

# การลดขนาดโครงสร้างของอภิวัดโดยใช้สตริปคู่

## Metamaterial Structure Miniaturization using Double Strips

นิวัตร์ อังควิสิตพันธ์<sup>1\*</sup> ชลธิ์ โพธิ์ทอง<sup>2</sup> อติศร นวลอ่อน<sup>3</sup>

Niwat Angkawisitpan<sup>1\*</sup>, Chonlatee Photong<sup>2</sup> and Adisorn Nuan-on<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการลดขนาดของอภิวัด โครงสร้างของอภิวัดที่นำเสนอประกอบด้วยตัวกำทรวงแหวนแยก และสตริปคู่ โครงสร้างที่มีขนาดเล็กที่นำเสนอสามารถแสดงคุณสมบัติค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่สามารถพบได้ในธรรมชาติ การใช้สตริปคู่กับตัวกำทรวงแหวนแยกสามารถทำให้ได้ขนาดของอภิวัดมีขนาดเล็กลงและยังคงมีค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบด้วย วิธีการผลต่างอันตะเชิงเวลาซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขสำหรับการแก้สมการแมกซ์เวลล์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและทดสอบโครงสร้างใหม่นี้ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์จากวิธีการนี้ถูกนำมาเสนอและวิจารณ์ ผลการจำลองทำให้ได้ค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบในช่วงความถี่ 23.5 GHz ด้วยพื้นที่เพียง 37.5 % ของโครงสร้างเดิม

**คำสำคัญ** : อภิวัด, วัสดุแม่เหล็กเทียม, วิธีผลต่างอันตะเชิงเวลา, สตริปคู่

### Abstract

This paper is presented on the metamaterial structure miniaturization. The proposed metamaterial structure consists of Split Ring Resonator (SRR) and double strips. This compact structure can exhibit the negative magnetic permeability property that cannot be found in nature. Using double strips with the SRR enables us to obtain the miniaturized size of metamaterial and negative magnetic permeability material. An in-house Finite-Difference Time-Domain (FDTD) is the numerical electromagnetic modeling technique to solve the time-dependent Maxwell's equations. The FDTD is performed on the design structure to obtain the simulated results. Finally, the simulated results are presented and discussed. The results show that the negative permeability can be obtained at the range of 23.5 GHz with the size of 37.5 % of the original size.

**Keywords:** Metamaterials, Artificial Magnetic Materials, Finite-Difference Time-Domain, Double Strips.

---

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ <sup>2</sup> อาจารย์ <sup>3</sup> ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>1</sup>Assistant Professor, <sup>2</sup>Lecturer, <sup>3</sup>Research Assistant, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150, Thailand.

\*Corresponding author: Niwat Angkawisitpan, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham 44150, Thailand.

Email: niwat.a@msu.ac.th

## บทนำ

อภิวัด (metamaterials) คือวัสดุทางแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อเลียนแบบและเลียนแบบแม่เหล็กกระทำปฏิกิริยาร่วมกับอะตอมเทียม (artificial atoms) และเกิดคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ออกแบบไว้ได้

ในช่วงเวลา 10 กว่าปีมานี้ งานวิจัยทางด้านอภิวัดได้เติบโต และมีผู้คนทั้งในวงการวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ให้ความสนใจในคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของอภิวัดเป็นอย่างมากทั้งในด้านทฤษฎีและการทดลอง เนื่องจากว่า วัสดุดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เลนส์สมบูรณ์ (perfect lenses)<sup>1</sup> วัสดุล่องหน (cloaking devices)<sup>2-4</sup> ท่อนำคลื่นแสงในระดับที่เล็กกว่าความยาวคลื่น (sub-wavelength optical waveguide)<sup>5</sup> และการปรับปรุงคุณภาพของภาพจาก MRI (Magnetic Resonance Images)<sup>6</sup> เป็นต้น

อภิวัดถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มวัสดุผสม ซึ่งถูกสร้างขึ้นให้ได้คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่หาไม่ได้ในวัสดุในธรรมชาติทั่วไป ได้แก่ คุณสมบัติดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ (negative refractive index,  $n$ ) และคุณสมบัติซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ (negative magnetic permeability,  $\mu$ )

อภิวัดถูกสังเคราะห์จากโครงสร้างที่ทำจากโลหะมีตระกูล ซึ่งมีรูปร่างแบบพิเศษและแทรกไปในตัวกลางฉนวนชนิดหนึ่ง<sup>7-9</sup> อภิวัดจะถูกพิจารณาให้อยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (homogeneous materials) ดังรูปที่ 1<sup>10</sup> เมื่อคาบและโครงสร้างภายในของอภิวัดมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นนั้นๆ<sup>7</sup> โครงสร้างของอภิวัดจะทำหน้าที่เหมือนเลนส์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดคุณสมบัติใหม่ดังที่กล่าวมาแล้ว เป็นต้น เช่น คุณสมบัติดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ<sup>11</sup>

แนวคิดของอภิวัดที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ (negative electric permittivity,  $\epsilon$ ) และค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรก

โดย V.G. Veselago ในปี ค.ศ.1968<sup>12</sup> เมื่อค่าทั้งสองมีค่าเป็นลบในช่วงความถี่แม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกันจะมีผลทำให้เกิดค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบด้วย ดังสมการที่ 1<sup>10</sup>

$$\epsilon < 0 \quad \text{และ} \quad \mu < 0 \quad (1)$$

ซึ่งใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) เพื่อคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของแสงตามสมการที่ 2<sup>10</sup>

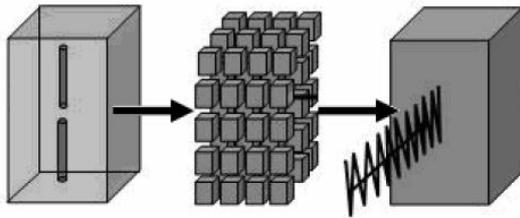
$$n = \pm\sqrt{\epsilon\mu} \quad (2)$$

และวัสดุทั่วไปจะใช้เครื่องหมายบวกจากสมการที่ 2

D.R. Smith และคณะ ได้อาศัยแนวคิดที่กล่าวมาแล้วเพื่อทำการสร้างอภิวัดที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ ซึ่งทำจากอภิวัดที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าเป็นลบ และอภิวัดที่มีค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ โดยนำโครงสร้างทั้งสองมารวมกันในวัสดุเดียวกัน<sup>13-14</sup>

อภิวัดที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบจะแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ผิดปรกติ เช่น มีค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นลบ กฎของสเนลล์ย้อนกลับ (reversal of snell's law) การเลื่อนของดอปเปลอร์แบบย้อนกลับ (reversal of doppler shift)<sup>13</sup> คลื่นย้อนกลับ (backward waves)<sup>15</sup> ท่อนำคลื่น (waveguides)<sup>16-17</sup> การกระจายของซีเรนคอฟ (Cerenkov radiation)<sup>18</sup> และการกำธ (resonance)<sup>19</sup>

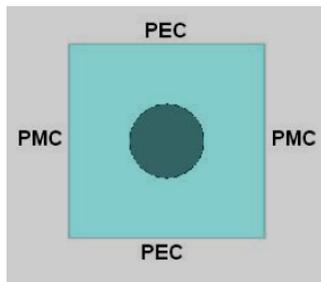
เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า ตัวกำธวงแหวนแบบแยก (split ring resonator, SRR) สามารถให้คุณสมบัติซาบซึมได้ทางแม่เหล็กติดลบ<sup>20</sup> ขนาดของมันมีขนาดประมาณหนึ่งในเจ็ดของความยาวคลื่น เพื่อให้อภิวัดที่มีความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กติดลบมีขนาดเล็กลง และมีสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ บทความนี้จึงเสนอโครงสร้างใหม่ที่ปรับปรุงให้มีขนาดเล็กลงจากโครงสร้างตัวกำธวงแหวนแบบแยกดั้งเดิม



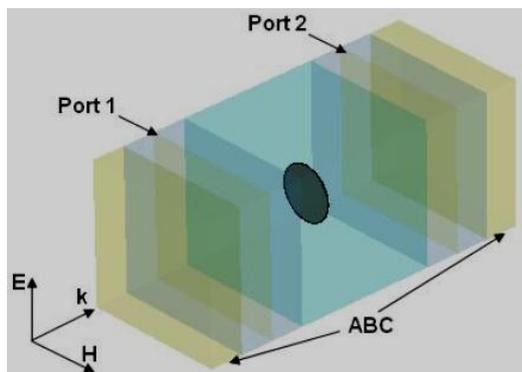
**Figure 1** Metamaterials composed of periodic cells with inclusions<sup>10</sup>

### การออกแบบโครงสร้างอภิวัดแบบใหม่

การออกแบบโครงสร้างใหม่ ใช้วิธีการผลต่างอันตะเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain Method, FDTD) ที่ห้องวิจัยได้พัฒนาขึ้นมาบนภาษาฟอร์แทรน (Fortran language) ตามหนังสือของ A. Taflove<sup>21</sup> บริเวณของการจำลองบนคอมพิวเตอร์สามารถดูได้จากรูปที่ 2 และตารางที่ 1



(a) Front View



(b) Isometric View

**Figure 2** (a) Front view and (b) Isometric View

**Table 1** Details of simulation domain

Items	Descriptions
Port 1	Obtain the reflection waves
Port 2	Obtain the transmission waves
Absorbing Boundary Conditions( ABC)	Absorb all the waves
Perfect Electric Conductor (PEC)	Repeat the structure in the direction of electric field (Image Theory) <sup>22</sup>
Perfect Magnetic Conductor (PMC)	Repeat the structure in the direction of magnetic field (Image Theory) <sup>22</sup>
Air (Blue)	$\epsilon_r=1$ and $\mu_r=1$
MTM structure	Copper ( $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m )

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ สนามไฟฟ้าส่งผ่าน และสนามไฟฟ้าสะท้อนกลับถูกจัดเก็บในลักษณะที่มีการโพลาไรเซชันทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าตกกระทบ สนามไฟฟ้าเหล่านี้ถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient, S11) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient, S21) ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ก็จะถูกใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กจากวิธีการของ W. Weir<sup>23</sup>

ตัวกำรรวงแหวนแยกมีพฤติกรรมเป็นตัวกำรทางแม่เหล็กซึ่งให้ค่าซาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบ โครงสร้างดั้งเดิมของตัวกำรชนิดนี้แสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากตัวราคาของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์มีราคาสูงมาก ดังนั้นวิธีการอันตะเชิงเวลาจึงถูกพัฒนาขึ้นมา

เพื่อใช้ในห้องวิจัย และทดสอบความถูกต้องกับ  
ผลงานวิจัยของ M. Kafesaki<sup>20</sup>

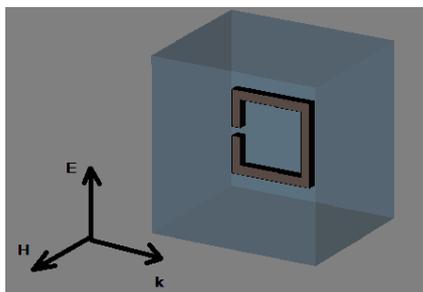


Figure 3 The original SRR in Ref. 20

หลังจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เราจะ  
ได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และค่าชาบซึมได้ทาง  
แม่เหล็กดังรูปที่ 4

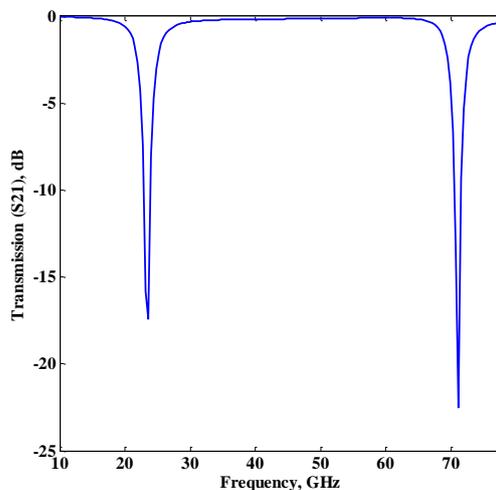
ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม  
ที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องกันกับผลงานวิจัยของ M.  
Kafesaki<sup>20</sup> การกำรทางแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ความถี่ 23.5  
GHz และมีค่าชาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบที่ความถี่  
เดียวกัน ดังนั้น โปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นสามารถใช้งาน  
ได้และมีผลที่ถูกต้อง จากผลการทดลองนี้พบว่า ช่วง  
ความถี่ที่มีค่าชาบซึมได้ทางแม่เหล็กเป็นลบสามารถ  
สังเกตได้จากช่วงความถี่ที่เกิดการกำรในกราฟค่า  
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ ซึ่งผลสังเกตนี้สามารถ  
นำไปใช้วิเคราะห์ผลการทดลองกับโครงสร้างที่  
ปรับปรุงใหม่ได้

ความเหนียวนา (L) ของตัวกำรวงแหวน  
แยกเกิดจากวงแหวนสี่เหลี่ยมที่ทำจากโลหะ ดังรูปที่ 3  
และค่าเก็บประจุ (C) ของตัวกำรวงแหวนแยกเกิด  
จากช่องว่างระหว่างตรงรอยแยก<sup>20</sup> และความถี่กำร  
ทางแม่เหล็ก( $\omega_m$ ) แปรผกผันกับพื้นที่ของวงแหวน  
หรือค่า LC ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

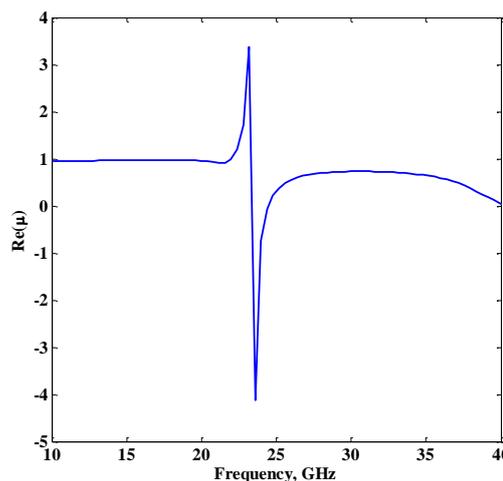
$$\omega_m^2 \propto \frac{1}{LC} \quad (3)$$

บทความนี้ได้ทำการเสนอวิธีการลดขนาด  
ของตัวกำรวงแหวนแยกด้วยการเพิ่มสตริปคู่เข้าไปใน  
โครงสร้างตัวกำรวงแหวนแยกแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 5  
เทคนิคนี้จะช่วยเพิ่มค่า LC ในความสัมพันธ์ที่ 3 มีผล

ทำให้ความถี่กำรทางแม่เหล็กเกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำลง  
ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 6



(a)



(b)

Figure 4 (a) The transmission (S21) of the SRR  
(b) The permeability of the SRR

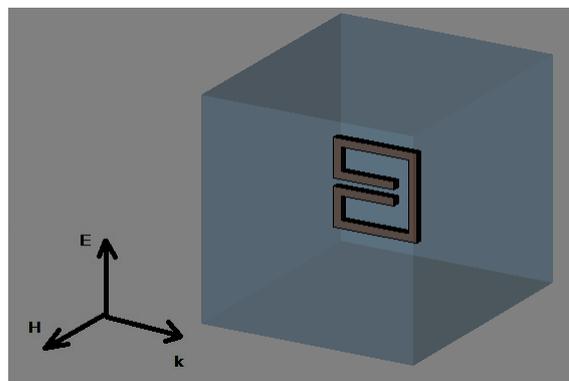
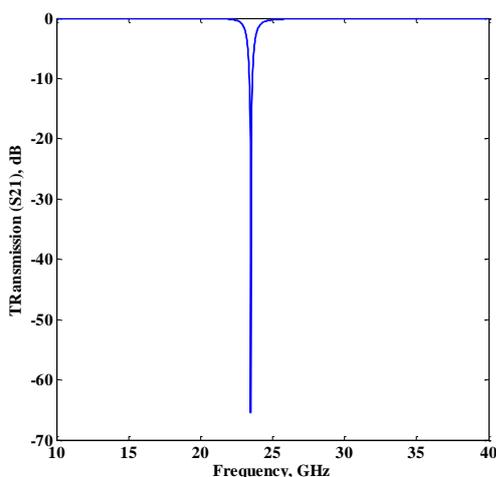


Figure 5 The proposed metamaterial structure

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าการทำช่องทางแม่เหล็กจากโครงสร้างที่นำเสนอเกิดขึ้นที่ความถี่ 23.5 GHz เช่นเดียวกับโครงสร้างดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม ขนาดของโครงสร้างที่นำเสนอมีพื้นที่เพียง 37.5 % ของโครงสร้างแบบดั้งเดิม หรือมีค่าเพียงหนึ่งในสิบสองของความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นเท่ากับ 12.75 มิลลิเมตร) ดังนั้น ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้จึงได้โครงสร้างใหม่ที่ขนาดเล็กกว่าโครงสร้างเดิมของตัวกำรขวางแหวนแยก



**Figure 6** The transmission (S21) of the proposed structure

### บทสรุป

ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าสตริปคู่ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในตัวกำรขวางแหวนแยกแบบดั้งเดิมสามารถลดขนาดของโครงสร้างเดิมได้ ด้วยเทคนิคนี้เป็นการเพิ่มค่า LC ดังความสัมพันธ์ที่ 3 โดยใช้พื้นที่เพียง 37.5 % ของโครงสร้างเดิม หรือขนาดเพียงหนึ่งในสิบสองของความยาวคลื่น วิธีการผลต่างอันตะเชิงเวลาถูกนำมาใช้ในการออกแบบและตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างที่นำเสนอ

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการเกษตรกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อนุญาต

ให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

1. VJ L., Islam M., Chan M., Horsley D., Wu W., Wang S., Williams R. Realization of 3D isotropic negative index materials using massively parallel and manufacturable microfabrication and micromachining technology. *Material Research Society Symposium Proceedings*. 2006; Vol.919, 0919-J02-01.
2. Valentine J., Zhang S., Zentgraf T., Ulin-Avila E., Genov D., Bartal G., Zhang X. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*. 2008; 455: 376-379.
3. Bulu I., Caglayan H., Aydin K., Ozbay E. Compact size highly directive antennas based on the SRR metamaterial medium. *New Journal of Physics*. 2005; 7:223.
4. Liu N., Guo H., Fu L., Kaiser S., Schweizer H., Giessen H. Three dimensional photonic metamaterials at optical frequencies. *Nature Materials*. 2007; 7: 31-37.
5. Thomas Z., Caglayan H., Aydin K., Ozbay E. Enhanced microstrip stopband filter using a metamaterial substrate. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2006; 48(8): 1522-1525.
6. Ikonen P., Maslovski S., Simovski C., Tretyakov S. On artificial magnetodielectric loading for improving the impedance bandwidth properties of microstrip antennas. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 2006; 54(6): 1654-1662.
7. Bilotti F., Vegni L. From metamaterial-based to metamaterial-inspired miniaturized antennas: a possible procedure and some

- examples. 2008 Union of Radio Science Meeting. August 11, 2008. Chicago, IL, USA.
8. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 2000; 85:3966.
  9. Alu A., Engheta N. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings. *Phys. Rev. E.* 2005; 72:016623.
  10. Angkawisitpan N. Novel technique for 3D isotropic metamaterial fabrication. Ph.D. Dissertation. University of Massachusetts Lowell. 2009.
  11. Leonhardt U. Optical conformal mapping. *Science.* 2006; 312:1777.
  12. Veselago V.G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Soviet Physics Uspekhi.* 1968; 10(4): 509-514.
  13. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys. Rev. Lett.* 2000; 84(18): 4184-4187.
  14. Shelby E.A., Smith D.R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science.* 2001; 292:77-79.
  15. Lindell I.V., Tretyakov S.A., Nikoskinen K.I., Ilvonen S. BW media – media with negative parameters, capable of supporting backward waves. *Microwave and Optical Technology Letters.* 2001; 31(2): 129-133.
  16. Wu B., Grzegorzczak T.M., Zhang Y., Kong J.A. Guided modes with imaginary transverse wave number in a slab waveguide with negative permittivity and permeability. *Journal of Applied Physics.* 2003; 93(11): 9386-9388.
  17. Caloz C., Chang C., Itoh T. Full-wave verification of the fundamental properties of left-handed materials in waveguide configurations. *Journal of Applied Physics.* 2001; 90(11): 5483-5486.
  18. Tomasz J.L., Grzegorzczak M., Zhang Y., Pacheco Jr. J., Wu B., Kong J.A.. Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability. *Optics Express.* 2003; 11(7): 723-734.
  19. Engheta N. An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability. *IEEE Trans. Antennas and Wireless Propagation Letters.* 2002; 1:10-13.
  20. Kafesaki M., Koschny T, Penciu R., Gundogdu T., Economou E., Soukoulis C. Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* 2005; 7: S12-S22.
  21. Taflove A., Hagness S. *Computational Electrodynamics : the Finite-Difference Time-Domain method.* Artech House. 2000.
  22. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design.* John Wiley & Sons, Inc. 2005.
  23. Weir W. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. *Proceedings of the IEEE.* 1974; 62(1): 33-36.