

Metamaterials

Jaume Anguera Pros
Aurora Andújar Linares

PID_00210805



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Orígens	7
2. Medis esquerrans	9
3. Aplicacions	12
Resum	14
Bibliografia	15

Introducció

Els **metamaterials** es defineixen com estructures periòdiques (o quasi-periòdiques) fabricades amb unes propietats electromagnètiques controlables, diferents de les dels components que els constitueixen, que en alguns casos no existeixen en la natura. El prefix del nom prové del grec *meta*, que significa ‘més enllà’.

Recentment s’ha obert un nou camp de recerca en l’àrea de l’electromagnetisme aplicat i de l’enginyeria de microones basat en el control de les propietats electromagnètiques de certes estructures periòdiques artificials, conegudes amb el nom de *metamaterials*.

El present mòdul es divideix en quatre apartats. En el primer es fa una breu introducció històrica. En el segon es presenten les propietats dels medis esquerrans. En el tercer s’il·lustren algunes aplicacions dels metamaterials. Finalment, el darrer apartat resumeix i presenta les conclusions del mòdul.

Lectures complementàries

Podeu aprofundir més sobre els metamaterials en les obres següents:

G. V. Eleftheriades; K. G. Balmain (2005). “Negative-refraction metamaterials: Fundamental principles and applications”. *Wiley-IEEE Press*.

R. Marqués; F. Martín; M. Sorolla (2008). “Metamaterials with negative parameters: Theory, design, and microwave applications”. *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.

N. Engheta; R. W. Ziolkowski (2006). “Metamaterials: Physics and Engineering Explorations”. *Wiley-IEEE Press*.

Objectius

Amb l'estudi d'aquest mòdul assolireu els objectius següents:

- 1.** Entendre el que són els metamaterials.
- 2.** Saber els camps en què s'apliquen.

1. Orígens

El concepte s'origina en un treball del físic rus Víctor Veselago el 1968. En les seves recerques especulava amb la possible existència d'un hipotètic medi amb unes propietats electromagnètiques úniques. Entre aquestes propietats electromagnètiques úniques es troben la inversió de la llei de Snell, l'efecte Doppler invers o l'efecte de Vavilov-Cerenkov. Veselago demostrava a més que les ones electromagnètiques que es propaguen per un medi esquerrà (*left handed material*) presenten un antiparal·lelisme entre la velocitat de grup i la velocitat de fase, efecte que es coneix com a **ona regressiva** (*backward wave*). Per a entendre més bé aquest fenomen, se'n presenta un esquema en la figura 1.

Figura 1. Quadre amb les possibles combinacions de permitivitat elèctrica (ϵ) enfront de la permeabilitat magnètica (μ) i l'índex de refracció corresponent (n)

	$\epsilon < 0$	$\epsilon > 0$
$\mu > 0$	n és imaginari Ones evanescents	$n > 0$ i real Materials dretans
$\mu < 0$	$n < 0$ i real Materials esquerrans	n és imaginari Ones evanescents

Font: Bonache, 2006; Falcone, 2005

Caldria esperar trenta anys des de l'article de Veselago fins que es produís la següent cita històrica en la recerca dels metamaterials. Al final dels anys noranta del segle xx, J. B. Pendry va ser el primer que va teoritzar una manera pràctica de construir un material esquerrà.

Un **material esquerrà** (*left handed material*) en aquest context és un material en què la regla de la mà dreta no es compleix, la qual cosa permet que una ona electromagnètica transmeti energia (amb una velocitat de grup) en la direcció oposada a la seva velocitat de fase.

Lectura complementària

Sobre els orígens del concepte *metamaterials*, podeu consultar l'obra següent:

V. G. Veselago (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol. 10, núm. 4, pàg. 509-514).

Lectures complementàries

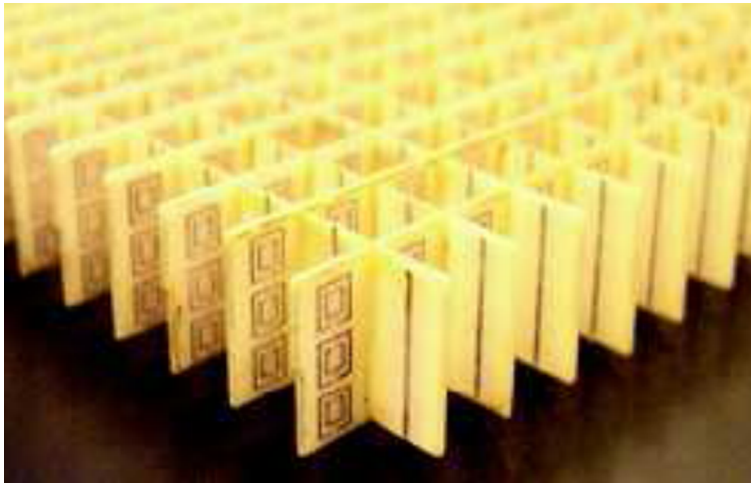
J. Bonache (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

F. J. Falcone (2005). *Synthesis and applications of microwave metamaterials in planar circuit technology from electromagnetic bandgaps to left handed materials*. Tesis Doctoral. Universitat Pública de Navarra.

La idea inicial de J. B. Pendry era que una distribució de fils conductors alineats al llarg de la direcció de propagació de l'ona dóna lloc a una permitivitat efectiva negativa ($\epsilon < 0$). Ara bé, ja hi ha materials naturals (com els ferroelèctrics) amb permitivitat negativa: el repte era construir un material que tingués al mateix temps una permeabilitat negativa ($\mu < 0$).

El 1999, Pendry va proposar una estructura de conductors de fil fins que presenten permitivitat elèctrica negativa, i posteriorment va descriure una partícula anomenada *ressonador d'anells tallats* (SRR, *split ring resonator*), que presentava permeabilitat magnètica negativa. L'any 2000, Smith combina els anells SRR ($\mu < 0$) i els fils metàl·lics paral·lels de Pendry amb una $\epsilon < 0$ per fabricar la primera estructura "esquerrana" (*left handed*) de la història (figura 2).

Figura 2. Estructura periòdica que combina efectes dels SRR i els fils fins per aconseguir un comportament esquerrà



Font: Shelby, Smith i Schultz (2001).

En resum, els metamaterials es poden classificar segons les estructures següents:

- **DNG** (*double negative materials*): estructures amb $\epsilon < 0$ i $\mu < 0$.
- **LH** (*left-handed materials*): estructures en què la direcció del camp \vec{E} , \vec{H} i la direcció de propagació segueix una relació a esquerra (figura 4b).
- **CRLH** (*composite right/left-handed*): estructures que combinen propietats de medis "dretans" (convencionals) amb medis esquerrans.
- **AMC** (*artificial magnetic conductors*): estructures que presenten les propietats de conductors magnètics perfectes.
- **EBG** (*electromagnetic band gap*): estructures amb bandes prohibides que eviten la propagació d'ones.

L'apartat següent descriu medis esquerrans, i en l'apartat 3 es mostren algunes aplicacions dels metamaterials. Les conclusions es recullen en el resum.

Lectures complementàries

J. B. Pendry; A. J. Holden; D. J. Robbins; W. J. Stewart (1999). "Magnetism from conductors and enhanced linear media". *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* (vol. 47, núm. 11, pàg. 2075-2084).

R. A. Shelby; D. R. Smith; S. Schultz (2001). "Experimental verifications of a negative index of refraction". *Science* (vol. 292, pàg. 77-79).

Lectura complementària

Sobre la classificació dels metamaterials, podeu consultar l'obra següent:

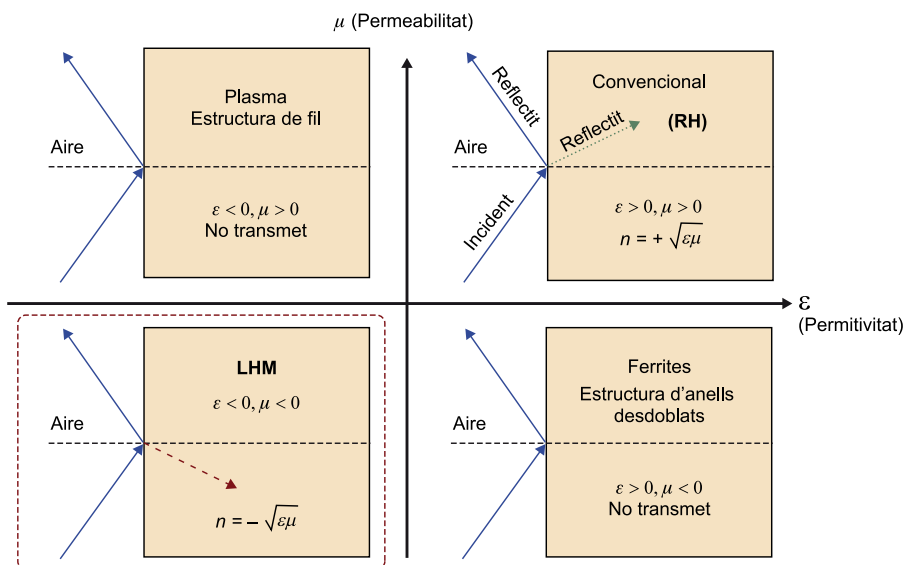
F. Yang; Y. Rahmat-Samii (2009). *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambridge University Press.

2. Medis esquerrans

Atès que els medis esquerrans van ser uns dels primers metamaterials teoritzats per Veselago, és interessant presentar-ne alguna de les propietats.

En un medi efectiu, la cel·la base o disseny base que compon el medi té unes dimensions molt inferiors a la longitud d'ona en aquest medi, de manera que el senyal que hi viatja a través el percep com un medi homogeni, sempre parlant en termes de propietats electromagnètiques. Per aquest motiu, per a aquest tipus de medis es defineixen magnituds electromagnètiques efectives, com ara la permeabilitat magnètica efectiva μ_{eff} i la permitivitat dielèctrica efectiva ϵ_{eff} . A partir d'aquestes magnituds es dissenya una cel·la base del medi efectiu, tot ajustant uns valors adequats, com la impedància característica Z_0 i la velocitat de fase. En concret, es poden distingir quatre possibles medis o escenaris (figura 3), quatre quadrants o casos dividits segons el signe de la permitivitat dielèctrica (ϵ_{eff}) enfront de la permeabilitat magnètica (μ_{eff}).

Figura 3. Escenaris electromagnètics segons la permeabilitat magnètica i la permitivitat dielèctrica



Font: Bonache, 2006; Falcone, 2005.

En el primer dels quadrants hi ha el cas en què ϵ_{eff} i μ_{eff} són positives, situació que es correspon amb la d'un medi convencional (dielèctric). Entre els altres quadrants, n'hi ha dos en què la propagació no està permesa, és a dir, la constant de propagació és complexa i l'estructura només admet modes evanescents; són aquells en què ϵ_{eff} o μ_{eff} és l'una positiva i l'altra negativa. Finalment, hi ha un altre quadrant en què la propagació és possible i correspon al cas en què ϵ_{eff} i μ_{eff} són negatives. Aquesta combinació no apareix de manera espontània en la natura, però presenta característiques importants per a ser es-

Lectura complementària

Sobre els materials esquerrans, podeu consultar l'obra següent:

V. G. Veselago (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol. 10, núm. 4, pàg. 509-514).

Lectura complementària

J. Bonache (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

F. J. Falcone (2005). *Synthesis and applications of microwave metamaterials in planar circuit technology from electromagnetic bandgaps to left handed materials*. Tesis doctoral. Universitat Pública de Navarra.

tudies i aplicades. Els paràmetres ϵ i μ són unes magnituds fonamentals que determinen la propagació de les ones electromagnètiques, ja que apareixen en la relació de dispersió que associa la pulsació de la radiació ω i el vector d'ona k .

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \rightarrow n = \pm \sqrt{\epsilon \cdot \mu} \quad 4.1$$

Aparentment, per a un medi sense pèrdues, aquests paràmetres són nombres reals, i per tant un canvi simultani en els valors de ϵ i μ no implicaria canvis en la relació de dispersió. Tanmateix, per a demostrar la conseqüència dels canvis, cal analitzar-los en les expressions en què apareixen per separat.

A partir de les equacions de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad 4.2$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = -\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 4.3$$

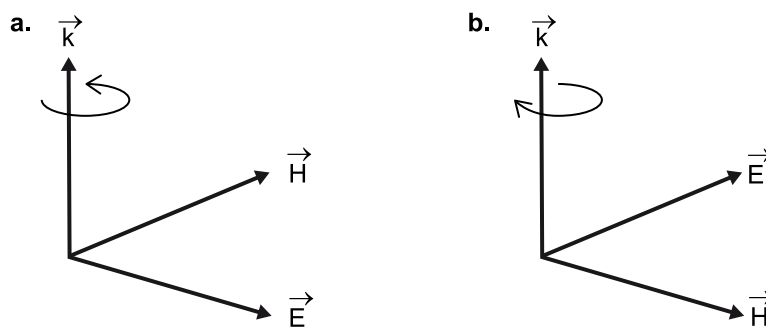
en què \vec{E} és el camp elèctric i \vec{H} és el camp magnètic. Si considerem la propagació d'una ona plana en què totes les quantitats són proporcionals a $e^{-j(kz-\omega t)}$, les expressions 4.2 i 4.3 se simplifiquen a:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \cdot \vec{H} \quad 4.4$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \cdot \vec{E} \quad 4.5$$

A partir d'aquestes relacions es pot veure que si $\epsilon > 0$ i $\mu > 0$, \vec{E} , \vec{H} i \vec{k} formen un triplet dretà que es mostra en la figura 4a, mentre que si, per contra, $\epsilon < 0$ i $\mu < 0$, \vec{E} , \vec{H} i \vec{k} formen un triplet esquerrà que es mostra en la figura 4b (per això s'anomena *left handed*).

Figura 4. Relació \vec{E}, \vec{H} i \vec{k} (direcció de propagació)



a. Per a un medi convencional (*right handed*). b. Per a un medi esquerrà (*left handed*).

El vector de Poynting $\vec{\mathcal{P}}$ es defineix segons l'expressió següent:

$$\vec{\rho} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 4.6$$

en què es pot observar que sempre és perpendicular a \vec{E} i \vec{H} , per la qual cosa el vector d'ona tindrà la mateixa direcció que el vector Poynting, i formarà un altre triplet dretà, com en el cas del medi convencional. Així doncs, en un medi esquerrà tindrà sentits oposats. I aleshores la velocitat de fase i la velocitat de grup tindran signes oposats. Una altra característica d'aquests medis és que presenten un índex de refracció negatiu.

En conclusió, aquest tipus de materials amb medis esquerrans s'anomenen **esquerrans**, o *left-handed*, per l'orientació que prenen \vec{H} respecte del vector d'ona \vec{k} . També reben el nom de **materials backward**, *negative-index* o *negative-refractive index* (NRI).

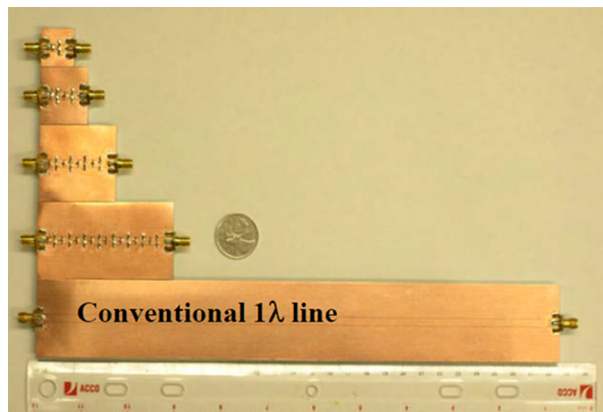
3. Aplicacions

S'ha avançat molt en l'àmbit dels metamaterials, tant en l'aspecte teòric com pel que fa a les aplicacions. En la classificació següent es resumeixen algunes aplicacions dels metamaterials en el camp d'antenes i circuits de microones:

1) Exemples de l'aplicació dels metamaterials en el disseny de circuits de microones per a agrupacions d'antenes:

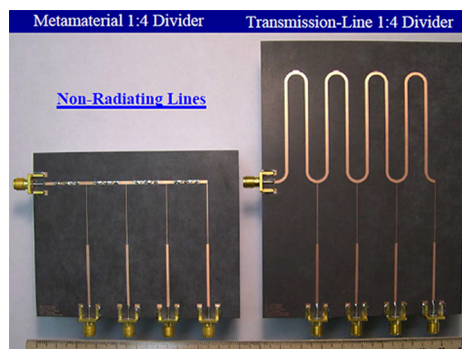
a) Desfasadors miniatura basats en estructures esquerranes per a agrupacions d'antenes.

Figura 5. Desfasadors miniatura basats en estructures *left-handed* per a agrupacions d'antenes



b) Divisors miniatura sintetitzats mitjançant estructures esquerranes per a agrupacions d'antenes.

Figura 6. Divisors miniatura sintetitzats mitjançant estructures esquerranes per a agrupacions d'antenes



Lectures complementàries

Sobre els avenços en l'àmbit dels metamaterials:

G. V. Eleftheriades; K. G. Balmain (2005). "Negative-refraction metamaterials: Fundamental principles and applications". *Wiley - IEEE Press*.

R. Marqués; F. Martín; M. Sorolla (2008). "Metamaterials with negative parameters: Theory, design, and microwave applications". *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.

N. Engheta; R. W. Ziolkowski (2006). "Metamaterials: Physics and Engineering Explorations". *Wiley- IEEE Press*.

Lectura complementària

Sobre els desfasadors miniatura basats en estructures esquerranes:

M. Antoniades; G. V. Eleftheriades (2003). "Compact, linear, lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, núm. 7, pàg. 103-106).

Lectura complementària

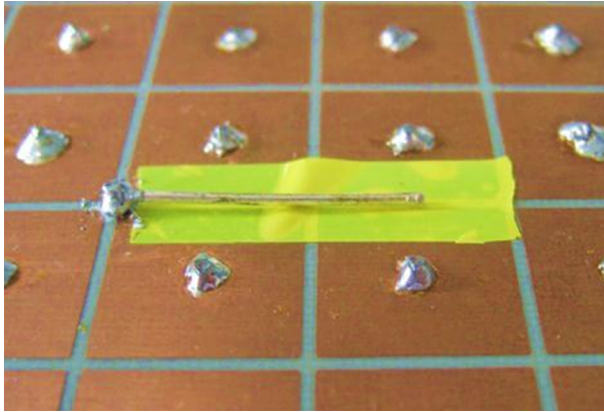
Sobre els divisors miniatura sintetitzats mitjançant estructures esquerranes:

G. V. Eleftheriades; M. Antoniades; A. K. Iyer; R. Islam (2004). *Proceedings of the 27th ESA Antenna Technology Workshop*. Santiago de Compostel·la, Espanya, 9-11 de març.

2) Exemples d'aplicació dels metamaterials en el camp del disseny d'antenes

a) *Artificial magnetic conductors*: possibilitat de col·locar antenes de fil molt a prop d'un conductor elèctric sobre el qual existeix una estructura periòdica que es comporta com un conductor magnètic per a un cert marge freqüencial.

Figura 7. Monopòl sobre estructura AMC



b) Antena basada en estructures CRLH, que tenen, entre d'altres, els avantatges següents: miniaturització i menor dependència freqüencial de la direcció del màxim de radiació en agrupacions d'antenes.

Figura 8. Antena basada en estructures CRLH



Lectura complementària

Sobre les antenes basades en estructures CRLH, podeu consultar l'obra següent:

R. Siragusa; E. Perret; P. Lemaitre-Auger; H. Van Nguyen; S. Tedjini; C. Caloz (2012). "A tapered CRLH interdigital/stub leaky-wave antenna with minimized side-lobe levels". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 11, pàg. 1214-1217).

Resum

Mitjançant estructures periòdiques és possible sintetitzar els anomenats *metamaterials*, que obren un nou camp d'aplicació en el disseny de circuits de microones i antenes. Entre les propietats més significatives que tenen hi ha la miniaturització de dispositius, les superfícies magnètiques –que permeten dissenyar antenes amb perfils molt prims– i les estructures de banda prohibida –que permeten desacoblar antenes i dissenyar filtres.

Bibliografia

- Antoniades, M.; Eleftheriades, G. V.** (2003). "Compact, linear, lead/lag metamaterial phase shifters for broadband applications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, núm. 7, pàg. 103-106).
- Bonache, J.** (2006). *Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados*. Tesi doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Eleftheriades, G. V.; Antoniades, M.; Iyer, A. K.; Islam, R.** (2004). *Proceedings of the 27th ESA Antenna Technology Workshop*. Santiago de Compostel·la, Espanya, 9-11 de març.
- Eleftheriades, G. V.; Balmain, K. G.** (2005). "Negative-refraction metamaterials: Fundamental principles and applications". *Wiley- IEEE Press*.
- Engheta, N.; Ziolkowski, R. W.** (2006). "Metamaterials: Physics and engineering explorations". *Wiley- IEEE Press*.
- Falcone, F. J.** (2005). *Synthesis and applications of microwave metamaterials in planar circuit technology from electromagnetic bandgaps to left handed materials*. Tesi doctoral. Universitat Pública de Navarra.
- Marqués, R.; Martín, F.; Sorolla, M.** (2008). "Metamaterials with negative parameters: Theory, design, and microwave applications". *Wiley Series in Microwave and Optical Engineering*.
- Pendry, J. B.; Holden, A. J.; Robbins, D. J.; Stewart, W. J.** (1999). "Magnetism from conductors and enhanced linear media". *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* (vol. 47, núm. 11, pàg. 2075-2084).
- Shelby, R. A.; Smith, D. R.; Schultz, S.** (2001). "Experimental verifications of a negative index of refraction". *Science* (vol. 292, pàg. 77-79).
- Siragusa, R.; Perret, E.; Lemaître-Auger, P.; Nguyen, H. van; Tedjini, S.; Caloz, C.** (2012). "A tapered CRLH interdigital/stub leaky-wave antenna with minimized sidelobe levels". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 11, pàg. 1214-1217).
- Veselago, V. G.** (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ". *Sov. Phys. Uspekhi* (vol. 10, núm. 4, pàg. 509-514).
- Yang, F.; Rahmat-Samii, Y.** (2009). *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*. The Cambridge RF and Microwave Engineering Series, Cambriadge University Press.

