

Circuits de microones

Ignacio Gil Galí
Carles Recasens i Aloy
Albert-Miquel Sánchez Delgado

PID_00193539

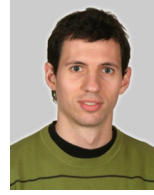
Material docent de la UOC


Ignacio Gil Galí

Llicenciat en Ciències Físiques (2000), enginyer superior en Electrònica (2003) i doctor enginyer en Electrònica (2007) per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Entre els anys 2003-2008 va ser professor associat i investigador en el grup de RF-Microones del Departament d'Enginyeria Electrònica de la UAB. Del 2006 al 2008 va treballar en el Departament d'R+D d'EPSON Europe Electronics GmbH dissenyant circuits integrats RF-CMOS d'altres prestacions i receptors de radiofreqüència d'ultra baix consum. El 2008 es va incorporar a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) com a professor lector. Des de l'any 2011 és professor titular en el Departament d'Enginyeria Electrònica de la UPC i coordinador del grau d'Enginyeria de Sistemes Audiovisuais. Des de l'any 2012 és col·laborador de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Actualment la seva activitat investigadora inclou circuits i dispositius d'RF-Microones, metamaterials i compatibilitat electromagnètica, i és autor de diverses publicacions científiques i patents.


Carles Recasens i Aloy

Enginyer superior de Telecomunicacions (1994) per la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i màster en Administració d'empreses (MBA) el 2004 per l'Escola d'Administració d'Empreses (EAE). Professional del sector de l'electrònica de radiofreqüència des de 1994 fins a la data en diferents empreses multinacionals, ha compaginat el seu exercici professional amb la docència com a professor associat en la UPC durant el període del 2002 al 2011, primer en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions i després en el d'Enginyeria de Sistemes Automàtics i Informàtica Industrial. Entre els seus desenvolupaments professionals destaquen el disseny de sistemes de radiofreqüència d'aplicació en el sector de l'automòbil com el *remote keyless entry* i el sistema immobilitzador (com a cap de projecte en LEAR CORPORATION) o el sistema d'antenes fractals actives multi-banda per a recepció AM, FM, GSM, GPS i Sirius (com a director d'R+D en Advanced Automotive Antennas). Actualment és expert en sistemes *embedded* per a aplicacions radar a 24 GHz en *integration software and electronic engineering* (ISEE), incloent el disseny d'antenes, filtres, transmissors i receptors de microones.


Albert-Miquel Sánchez Delgado

Enginyer tècnic de Telecomunicacions en l'especialitat de Sistemes de Telecomunicacions (2004), enginyer superior de Telecomunicacions (2006) i doctor enginyer en Electrònica (2010) per Enginyeria La Salle, Universitat Ramon Llull. Des de l'any 2005 ha estat professor, associat fins al 2011 i lector des de llavors, de les assignatures *Propagació electromagnètica*, *Laboratori de comunicacions* i *Circuits de microones*, en el Departament d'Enginyeria de La Salle, Universitat Ramon Llull. El 2006 va entrar a formar part del Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions (GRECO), i des de l'any 2012 és col·laborador de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Actualment la seva activitat investigadora inclou el disseny d'antenes reconfigurables i la compatibilitat electromagnètica (EMC), especialment la caracterització dels efectes interferents, la modelització de dispositius no lineals, i procediments i sistemes experimentals de mesura, i és autor de diverses publicacions científiques.

Primera edició: febrer 2013

© Ignacio Gil Galí, Carles Recasens i Aloy, Albert-Miquel Sánchez Delgado

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2013

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Disseny: Manel Andreu

Realització editorial: Eureka Media, SL

Dipòsit legal: B-31.613-2012



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-Compartir igual (BY-SA) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu modificar l'obra, reproduir-la, distribuir-la o comunicar-la públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), i sempre que l'obra derivada quedi subjecta a la mateixa llicència que el material original. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.ca>

Introducció

Circuits de microones és una assignatura pròpia de l'itinerari de Sistemes de Comunicació del grau de Tecnologies de Telecomunicació de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). En efecte, els circuits i dispositius electrònics que operen en el rang de freqüència de les microones (300 MHz-300 GHz) exerceixen un paper fonamental en el disseny i la implementació dels sistemes de comunicació moderns. Actualment la nostra vida quotidiana està condicionada per nombroses aplicacions que utilitzen circuits de microones.

Alguns exemples significatius

- Telefonia mòbil: sistemes de generació 3G-4G
- Tecnologia *wireless*: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc.
- Transmissió de TV
- Automòbil i trànsit
- Satèl·lit i GPS
- Radar i navegació
- Aplicacions mèdiques: diagnosi
- Identificació per radiofreqüència (RFID)
- Vigilància i seguretat
- Electrònica militar
- Radiometria i detecció remota
- Radioastronomia

L'assignatura es nodreix dels coneixements prèviament adquirits per l'estudiant en *Electrònica de comunicacions i Física II*. De manera específica, es pretén que l'estudiant adquireixi les competències de grau corresponents, mostrades a continuació:

- Capacitat d'anàlisi de components i les seves especificacions per a sistemes de comunicacions guiades i no guiades.
- Capacitat per a la selecció de circuits, subsistemes i sistemes de radiofreqüència, microones, radiodifusió, radioenllaços i radiolocalització.
- Capacitat per a la selecció d'antenes, equips i sistemes de transmissió, propagació d'ones guiades i no guiades per medis electromagnètics, de radiofreqüència o òptics i la gestió corresponent de l'espai radioelèctric i assignació de freqüències.

D'aquesta manera, *Circuits de microones* està orientada a aprofundir en el comportament dels circuits a altes freqüències, a partir de la teoria de línies de transmissió, i també a estudiar les tècniques d'anàlisi d'aquests circuits, com ara l'ús dels paràmetres S . Així mateix, s'abordarà el disseny de circuits passius de microones, amplificadors, mescladors i oscil·ladors operant a tals freqüències. Finalment s'estudiarà la teoria de guies d'ones.

S'ha estructurat l'assignatura en sis mòduls, els continguts dels quals es resumeixen a continuació.

En el mòdul "Línies de transmissió" s'introdueix la teoria de línies de transmissió, necessària per a modelitzar els fenòmens de propagació en circuits que operen a freqüències de microones. Posteriorment es repassa i amplia la teoria i es detallen les eines per a la modelització matemàtica de les línies de transmissió. Per a això es defineixen els paràmetres bàsics que caracteritzen les línies de transmissió i s'apliquen al càlcul d'aquestes línies (impedància característica, coeficients de reflexió i transmissió, etc.). S'avalua també el balanç de potències de les línies de transmissió, i també les tècniques més importants d'adaptació. Finalment, s'estudia l'impacte de les pèrdues i la distorsió i s'introdueixen les principals línies de transmissió físiques.

El mòdul "Anàlisi de circuits de microones" està dedicat a comprendre les xarxes de microones i els paràmetres rellevants per a analitzar-les. Inicialment es repassen els paràmetres Z i Y , i se'n descriuen les limitacions per a caracteritzar els circuits de microones. A continuació s'estudien els paràmetres S , ja que són de més utilitat en el càlcul de xarxes de microones, i es posa èmfasi en la seva interpretació. Així mateix, s'estableixen les relacions i conversions entre els diferents paràmetres S , Z , Y , T i $ABCD$. Finalment, s'analitza el funcionament i utilitat dels analitzadors de xarxes com a instruments de mesura de circuits de microones.

El mòdul "Circuits passius de microones" està centrat en el disseny, modelització i simulació dels circuits passius bàsics de microones amb la pretensió d'usar-los en funció del tipus d'aplicació. S'inicia aquest estudi analitzant l'impacte de freqüències de microones en components passius (resistències, inductors i capacitats) i les seves diferències amb els models de baixa freqüència. A continuació es descriuen les principals topologies, tècniques i equacions de disseny, i també les matrius de paràmetres S de diversos circuits passius: atenuadors, adaptadors, inversors, transformadors $\lambda/4$, *tapers*, divisors de potència, acobladors direccionals, híbrids, ressonadors i filtres de microones.

En el mòdul "Amplificadors lineals de microones" es repassen les figures de mèrit més rellevants dels amplificadors de microones, i també el procés de modelització i polarització d'aquests. En primer lloc, es descriuen en profunditat els tipus de guany de l'amplificador i es revisen altres figures de mèrit, com ara la figura de soroll, aïllament, pèrdues de retorn, linealitat, etc. Seguidament, s'aborda el procés de disseny d'amplificadors sota l'aproximació d'unilateralitat, a fi de simplificar-ne els càlculs. A més del càlcul de guany, es fa una anàlisi de l'estabilitat dels amplificadors i s'avalua també el factor de soroll. Finalment, es descriuen les tècniques estàndard de polarització i també el procediment de disseny lineal d'amplificadors de microones.

En el mòdul "Mescladors, multiplicadors i oscil·ladors de microones" s'estudia la modelització i disseny de circuits de microones no lineals, com ara els mescladors, multiplicadors de freqüència i oscil·ladors. En primer lloc, s'analitzen les característiques de diversos tipus de díodes (Schottky, PIN i Impatt) i, posteriorment, les de dispositius actius com ara els transistors bipolars i FET. Una vegada feta aquesta anàlisi s'utilitzen aquests components per a introduir les topologies de mescladors, multiplicadors de freqüència i oscil·ladors. Per a cada cas s'estudien les corresponents figures de mèrit, i també la modelització i el procés de disseny.

En el mòdul "Guies d'ones" s'aborden els diferents tipus de guies d'ones i les seves característiques principals. Inicialment s'introdueixen les guies d'ones, es descriu la propagació de camps i es desenvolupa la propagació de formes en guies d'ones. Així mateix, s'estudia com podem modelitzar aquestes guies d'ones mitjançant línies de transmissió, incloent-hi discontinuïtats i obstacles. Finalment, es presenten diversos exemples de circuits passius bàsics de guies d'ones.

Finalment, en l'"Annex" es desenvolupen detalladament una sèrie de continguts importants per a l'assignatura, com la carta de Smith, les figures de mèrit dels amplificadors o la unió PN. Aquests continguts s'han cursat en assignatures prèvies, però s'hi insisteix com a element de repàs per als estudiants, en cas que sigui necessari.

L'estudi de *Circuits de microones* pot, a primera vista de l'estudiant, semblar complex, ja que requereix la utilització de paràmetres d'anàlisi no convencionals per a la resolució de circuits electrònics que operen a freqüències baixes o mitjanes. No obstant això, això no ha de ser necessàriament així. En efecte, si s'analitza i comprèn detalladament cada apartat dels primers mòduls, el seguiment de la resta es fa de manera natural. En aquest sentit, l'estudi pautat dels continguts que es desenvolupen al llarg dels diferents mòduls inclou una àmplia varietat d'exemples pràctics des del punt de vista de càlcul i simulació amb l'eina ADS. Aquests exemples ajuden a aclarir i retenir els conceptes teòrics estudiats en cadascun dels apartats. Resulta altament recomanable fer aquests exercicis resolts, ja que són molt beneficiosos a l'hora d'adquirir les capacitats i competències esmentades anteriorment, i també per a la comprensió dels circuits que fonamenten les aplicacions pràctiques actuals i del futur.

Objectius

L'estudi dels continguts de l'assignatura permet adquirir les competències i coneixements necessaris amb la finalitat d'aconseguir els objectius generals següents:

1. Conèixer els fenòmens de propagació en les línies de transmissió, i també la modelització i formulació matemàtica.
2. Entendre els conceptes d'impedància característica, coeficient de reflexió, relació d'ona estacionària i adaptació.
3. Saber utilitzar la carta de Smith per a la resolució de circuits de microones i el càlcul de xarxes d'adaptació.
4. Conèixer els mitjans de transmissió físics per a la propagació correcta de senyals en règim d'alta freqüència i la implementació de circuits de microones.
5. Conèixer els avantatges que ofereixen els paràmetres S en el càlcul i caracterització de xarxes de microones.
6. Saber relacionar els paràmetres S amb els paràmetres Z , Y , T i $ABCD$.
7. Entendre el concepte de xarxes passives, recíproques i sense pèrdues.
8. Comprendre el funcionament d'un analitzador de xarxes.
9. Entendre les limitacions en freqüència dels components passius inductius, capacitius i resistius.
10. Calcular, modelitzar i dissenyar els circuits passius de microones: atenuadors, divisors de potència, acobladors direccionals, ressonadors i filtres de microones.
11. Entendre i manejar els paràmetres típics usats en la caracterització de prestacions dels components passius: pèrdues d'inserció, pèrdues de retorn, aïllament entre ports, etc.
12. Saber dissenyar amplificadors lineals de microones considerant-ne el guany, soroll i estabilitat.

- 13.** Saber interpretar els cercles de guany, soroll i estabilitat en la carta de Smith.
- 14.** Conèixer diferents tècniques de polarització de transistors de microones.
- 15.** Saber analitzar els models en petit senyal dels tipus de transistor més utilitzats en els circuits de microones.
- 16.** Conèixer el funcionament i propietats dels principals tipus de díodes utilitzats en microones, i també les seves aplicacions.
- 17.** Conèixer les principals classes de mescladors i presentar les seves figures de mèrit més rellevants.
- 18.** Saber dissenyar multiplicadors de freqüència i oscil·ladors i presentar les seves figures de mèrit més importants.
- 19.** Comprendre el concepte de guia d'ones, i també els diferents tipus existents i formes de propagació.
- 20.** Entendre els conceptes de freqüència de tall de les formes i d'amplada de banda monomodal.
- 21.** Saber diferenciar entre els diferents tipus de discontinuïtats i obstacles en una guia d'ones i conèixer-ne els circuits equivalents.
- 22.** Saber dissenyar circuits passius amb elements de guies d'ones.

Continguts

Mòdul didàctic 1

Línies de transmissió

Ignacio Gil Galí

1. Introducció a les línies de transmissió. Definició i model equivalent
2. Impedància característica
3. Línies de transmissió sense pèrdues
4. Coeficient de reflexió i càlcul d'impedàncies
5. Coeficient de transmissió
6. Balanç de potència
7. Adaptació en línies de transmissió
8. Línies de transmissió amb pèrdues. Dispersió
9. Implementació de línies de transmissió físiques

Mòdul didàctic 2

Anàlisi de circuits de microones

Albert-Miquel Sánchez Delgado

1. Els paràmetres Z i Y , i les seves limitacions
2. Paràmetres S d'una xarxa de microones
3. Càlcul dels paràmetres S
4. Relacions entre els paràmetres S , Z , Y , T i $ABCD$
5. Analitzadors de xarxes

Mòdul didàctic 3

Circuits passius de microones

Ignacio Gil Galí

1. Components passius d'alta freqüència
2. Atenuadors i adaptadors
3. Divisors de potència
4. Acobladors direccionals
5. Filtres i ressonadors de microones
6. Annex. Estudi de filtres amb línies de transmissió acoblades: circuit equivalent i equacions de disseny

Mòdul didàctic 4

Amplificadors lineals de microones

Carles Recasens i Aloy

1. Conceptes de guany en amplificadors de microones
2. Guany unilateral
3. Estabilitat en amplificadors
4. Soroll en amplificadors
5. Tècniques de polarització de transistors de microones
6. Procediment de disseny

Mòdul didàctic 5

Mescladors, multiplicadors i oscil·ladors de microones

Carles Recasens i Aloy

1. Díodes de microones
2. El transistor MESFET
3. El transistor bipolar BJT
4. El mesclador
5. Oscil·ladors de microones
6. Multiplicadors de freqüència

Mòdul didàctic 6

Guies d'ones

Albert-Miquel Sánchez Delgado

1. Guies d'ones: tipus i característiques
2. Propagació dels modes TE i TM en guies d'ones
3. Modelització de guies d'ones com a línies de transmissió
4. Elements circuitalts en guies d'ones
5. Circuits passius bàsics en guies d'ones

Annex

Carles Recasens i Aloy i Albert-Miquel Sánchez Delgado

Bibliografia

Bara, M.; Escudero, A. M.; González, O.; Ibeas, A. (2012). *Tecnologia electrònica*. Barcelona: UOC.

Carey, I.; Lidholm, S. (2005). *Millimeter-Wave Integrated Circuits*. Springer Science+Business Media, Inc.

Chang, K. (2000). *RF and Microwave Wireless Systems*. John Wiley & Sons.

Collin, R. I. (2001). *Foundations for Microwave Engineering*. John Wiley & Sons.

Gentile, C. (1987). *Microwave Amplifiers and Oscillators*. Nova York: McGraw-Hill.

Glover, I. A.; Pennock, S. R.; Shepherd, P. R. (2005). *Microwave devices, circuits and subsystems for communications engineering*. John Wiley & Sons.

Golio, M. (2001). *The RF and Microwave Handbook*. CRC Press.

López i Rocafiguera, I.; Martí, Puig, P. (2012). *Electrònica de comunicacions*. Barcelona: UOC.

Pozar, D. M. (2001). *Microwave and RF Design of Wireless Systems*. John Wiley & Sons.

Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons.

Ribó, M.; Pajares, F. J. (2008). *Circuits d'alta freqüència*. Enginyeria La Salle (Guia d'estudis semipresencials).

Sorrentino, R. i altres (2010). *Microwave and RF Engineering*. John Wiley & Sons.

Sweet, A. (1990). *MIC&MMIC Amplifier And Oscillator Circuit Design*. EUA: Artech House.

Vendelin, G. D. i altres (2005). *Microwave Circuit Design using Linear and Nonlinear Techniques*. John Wiley & Sons.