากโครงสร้างมากกว่าการจัดเรียง (Composition) จากการผนวกกันของวัสดุขนาดเล็ก (ปกติจะมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมาก) ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Inhomogeneous) เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติประสิทธิผลในระดับมาโคร (Macroscopic) [1]-[8]

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* Corresponding Author, Tel. 0-2913-2500 Ext. 8520, E-mail: sarawuth@kmutnb.ac.th

อย่างที่ทราบกันเป็นอย่างดี ตัวกลางที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการผนวกตัวของการเหนี่ยวนำของโมเมนต์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electric and Magnetic Moments) ซึ่งผลกระทบในระดับมาโครจะอยู่ในรูปของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กประสิทธิผล (Effective Permittivity : ϵ_{eff} and Permeability : μ_{eff}) ของตัวกลางขนาดใหญ่ (Bulk Medium) ดังนั้นอภิวัดสามารถที่จะประกอบขึ้นจากการฝังของวัสดุประดิษฐ์หลายชนิดรวมตัวกันเข้าไประหว่างในตัวกลางหรือผิวของตัวกลางที่กำหนดซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระ ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติต่างๆ ของตัวกลาง ขนาด รูปร่างและส่วนประกอบที่จะใส่เข้าไปไม่ว่าจะเป็นความหนาแน่นหรือการจัดวางตำแหน่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองพิเศษทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจากวัสดุตามธรรมชาติทั่วไป

ในการทำวิจัยของอภิวัดแรกเริ่ม ผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่มีดัชนีหักเห (Refractive Index: n) ที่มีค่าเป็นลบ (Negative Refractive Index) เนื่องจาก $n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$ ดังนั้นดัชนีหักเหเป็นลบจึงเกิดจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) เป็นลบทั้งคู่ ($\epsilon < 0$ และ $\mu < 0$) ซึ่งจะเรียกอภิวัดนี้ว่า DNG (Double Negative Medium) เนื่องจากวัสดุ DNG มีคุณสมบัติตรงข้ามกับวัสดุส่วนใหญ่ในธรรมชาติซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นบวกทั้งคู่ ($\epsilon > 0$ และ $\mu > 0$) (Double Positive Medium: DPS) โดยแนวคิดของวัสดุเชิงซ้อนที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1968 Veselgo [9] ได้ตั้งสมมติฐานและหาคำตอบเชิงทฤษฎีว่าเมื่อคลื่นระนาบเดินทางเข้าไประหว่างตัวกลางที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่จะเกิดผลอย่างไร ผลการศึกษาของเขาพบว่าทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ (Pointing Vector) จะขนานกับทิศทางของความเร็วเฟสแต่มีทิศทางตรงกันข้าม (Anti-parallel) ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีที่

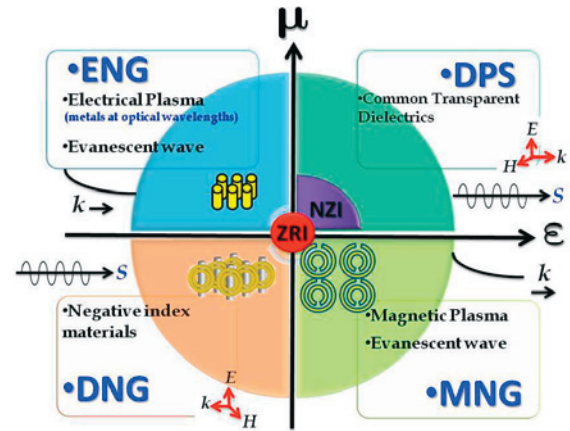
คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง DPS เมื่อใช้คลื่นระนาบเดียวกัน (ทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์ขนานและมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วเฟส) สำหรับอภิวัดที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่มีการเรียกกันหลายชื่อ ไม่ว่าจะเป็น DNG มาจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเป็นลบทั้งคู่ NRI (Negative Refractive Index) มาจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีมุมหักเหเป็นลบ LHM (Left Handed Medium) ปกติวัสดุทั่วไปจะใช้กฎมือขวาของปริมาณเวกเตอร์สามตัวคือ สนามไฟฟ้า $\vec{E}$ สนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ และทิศทางของการเคลื่อนที่ $\vec{k}$ แต่อภิวัดจะสอดคล้องกับการใช้กฎมือซ้าย BW (Backward Wave) มาจากนิยามของ Veselgo เพราะทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นตรงกันข้ามกับทิศทางของพอยน์ติงเวกเตอร์และ NPV (Negative Phase Velocity) มาจากคุณสมบัติของคลื่นเมื่อเดินทางผ่านอภิวัดจะทำให้เวกเตอร์เฟสมีค่าเป็นลบ

นอกจากนี้วัสดุบางชนิดในช่วงความถี่หนึ่งอาจจะมีค่า ϵ หรือ μ มีค่าอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นลบจะเรียกอภิวัดเหล่านี้ว่า SNG (Single Negative Medium) โดยวัสดุที่มีค่า ϵ เป็นลบเรียกว่า ENG (Epsilon Negative Medium) และ μ เป็นลบ เรียกว่า MNG (Mu Negative Medium) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่ปรากฏว่ามีวัสดุที่มีคุณสมบัติ DNG เกิดขึ้นเองธรรมชาติตามรายงาน ณ ปัจจุบัน ถึงกระนั้นอภิวัดก็สามารถทำให้วัสดุมีคุณสมบัติได้ทั้ง DNG SNG หรือ DPS นอกจากนี้คุณสมบัติที่ไม่ปกติของอภิวัดที่ได้รับความสนใจอย่างมากอีกอย่างคือวัสดุที่มีดัชนีหักเหมีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ (Zero Refractive Index: ZRI or Near Zero Refractive Index: NZI) จากดัชนีหักเห $n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$ เพราะฉะนั้นกรณีที่ $n=0$ หรือ $n \rightarrow 0$ จะเกิดได้ทั้งหมดสามกรณี คือ 1) เมื่อ $\epsilon=0$ หรือ $\epsilon \rightarrow 0$ ส่วน μ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($\mu \geq 1$) จะเรียกกรณีว่า ENZ (Epsilon Near Zero) 2) เมื่อ $(\mu=0)$ หรือ $\mu \rightarrow 0$ ส่วน ϵ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง ($\epsilon \geq 1$) จะเรียกว่า MNZ (Mu Near Zero) และ 3) เมื่อ $\epsilon = \mu = 0$ จะเรียกว่า DZI (Double Zero Index) หรือกรณี $\epsilon \rightarrow 0$ และ $\mu \rightarrow 0$

จะเรียกว่า MENZ (Mu-Epsilon Near Zero) ถึงแม้ว่าทั้งสามกรณีจะมีค่า $n=0$ หรือ $n \rightarrow 0$ แต่เมื่อพิจารณาจะมีคุณสมบัติอย่างอื่นจะแตกต่างกัน เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ ในกรณีของ ENZ จะพบว่า $\eta \rightarrow \infty$ กรณีของ MNZ จะมี $\eta \rightarrow 0$ และ $\eta=1$ จะเกิดในกรณีของ DZI ซึ่งอาจจะเรียกกรณีนี้ $\eta=1$ ว่าเป็นวัสดุที่มีอิมพีแดนซ์เข้ากับอิมพีแดนซ์ของคลื่นในอวกาศว่าง (Matched-impedance Medium) ดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นเราอาจจะอธิบายคุณสมบัติของวัสดุในระดับมาโครด้วยพารามิเตอร์ของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (ϵ และ μ) พารามิเตอร์ทั้งสองนี้สามารถนำมาแบ่งกลุ่มของวัสดุได้แสดงดังรูปที่ 1

จากคุณสมบัติพิเศษ (ไม่ปกติ) ของอภิวัดที่กล่าวมาในเบื้องต้น ดังนั้น จึงมีนักวิจัยนำคุณสมบัติต่างๆ เหล่านั้นไปประยุกต์ใช้ในแต่ละสาขา ถึงแม้ว่าอภิวัดจะเริ่มต้นจากศาสตร์ของแม่เหล็กไฟฟ้าและแสง แต่ปัจจุบันก็มีหลายศาสตร์วิชาที่ทำวิจัยเกี่ยวกับอภิวัด ไม่ว่าจะเป็นฟิสิกส์โซลิดสเตต (Physic Solid State) วิทยาศาสตร์วัสดุ (Material Science) นาโนเทคโนโลยี (Nano Technology) เป็นต้น การประยุกต์ใช้งานของอภิวัดที่สำคัญและได้รับความสนใจอย่างมาก คือ เลนส์สมบูรณ์ (Perfect Lenses) หรือเลนส์พิเศษ (Super-lenses) [10] เสื้อคลุมล่องหน (Cloak of Invisible) [11] นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยนำเสนอการประยุกต์ใช้อภิวัดสำหรับรถที่เคลื่อนที่ด้วยตนเอง (Automobile) [12] สายอากาศก็เป็นสาขาหนึ่งในกลุ่มของการนำอภิวัดมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [4]-[8] บทความนี้นำเสนอการทบทวน (Review) การนำอภิวัดมาประยุกต์ใช้สำหรับสายอากาศ รวมทั้งแนวทางและแนวโน้มการทำวิจัยของอภิวัดสำหรับสายอากาศ เพื่อช่วยต่อการทำความเข้าใจ ผู้เขียนจะแบ่งกลุ่มตามการประยุกต์ใช้งานของอภิวัดสำหรับสายอากาศดังนี้

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก
2. เพื่อใช้ในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์ (Artificial Conductors)
3. เพื่อใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรอง (Substrate Material)



รูปที่ 1 แผนผังสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก

4. เพื่อใช้ในการออกแบบชั้นวางซ้อน (Superstrate) หรือฝาครอบ (Radome)
5. เพื่อลดการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและระบบ MIMO
6. เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นรีวและเรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์
7. เพื่อควบคุมทิศทางลำคลื่น (Steering Beam Antennas)

2. การประยุกต์ใช้งานอภิวัดสำหรับสายอากาศ

2.1 การใช้อภิวัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก

เนื่องจากสายอากาศขนาดเล็กโดยทั่วไปจะมีกำลังการแผ่กระจาย (P_{rad}) ที่ค่อนข้างต่ำหรือมีประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นที่ต่ำ โดยในที่นี้สมมติว่าแหล่งกำเนิดคือ ไดโพลขนาดเล็กที่มีโมเมนต์ของกระแสเท่ากับ $I_0 \ell$ วางไว้ตรงกลางของทรงกลมรัศมี a ที่ถูกบรรจุด้วยวัสดุ DPS (ปกติคือ อวกาศว่าง) ดังนั้น กำลังการแผ่กระจายคลื่น สามารถเขียนได้เป็น [13]

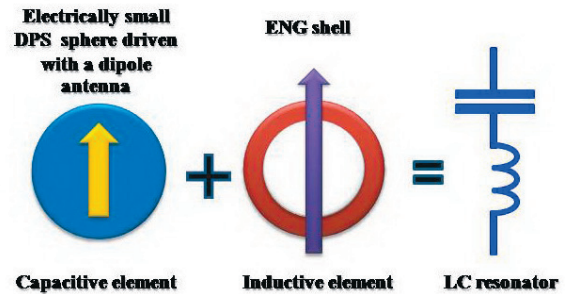
$$P_{dipole} = \eta \frac{\pi}{3} \left[\frac{I_0 \ell}{\lambda} \right]^2 \left[1 - \frac{j}{(ka)^3} \right] = P_{real} + jP_{imag} \quad (1)$$

โดยกำลังการแผ่กระจายคลื่นในส่วนจินตภาพเท่ากับ

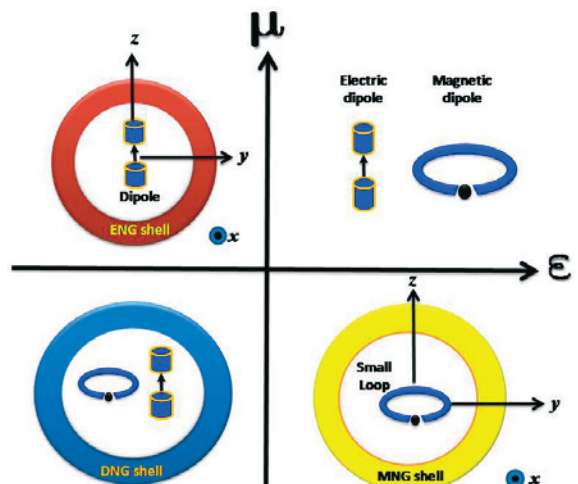
$$P_{dipole}^{imag} = -\eta \frac{\pi}{3} \left| \frac{I_0 \ell}{\lambda} \right|^2 \left[\frac{j}{(ka)^3} \right] \quad (2)$$

ในทางกลับถ้าบรรจุด้วยวัสดุ DNG โดยการแทนค่า $\epsilon \rightarrow -\epsilon$ และ $\mu \rightarrow -\mu$ ดังนั้น $K_{real} \rightarrow -|K_{real}|$ และ $\eta \rightarrow +\eta = \sqrt{|\epsilon|/|\mu|}$ สำหรับกรณีที่ไม่มีการสูญเสีย $K \rightarrow -|K| = -\omega \sqrt{|\epsilon|/|\mu|}$ เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ของกำลังการแผ่กระจายคลื่นของไดโพลที่บรรจุใน DPS และ DNG มีค่า $P_{dipole}^{DPS} = P_{dipole}^{DNG}$ จะพบว่า P_{DNG} ในส่วนจริงจะมีค่าเป็นบวกเหมือนกับ DPS ขณะที่ส่วนจินตภาพจะมีค่าเป็นบวกซึ่งตรงกันข้ามกับ DPS ซึ่งมีค่าเป็นลบตามสมการที่ (2) หรืออาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุ DNG มีลักษณะเหมือนค่าเหนี่ยวนำ (Inductive) ส่วน DPS มีค่าเป็นค่าความจุ (Capacitive) [14] ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถนำวัสดุ DNG ครอบหรือล้อมรอบไดโพลไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการเข้าคู่ (Match) กับอิมพีแดนซ์ของไดโพลในอวกาศว่างได้ ซึ่งผลที่ได้คือจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเพิ่มขึ้น รวมทั้งสายอากาศยังคงมีขนาดเล็กเพราะใช้ไดโพลเล็กในการออกแบบ

นอกจากนี้ ผู้วิจัย [15] แสดงให้เห็นว่าการนำอภิวัดที่มีคุณสมบัติ ENG ไปล้อมรอบสายอากาศโมโนโพลขนาดเล็กซึ่งสามารถทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 98% รวมทั้งยังคงมีขนาดเล็กจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองจึงสามารถนำวัสดุ ENG มาใช้ในการแมตชิ่งเพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์โดยแสดงภาพจำลองได้เป็นดังรูปที่ 2 และการอยู่เป็นคู่ (Duality) ของวัสดุ ENG คือวัสดุ MNG [16] ก็สามารถใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็ก (ไดโพลแม่เหล็ก) ได้เช่นกัน รวมทั้งค่าของ μ ที่มีค่าเป็นลบไม่จำเป็นต้องมีค่าขนาดใหญ่ (จากบทความมีค่า $\mu = -2$) ดังนั้นทั้งสามกรณีในการนำอภิวัด DNG ENG และ MNG มาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพสายอากาศขนาดเล็กสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 สายอากาศไดโพลไฟฟ้าขนาดเล็กที่ล้อมรอบด้วย DPS (อวกาศว่าง) ทำตัวเป็นเหมือนองค์ประกอบตัวเก็บประจุและเปลือก ENG ทำตัวเป็นเหมือนองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อรวมกันจะประกอบเป็นเรโซเนเตอร์ LC



รูปที่ 3 การจัดเรียงที่เป็นไปได้ของสายอากาศขนาดเล็กร่วมกับอภิวัดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ

2.2 การใช้อภิวัดในการออกแบบตัวนำประดิษฐ์

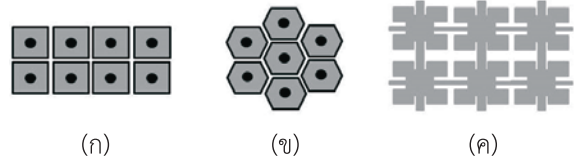
โดยทั่วไปสายอากาศจะใช้ระนาบกราวด์ด้วยตัวนำทางไฟฟ้า (Electric Conductor) ซึ่งในทางอุดมคติจะเรียกว่า ตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ PEC (Perfect Electric Conductor) ส่วนตัวนำทางแม่เหล็ก (Magnetic Conductor) ในทางอุดมคติจะเรียกว่า ตัวนำทางแม่เหล็กสมบูรณ์ PMC (Perfect Magnetic Conductor) โดย PEC และ PMC มี

คุณสมบัติที่ต่างกันคือ PEC จะสะท้อนคลื่นระนาบและมีเฟสที่สะท้อนกลับเท่ากับ 180° หรือ π (Out-of-phase) ขณะที่ PMC จะมีเฟสที่สะท้อนกลับเป็น 0° (In-phase) เนื่องจากตัวนำทางแม่เหล็กไม่มีอยู่จริงแต่เป็นตัวนำที่สมมติขึ้นมาเพื่อใช้ในการอธิบายการเป็นคู่กันของตัวนำทางไฟฟ้า ดังนั้น ตัวนำทางแม่เหล็กจึงเป็นตัวนำประดิษฐ์ ซึ่งเรียกว่า ตัวนำแม่เหล็กประดิษฐ์ (Artificial Magnetic Conductor: AMC) โดย AMC สามารถสร้างขึ้นมาจากสองโครงสร้างหลักๆ คือช่องแถบว่างแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Bandgap: EBG) ซึ่งเป็นหนึ่งในอภิวัตถุ [17] รวมทั้งผิวที่มีอิมพีแดนซ์สูง (High Impedance Surface: HIS) และ ENZ โดยทั่วไป EBG จะประกอบด้วย โลหะรูปต่างๆ ที่เป็นรายการวางบนระนาบกราวด์ที่แยกด้วยชั้นรอง ไดอิเล็กทริก (Dielectric Substrate) อาจจะไม่เชื่อมต่อ (Via) หรือไม่เชื่อมต่อ [17] กับระนาบกราวด์ก็ได้ แสดงตัวอย่าง EBG ดังรูปที่ 4 ส่วนกรณีของ ENZ จะแตกต่างกับ EBG ที่ไม่มีระนาบกราวด์แต่จะใช้คุณสมบัติของของสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านในการอธิบายเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ สมมติว่าวัสดุมีความหนา d แสดงดังรูปที่ 5 และจาก $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านได้ดังนี้ [3]

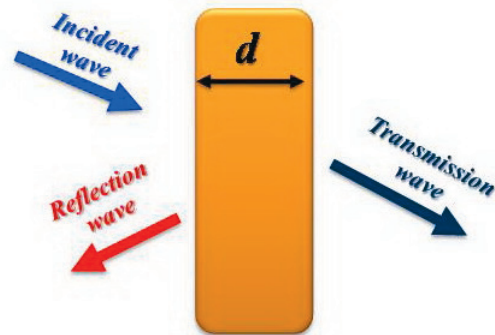
$$\text{reflection} = S_{11} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \frac{1 - e^{-j2kd}}{1 - \left(\frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \right)^2 e^{-j2kd}} \quad (3)$$

$$\text{transmission} = S_{21} = \frac{4\eta\eta_0}{(\eta + \eta_0)^2} \frac{e^{-j2kd}}{1 + \left(\frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \right)^2 e^{-j2kd}} \quad (4)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อ $\epsilon \rightarrow 0$ และ $\mu \geq 1$ จะทำให้ $\eta \rightarrow \infty$ นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับจะพบว่าค่า $S_{11} = +1$ และ $S_{21} = 0$ หมายความว่าเมื่อคลื่นระนาบกระทบวัสดุนี้จะเกิดการสะท้อนกลับหมด และมีเฟสที่สะท้อนกลับเป็นศูนย์หรือ in-phase ($S_{11} = 1 \angle 0^\circ$) ส่วน $S_{21} = 0$ คือ คลื่นไม่สามารถส่งผ่านไปได้ คุณสมบัติดังกล่าวนี้ก็คือ ตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์

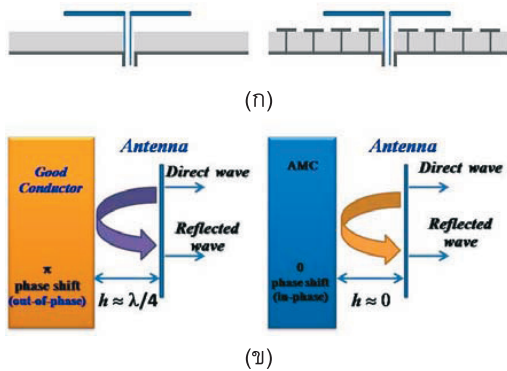


รูปที่ 4 ตัวอย่างรูปแบบรายการของโลหะที่ใช้ในการออกแบบ EBG (ก) และ (ข) เชื่อมต่อ และ (ค) ไม่เชื่อมต่อกับระนาบกราวด์



รูปที่ 5 การกระเจิงของคลื่นระนาบจากวัสดุที่มีความหนา d

นั่นเอง ในทางตรงกันข้าม ถ้ากรณีของ MNZ ($\mu \rightarrow 0$) เมื่อแทนค่าในสมการที่ จะพบว่า $S_{11} = -1$ หรือ $1 \angle 180^\circ$ และ $S_{21} = 0$ ซึ่งจะได้ผลเหมือนตัวนำสมบูรณ์ แต่เนื่องจากไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังนั้น จะเรียกว่า ตัวนำไฟฟ้าประดิษฐ์ (Artificial Electric Conductor: AEC) ตัวอย่างการใช้งานทั้ง EBG และ AMC แสดงดังรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ใช้ในการออกแบบเพื่อลดขนาดสายอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพสายอากาศ โดยในรูปที่ 6 (ก) เมื่อวางไดโพลขนานระนาบกราวด์จะทำให้ภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดได้ระนาบกราวด์มีทิศทางของกระแสตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดจริงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศต่ำ ในขณะที่เมื่อวางไดโพลขนานกับระนาบ EBG (รูป 6 (ข) ด้านขวามือ) ทิศทางกระแสของภาพเสมือนแหล่งกำเนิดจะมีทิศทางเดียวกันกับแหล่งกำเนิดจริงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศสูงและ EBG ยังช่วยในการ



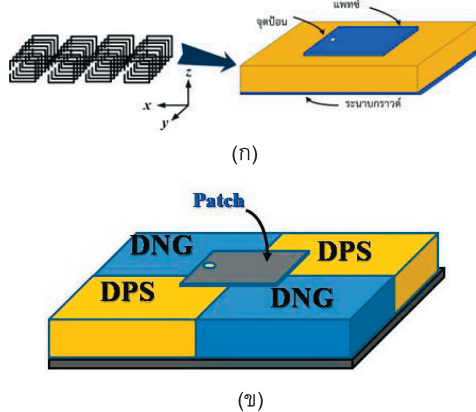
รูปที่ 6 การนำ (ก) EBG และ (ข) AMC มาใช้กับสายอากาศเพื่อลดขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพ

กำจัดคลื่นผิว จึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนรูปที่ 6 (ข) เป็นการแทนตัวสะท้อนโลหะด้วย AMC โดยปกติจะวางสายอากาศเหนือตัวสะท้อนโลหะที่ระยะทาง $\lambda/4$ เพื่อให้คลื่นสะท้อนกลับมาจากตัวสะท้อนโลหะมีเฟสเดียวกันกับคลื่นที่ส่งออกไปโดยตรงที่สายอากาศ จากแนวคิดคลื่นสะท้อนที่มีเฟสตรงกันนี้ตรงกันกับคุณสมบัติของ AMC ดังนั้นจึงสามารถนำ AMC แทนตัวสะท้อนโลหะได้และจะลดระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนกับสายอากาศลงโดยตามอุดมคติสามารถวางสายอากาศติดกับตัวสะท้อนได้

2.3 การใช้วัสดุในการออกแบบวัสดุฐานรอง

การลดขนาดของสายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed Antenna) หรือสายอากาศไมโครสตริปส่วนใหญ่สามารถทำได้โดยใช้แผ่นพิมพ์หรือวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant: ϵ_r) ที่สูง เนื่องจากความยาวคลื่นในแผ่นพิมพ์ $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ อย่างไรก็ตาม ผลจากการเพิ่ม ϵ_r ให้สูงขึ้นปกติแล้วจะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศลดลง รวมทั้งจะทำให้เกิดคลื่นที่ผิว (Surface Wave) มากขึ้นซึ่งทำให้ประสิทธิภาพสายอากาศลดลง จากความสัมพันธ์ $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ จะพบว่า นอกจาก ϵ_r แล้วยังสามารถเพิ่ม μ_r ได้เช่นกันแต่ข้อจำกัดของการเพิ่ม μ_r คือวัสดุที่มีค่า μ_r สูงจะใช้ได้กับความถี่ที่ไม่สูงมากนักหรือที่ใช้ได้ก็มีราคาค่อนข้างสูงมากเมื่อ

เทียบกับแผ่นที่มี ϵ_r สูง แต่ข้อดีของวัสดุที่มีค่า μ_r สูงที่เหนือกว่าการเพิ่ม ϵ_r สูงคือการเข้าคู่กันของอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance : η) ของวัสดุกับอิมพีแดนซ์ของคลื่นในอวกาศว่าง ($\eta_0 = 120 \pi$) โดย $\eta = \sqrt{\mu_0 \mu_r / \epsilon_0 \epsilon_r}$ ซึ่งจะพบว่าเมื่อเพิ่ม ϵ_r ให้สูงขึ้น η จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและห่างออกจาก η_0 ในทางตรงกันข้ามในการเพิ่ม μ_r จะสามารถทำให้ η_0 และ η เข้าคู่กันได้ เพื่อข้ามข้อจำกัดของวัสดุแม่เหล็กที่มีตามธรรมชาติและข้อดีของการเพิ่ม μ_r ในการออกแบบสายอากาศ จึงมีผู้วิจัยหลายท่านนำแนวคิดของอิมพีแดนซ์มาออกแบบในการเพิ่ม μ_r โดยไม่ใช้วัสดุแม่เหล็ก (Non-magnetic Material) แต่ใช้การผนวกกันของโลหะหรือ (และ) ชั้นไดอิเล็กตริกในการออกแบบวัสดุแม่เหล็กประดิษฐ์ (Artificial Magnetic Material: AMM) โดยเฉพาะการนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวัสดุฐานรองของสายอากาศแผ่นพิมพ์และไมโครสตริป [18]-[22] จะเรียกวัดฐานรองที่มี μ_r และ ϵ_r มากกว่าหนึ่งว่า วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก (Magneto-dielectric Material: MDM) ในบทความ [20],[21] ได้นำเสนอการออกแบบวัสดุแม่เหล็กประดิษฐ์ที่มี μ_r มากกว่าหนึ่ง เพื่อทำให้สายอากาศไมโครสตริปมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากขึ้นตามอัตราส่วนของ μ_r / ϵ_r และมีขนาดที่ลดลงตามตัวประกอบการทำให้นาตาลลดลง $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ [20] สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์ใน [18] ได้นำคุณสมบัติของ MNG มาออกแบบวัสดุฐานรองประดิษฐ์เพื่อทำการ ลดขนาดของสายอากาศและเพิ่มแบนด์วิดท์อิมพีแดนซ์ รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่น นอกจากนี้ผู้วิจัย [22] นำเสนอการออกแบบวัสดุฐานรองที่ใช้ทั้ง DPS ร่วมกับ DNG ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสองแถบความถี่ ตัวอย่างการใช้วัสดุในการออกแบบวัสดุฐานรองแสดงดังรูปที่ 7 โดยรูปที่ 7 (ก) เป็นการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปบนวัสดุ MDM โดยใช้โครงสร้าง SRR (Split Ring Resonator) เรียงกันซึ่งทำให้ μ_r มีค่ามากกว่าหนึ่งในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งซึ่งส่งผลทำให้ขนาดของแพทช์มีขนาดลดลงตามค่าของ ϵ_r และ μ_r ในขณะที่รูปที่ 7 (ข) จะใช้วัสดุฐานรองผสมระหว่าง DNG และ DPS จากผลวิจัยพบว่าสามารถ

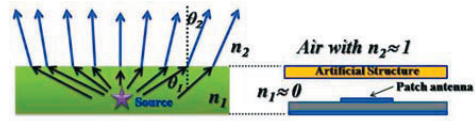


รูปที่ 7 ตัวอย่างการใช้งานอภิวัดในการออกแบบวัสดุฐานรอง (ก) วัสดุไดอิเล็กตริก-แม่เหล็ก และ (ข) วัสดุ DPS ร่วมกับ DNG

ทำให้สายอากาศเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใดๆ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดของแพทช์แต่จะทำการเปลี่ยนค่าของ ϵ_r และ μ_r ใน DNG หรือ DPS

2.4 การใช้อภิวัดในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบ

ในความเป็นจริง ชั้นวางซ้อน (Superstrate) ก็คือวัสดุฐานรองอย่างหนึ่งแต่ถูกนำมาวางไว้บนหรือครอบสายอากาศซึ่งการใช้อภิวัดในการออกแบบชั้นวางซ้อนหรือฝาครอบ (Radome) วางบนหรือครอบสายอากาศ (โดยปกติจะใช้สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศร่อง) โดยส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยมีการเพิ่มชั้นวางซ้อนที่มีคุณสมบัติคือ ค่าดัชนีการหักเห (n) มีค่าเท่ากับ ZRI (Zero Refractive Index) หรือใกล้ศูนย์ NZR (Near Zero Refraction) [8]-[11] ตามกฎของสเนลล์ คือเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่มี $n = 0$ คลื่นจะตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสหรือคลื่นจะขนานกันออกดังไปตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8 เมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่า $n_1 \rightarrow 0$ ดังนั้นมุมของคลื่นที่ออกจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สอง (θ_2) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือตั้งฉากกับผิวเพราะ

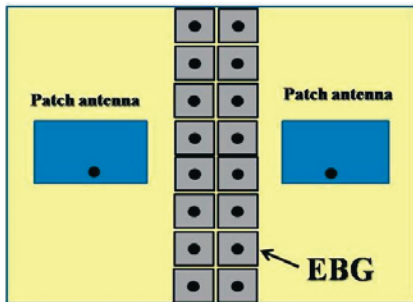


รูปที่ 8 แหล่งกำเนิดอยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ศูนย์และแบบจำลองเมื่อใช้กับสายอากาศไมโครสตริป

$\theta_2 = \sin^{-1}(n_1/n_2 \sin \theta_1)$ ดังนั้นชั้นวางซ้อนจึงเปรียบเสมือนอุปกรณ์บังคับทิศทางคลื่นให้ขนานออกไป (Directive Confining Device) ผลที่ได้คือ การทำให้สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ในทิศทางบรอดไซด์ (Broadside) ของสายอากาศเพิ่มขึ้นหรือถ้าวิเคราะห์ในมุมของเรโซเนเตอร์จะพบว่าการจัดวางสายอากาศไมโครสตริปซึ่งมีระนาบกราวด์ด้านล่างและการวางชั้นวางซ้อนไว้ด้านบนเปรียบเสมือนการมีแผ่นกระจกสะท้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่สูงมากสองแผ่นขนานกันในระยะที่เหมาะสม (โดยปกติมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น) จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้งจนทำให้เกิดการเรโซแนนซ์เรียกเรโซเนเตอร์แบบนี้ว่า Fabry-Perot เรโซเนเตอร์ (คำศัพท์ทางแสงปกตินำไปใช้ในการออกแบบเลเซอร์) ผลที่เกิดขึ้นคือ ทำให้สายอากาศมีสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงมากเพราะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: Q) ที่สูง แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากมี Q ที่สูงดังนั้นแบนด์วิธของสายอากาศจะแคบมากๆ เช่นกัน โดยทั่วไปชั้นวางซ้อนอภิวัดมีใช้คุณสมบัติของ ENZ [23]-[25] และส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างที่มีสองชั้นเพื่อทำให้เกิด ENZ ถึงทำให้สายอากาศเกิดความหนาเกิดขึ้นหรือมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนกรณีของ MNZ [26], [27] ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างเป็นลักษณะของผิวสะท้อนที่มีเพียงชั้นเดียวจึงทำให้สายอากาศมีลักษณะบาง รวมทั้งมีแบนด์วิธและอัตราขยายมีค่ามากขึ้น

2.5 เพื่อลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับและระบบ MIMO

อย่างที่ทราบกันดี สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปบนแผ่นฐานรองไดอิเล็กตริกจะเกิดคลื่นพื้นผิว (Surface

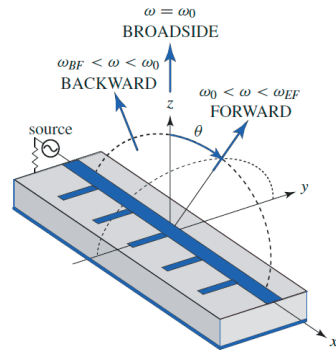


รูปที่ 9 การใช้ EBG ในการลดการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศไมโครสตริป

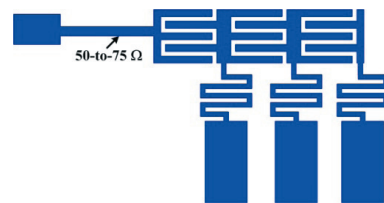
Wave) ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาและค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ผลที่เกิดขึ้นคือค่าเชื่อมต่อร่วม (Mutual Coupling) ระหว่างสายอากาศแพทช์สองตัวหรือมากกว่าที่วางไว้ใกล้ๆ กันจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศลดลง วิธีที่ง่ายที่สุดของการลดการเชื่อมต่อทำได้โดย การเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศ อย่างไรก็ตามจะทำให้ขนาดสายอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะในระบบ MIMO (Multi-input Multi-output) ที่ออกแบบในอุปกรณ์พกพาอาจจะเป็นข้อจำกัดในการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศ ผู้วิจัย [17] ได้นำเสนอการใช้ EBG ที่มีคุณลักษณะคือ ความต้านทานที่ผิวสูง HIS เพื่อทำให้ค่าการแยกกัน (Isolation) ระหว่างสายอากาศ เพิ่มขึ้น (หรือลดค่าเชื่อมต่อ) โดยเมื่อความต้านทานที่ผิว ณ ช่วงความถี่ที่ออกแบบมีค่าสูงมากจะทำให้คลื่นที่ผิวจากสายอากาศตัวหนึ่งไปยังอีกตัวเป็นไปได้น้อย ตัวอย่างโครงสร้าง EBG ที่ใช้ลดการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 9

2.6 เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคลื่นร้าวและเรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์

สายอากาศคลื่นร้าว (Leaky-wave Antenna: LWA) คือ สายอากาศซึ่งการแผ่กระจายคลื่นเกิดจากการกำลังงานที่รั่วออกจากคลื่นจร (Travelling Wave) อาจจะสามารถสร้างได้จากสายนำสัญญาณ CRLH (Composite



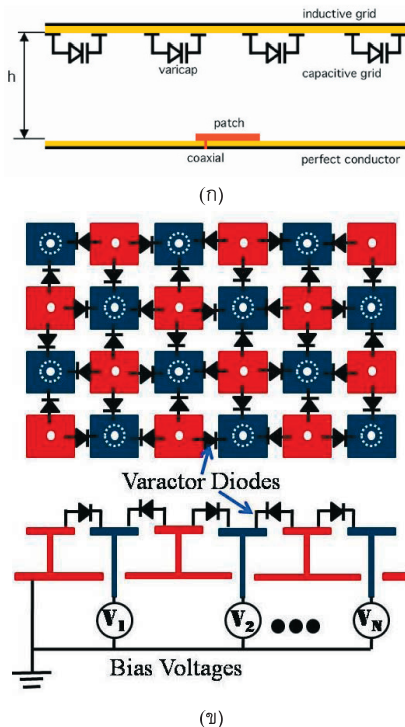
(ก)



(ข)

รูปที่ 10 สายอากาศบนโครงสร้าง CRLH (ก) สายอากาศคลื่นร้าว (LWA) (ข) สายอากาศ ZOR

Right/ Left Handed Transmission Line) แสดงดังรูปที่ 10 (ก) ซึ่งเป็นสายนำสัญญาณที่ประกอบคาบซ้ำๆ ของหน่วยที่เล็กที่สุด (Unit-cell) ที่เรียงต่อกันซึ่งประกอบขึ้นจากอนุกรมของความเหนี่ยวนำกับความจุต่อขนานและด้วยอนุกรมของความจุกับขนานด้วยความเหนี่ยวนำ LWA สามารถปรับมุมของการแผ่กระจายคลื่นได้โดยปรับเปลี่ยนค่าของ β (Dispersion) เนื่องจากโครงสร้างของ CRLH สามารถที่จะปรับค่าของ β ได้ทั้งเป็นบวก ศูนย์ และลบซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ปรากฏจากสายนำสัญญาณโดยทั่วไป การเกิดเรโซแนนซ์ในขณะ $\beta = 0$ จะเรียกเรโซเนเตอร์นี้ว่า เรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์ (Zero-order Resonator: ZOR) ซึ่งมีขนาดและเฟสเรโซแนนซ์คงที่ ณ ความถี่ใดๆ ที่ไม่ขึ้นกับขนาดทางกายภาพของสายอากาศแต่จะขึ้นอยู่กับการเลือก LC เท่านั้น [3] ซึ่งจากหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อออกแบบสายอากาศที่เรียกว่าสายอากาศเรโซเนเตอร์อันดับที่ศูนย์ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 10 (ข) ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีข้อดี คือมีขนาดเล็กมาก จาก [3] สายอากาศนี้มีขนาด



รูปที่ 11 โครงสร้างอภิวัดสำหรับสายอากาศควบคุมทิศทางของลำคลื่น (ก) ผิวสะท้อน และ (ข) ผิวสะท้อนของ HIS

ลดลงถึง 75% เมื่อเทียบกับสายอากาศแพทช์

2.7 เพื่อควบคุมทิศทางลำคลื่น

การประยุกต์ใช้อภิวัดในการออกแบบสายอากาศที่สามารถควบคุมทิศทางของลำคลื่นอาจจะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือ 1. ใช้การควบคุมเฟสการสะท้อนของ HIS 2. การควบคุมเฟสโดยใช้ผิวสะท้อน และ 3. ใช้โครงสร้างสายอากาศคลื่นรั้ว แสดงดังรูปที่ 11 โดยวิธีที่ 1 และ 2 จะใช้หลักการคล้ายๆ กันคือ ใช้วาเรกเตอร์ไดโอดในการปรับค่าความจุระหว่างเซลล์ของผิวซึ่งจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างเปลี่ยนไปจะส่งผลทำให้เฟสของผิวการสะท้อนทั้งสองแบบเปลี่ยนไปตามความถี่เรโซแนนซ์ด้วย เมื่อเฟสการสะท้อนของผิวเปลี่ยนไปจะทำให้ลำคลื่นที่ส่งออกไปมีทิศทางเปลี่ยนไปตามเฟสการสะท้อน

3. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทบทวนการประยุกต์ใช้งานอภิวัดสำหรับสายอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ปรากฏในวัสดุตามธรรมชาติของอภิวัดเมื่อนำไปออกแบบ (รวม) สายอากาศจะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น รวมทั้ง สามารถนำมาชดเชยหรือทดแทนข้อจำกัดของวัสดุทั่วไปได้ ดังนั้นการนำอภิวัดจะเป็นวิธีที่ดีอีกวิธีหนึ่งที่จะนำมาออกแบบสายอากาศในปัจจุบันและอนาคต อย่างไรก็ตามอภิวัดเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ ดังนั้น องค์ความรู้ต่างๆ ยังมีการปรับเปลี่ยนตามผลของการวิจัยตลอดเวลา

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials, Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley-IEEE Press, 2005.
- [2] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, *Negative Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications*, Wiley-IEEE Press, 2005.
- [3] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [4] R. Marqués, F. Martín, and M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications*, Wiley Interscience, 2008.
- [5] L. Solymar and E. Shamonina, *Waves in metamaterials*, Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [6] F. Capolino, *Applications of metamaterials*, Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2009.
- [7] F. Capolino, *Theory and phenomena of metamaterials*, Boca Raton, FL: CRC Press/



- Taylor & Francis, 2009.
- [8] S. A. Ramakrishna and T. M. Grzegorzczuk, *Physics and applications of negative refractive index materials*, Boca Raton, Fla; London: CRC Press; Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2009.
- [9] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [10] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens," *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, 2000.
- [11] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies," *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977 – 980, Nov. 2006.
- [12] K. Sato, "Metamaterials and automotive applications," Special Issue: *Metamaterials and Automotive Applications, The R&D Review of Toyota CRDL*, vol. 41, no. 4, 2006.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition, Wiley Interscience, 2005.
- [14] R. W. Ziolkowski and A. D. Kipple, "Application of double negative materials to increase the power radiated by electrically small antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 10, pp. 2626–2640, Oct. 2003.
- [15] R. W. Ziolkowski and A. Erentok, "Metamaterial-based efficient electrically small antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 7, pp. 2113–2130, July 2006.
- [16] S. Ghadarghadr, A. Ahmadi, and H. Mosallaei, "Negative permeability-based Electrically small antennas," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 7, pp. 13-17, 2008.
- [17] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*, Cambridge University Press, 2009.
- [18] R. B. Greigor, C. G. Parazzoli, J. A. Nielsen, M. H. Tanielian, D. C. Vier, S. Schultz, C. L. Holloway, and R. W. Ziolkowski, "Demonstration of impedance matching using a mu-negative (MNG) metamaterial," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 8, pp. 92-95, 2009.
- [19] P. Y. Chen and A. Alù, "Dual-mode miniaturized elliptical patch antenna with μ -negative metamaterials," *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 9, pp. 351-354, 2010.
- [20] H. Mosallaei and K. Saraband, "Design and modeling of patch antenna printed on magneto-dielectric embedded-circuit metasubstrate," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 55, no. 1, pp. 45-52, Jan. 2007.
- [21] F. Namin, T. G. Spence, D. H. Werner, and E. Semouchkina, "Broadband, miniaturized stacked-patch antennas for L-band operation based on magneto-dielectric substrates," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 58, no. 9, pp. 2817-2822, Sep. 2010.
- [22] A. Alù, F. Bilotti, N. Engheta, and L. Vegni, "Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded With metamaterials," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 55, no. 1, pp. 13-25, Jan. 2007.
- [23] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin, and P. Vincent "A metamaterial for directive emission," *Phy. Rev. Lett.*, vol. 89, no. 21, pp. 2139021- 2139024, Nov. 2002.



- [24] G. Lovat, P. Burghignoli, F. Capolino, D. R. Jackson, and D. R. Wilton, "Analysis of directive radiation from a line source in a metamaterial slab with low permittivity," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 3, pp. 117-130, Mar. 2006.
- [25] G. Lovat, P. Burghignoli, F. Capolino, and D. R. Jackson, "Combinations of low/high permittivity and/or permeability substrates for highly directive planar metamaterial antennas," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 1, no. 1, pp. 177-183, 2007.
- [26] S. Chaimool, K. L. Chung, and P. Akkaraekthalin, "Simultaneous gain and bandwidths enhancement of a single-feed circularly polarized microstrip patch antenna using a metamaterial reflective surface," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 22, pp. 23-37, 2010.
- [27] S. Chaimool, K. L. Chung, and P. Akkaraekthalin, "Bandwidth and gain enhancement of microstrip patch antennas using reflective metasurface," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E93-B, no. 10, pp. 2496-2503, Oct. 2010.