

Circuitos de microondas

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

PID_00193557

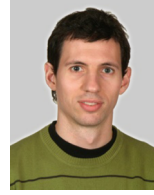
Material docente de la UOC


Ignacio Gil Galí

Licenciado en Ciencias Físicas (2000), ingeniero superior en Electrónica (2003) y doctor ingeniero en Electrónica (2007) por la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Entre los años 2003-2008 fue profesor asociado e investigador en el grupo de RF-Microondas del Departamento de Ingeniería Electrónica de la UAB. Del 2006 al 2008 trabajó en el Departamento de I+D de EPSON Europe Electronics GmbH diseñando circuitos integrados RF-CMOS de altas prestaciones y receptores de radiofrecuencia de ultra bajo consumo. En el 2008 se incorporó a la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como profesor lector. Desde el año 2011 es profesor titular en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC y coordinador del Grado de Ingeniería de Sistemas Audiovisuales. Desde el año 2012 es colaborador de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). En la actualidad, su actividad investigadora incluye circuitos y dispositivos de RF-Microondas, metamateriales y compatibilidad electromagnética, siendo autor de diversas publicaciones científicas y patentes.


Carles Recasens i Aloy

Ingeniero superior de Telecomunicaciones (1994) por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y máster en Administración de empresas (MBA) en el 2004 por la Escuela de Administración de Empresas (EAE). Profesional del sector de la electrónica de radiofrecuencia desde 1994 hasta la fecha en diferentes empresas multinacionales, ha simultaneado su ejercicio profesional con la docencia como profesor asociado en la UPC durante el periodo 2002 a 2011, primero en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones y después en el de Ingeniería de Sistemas Automáticos e Informática Industrial. Entre sus desarrollos profesionales, destacan el diseño de sistemas de radiofrecuencia de aplicación en el sector del automóvil como el *remote keyless entry* y el sistema inmovilizador (como jefe de proyecto en LEAR CORPORATION) o el sistema de antenas fractales activas multibanda para recepción AM, FM, GSM, GPS y Sirius (como director de I+D en Advanced Automotive Antennas). Actualmente es experto en sistemas *embedded* para aplicaciones radar a 24 GHz en *integration software and electronic engineering* (ISEE), incluyendo el diseño de antenas, filtros, transmisores y receptores de microondas.


Albert-Miquel Sánchez Delgado

Ingeniero técnico de Telecomunicaciones en la especialidad de Sistemas de Telecomunicaciones (2004), ingeniero superior de Telecomunicaciones (2006) y doctor ingeniero en Electrónica (2010) por Ingeniería La Salle, Universidad Ramón Llull. Desde el año 2005 ha sido profesor, asociado hasta el 2011 y lector desde entonces, de las asignaturas *Propagación electromagnética*, *Laboratorio de comunicaciones y Circuitos de microondas*, en el Departamento de Ingeniería de La Salle, Universidad Ramón Llull. En el 2006 entró a formar parte del Grup de Recerca en Electromagnetisme i Comunicacions (GRECO), y desde el año 2012 es colaborador de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). En la actualidad, su actividad investigadora incluye el diseño de antenas reconfigurables y la compatibilidad electromagnética (EMC), especialmente la caracterización de los efectos interferentes, modelizado de dispositivos no lineales, y procedimientos y sistemas experimentales de medida, siendo autor de diversas publicaciones científicas.

Primera edición: febrero 2013

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

Todos los derechos reservados

© de esta edición, FUOC, 2013

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Disseny: Manel Andreu

Realización editorial: Eureka Media, SL

Depósito legal: B-31.614-2012



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-Compartir igual (BY-SA) v.3.0 España de Creative Commons. Se puede modificar la obra, reproducirla, distribuirla o comunicarla públicamente siempre que se cite el autor y la fuente (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), y siempre que la obra derivada quede sujeta a la misma licencia que el material original. La licencia completa se puede consultar en: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.ca>

Introducción

Circuitos de microondas es una asignatura propia del itinerario de Sistemas de comunicación del Grado de Tecnologías de Telecomunicación de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC). En efecto, los circuitos y dispositivos electrónicos que operan en el rango de frecuencia de las microondas (300 MHz-300 GHz) desempeñan un rol fundamental en el diseño e implementación de los sistemas de comunicación modernos. En la actualidad, nuestra vida cotidiana está condicionada por numerosas aplicaciones que utilizan circuitos de microondas.

Algunos ejemplos significativos

- Telefonía móvil: sistemas de generación 3G-4G.
- Tecnología *wireless*: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc.
- Transmisión de TV.
- Automóvil/Tráfico.
- Satélite/GPS.
- Radar/Navegación.
- Aplicaciones médicas: diagnóstico.
- Identificación por radiofrecuencia (RFID).
- Vigilancia/Seguridad.
- Electrónica militar.
- Radiometría/Detección remota.
- Radioastronomía.

La asignatura se nutre de los conocimientos previamente adquiridos por parte del estudiante en *Electrónica de comunicaciones* y *Física II*. De forma específica, se pretende que el estudiante adquiera las correspondientes competencias de grado, mostradas a continuación:

- Capacidad de análisis de componentes y sus especificaciones para sistemas de comunicaciones guiadas y no guiadas.
- Capacidad para la selección de circuitos, subsistemas y sistemas de radiofrecuencia, microondas, radiodifusión, radioenlaces y radiolocalización.
- Capacidad para la selección de antenas, equipos y sistemas de transmisión, propagación de ondas guiadas y no guiadas por medios electromagnéticos, de radiofrecuencia u ópticos y la correspondiente gestión del espacio radioeléctrico y asignación de frecuencias.

De este modo, *Circuitos de microondas* está orientada a profundizar en el comportamiento de los circuitos a altas frecuencias, a partir de la teoría de líneas de transmisión, así como a estudiar las técnicas de análisis de dichos circuitos, tales como el uso de los parámetros *S*. Asimismo, se abordará el diseño de circuitos pasivos de microondas, amplificadores, mezcladores y osciladores operando a tales frecuencias. Finalmente se estudiará la teoría de guías de ondas.

Se ha estructurado la asignatura en 6 módulos, cuyos contenidos se resumen a continuación.

En el módulo "Líneas de transmisión" se introduce la teoría de líneas de transmisión, necesaria para modelizar los fenómenos de propagación en circuitos que operan a frecuencias de microondas. Posteriormente se repasa y amplía la teoría y se detallan las herramientas para el modelizado matemático de las líneas de transmisión. Para ello se definen los parámetros básicos que caracterizan a las líneas de transmisión y se aplican al cálculo de dichas líneas (impedancia característica, coeficientes de reflexión y transmisión, etc.). Se evalúa también el balance de potencias de las líneas de transmisión, así como las técnicas más importantes de adaptación. Finalmente, se estudia el impacto de las pérdidas y la distorsión y se introducen las principales líneas de transmisión físicas.

El módulo "Análisis de circuitos de microondas" está dedicado a comprender las redes de microondas y los parámetros relevantes para su análisis. Inicialmente se repasan los parámetros Z e Y , describiendo sus limitaciones para caracterizar los circuitos de microondas. A continuación se estudian los parámetros S , ya que son de mayor utilidad en el cálculo de redes de microondas, poniendo énfasis en su interpretación. Asimismo, se establecen las relaciones y conversiones entre los diferentes parámetros S , Z , Y , T y $ABCD$. Finalmente, se analiza el funcionamiento y utilidad de los analizadores de redes como instrumentos de medida de circuitos de microondas.

El módulo "Circuitos pasivos de microondas" está centrado en el diseño, modelizado y simulación de los circuitos pasivos básicos de microondas con la pretensión de usarlos en función del tipo de aplicación. Se inicia este estudio analizando el impacto de frecuencias de microondas en componentes pasivos (resistencias, inductores y capacidades) y sus diferencias con los modelos de baja frecuencia. A continuación se describen las principales topologías, técnicas y ecuaciones de diseño, así como las matrices de parámetros S de diversos circuitos pasivos: atenuadores, adaptadores, inversores, transformadores $\lambda/4$, *tapers*, divisores de potencia, acopladores direccionales, híbridos, resonadores y filtros de microondas.

En el módulo "Amplificadores lineales de microondas" se repasan las figuras de mérito más relevantes de los amplificadores de microondas, así como el proceso de modelizado y polarización de los mismos. En primer lugar, se describen en profundidad los tipos de ganancia del amplificador y se revisan otras figuras de mérito, tales como la figura de ruido, aislamiento, pérdidas de retorno, linealidad, etc. Seguidamente, se aborda el proceso de diseño de amplificadores bajo la aproximación de unilaterialidad, a fin de simplificar los cálculos. Además del cálculo de ganancia, se realiza un análisis de la estabilidad de los

amplificadores y se evalúa también el factor de ruido. Finalmente, se describen las técnicas estándar de polarización así como el procedimiento de diseño lineal de amplificadores de microondas.

En el módulo "Mezcladores, multiplicadores y osciladores de microondas" se estudia el modelizado y diseño de circuitos de microondas no lineales, tales como los mezcladores, multiplicadores de frecuencia y osciladores. En primer lugar, se analizan las características de diversos tipos de diodos (Schottky, PIN e Impatt) y, posteriormente, las de dispositivos activos tales como los transistores bipolares y FET. Una vez realizado este análisis se utilizan dichos componentes para introducir las topologías de mezcladores, multiplicadores de frecuencia y osciladores. Para cada caso se estudian las correspondientes figuras de mérito, así como su modelizado y proceso de diseño.

En el módulo "Guías de ondas" se abordan los diferentes tipos de guías de ondas y sus principales características. Inicialmente, se introducen las guías de ondas, se describe la propagación de campos y se desarrolla la propagación de modos en guías de ondas. Asimismo, se estudia cómo modelizar dichas guías de ondas mediante líneas de transmisión, incluyendo discontinuidades y obstáculos. Finalmente, se presentan varios ejemplos de circuitos pasivos básicos de guías de ondas.

Finalmente, en el "Anexo" se desarrollan en detalle una serie de contenidos importantes para la asignatura, tales como el uso de la carta de Smith, las figuras de mérito de los amplificadores o la unión PN. Dichos contenidos han sido cursados en asignaturas previas, pero se insiste en ellos como elemento de repaso para los estudiantes, en caso de que sea necesario.

El estudio de *Circuitos de microondas* puede, a primera vista del estudiante, parecer complejo, ya que requiere la utilización de parámetros de análisis no convencionales para la resolución de circuitos electrónicos que operan a frecuencias bajas o medias. Sin embargo, esto no debe ser necesariamente así. En efecto, si se analiza y comprende en detalle cada apartado de los primeros módulos, el seguimiento del resto se realiza de forma natural. En este sentido, el estudio pautado de los contenidos que se desarrollan a lo largo de los diferentes módulos incluye una amplia variedad de ejemplos prácticos desde el punto de vista de cálculo y simulación con la herramienta ADS. Dichos ejemplos ayudan a clarificar y retener los conceptos teóricos estudiados en cada uno de los apartados. Resulta altamente recomendable realizar dichos ejercicios resueltos, pues son muy beneficiosos a la hora de adquirir las capacidades y competencias citadas anteriormente, así como para la comprensión de los circuitos que fundamentan las aplicaciones prácticas actuales y del futuro.

Objetivos

El estudio de los contenidos de la asignatura permite adquirir las competencias y conocimientos necesarios con la finalidad de alcanzar los objetivos generales siguientes:

1. Conocer los fenómenos de propagación en las líneas de transmisión, así como su modelizado y formulación matemática.
2. Entender los conceptos de impedancia característica, coeficiente de reflexión, relación de onda estacionaria y adaptación.
3. Saber utilizar la carta de Smith para la resolución de circuitos de microondas y el cálculo de redes de adaptación.
4. Conocer los medios de transmisión físicos para la correcta propagación de señales en régimen de alta frecuencia y la implementación de circuitos de microondas.
5. Conocer las ventajas que ofrecen los parámetros S en el cálculo y caracterización de redes de microondas.
6. Saber relacionar los parámetros S con los parámetros Z , Y , T y $ABCD$.
7. Entender el concepto de redes pasivas, recíprocas y sin pérdidas.
8. Comprender el funcionamiento de un analizador de redes.
9. Entender las limitaciones en frecuencia de los componentes pasivos inductivos, capacitivos y resistivos.
10. Calcular, modelizar y diseñar los circuitos pasivos de microondas: atenuadores, divisores de potencia, acopladores direccionales, resonadores y filtros de microondas.
11. Entender y manejar los parámetros típicos usados en la caracterización de prestaciones de los componentes pasivos: pérdidas de inserción, pérdidas de retorno, aislamiento entre puertos, etc.
12. Saber diseñar amplificadores lineales de microondas considerando su ganancia, ruido y estabilidad.

- 13.** Saber interpretar los círculos de ganancia, ruido y estabilidad en la carta de Smith.
- 14.** Conocer diferentes técnicas de polarización de transistores de microondas.
- 15.** Saber analizar los modelos en pequeña señal de los tipos de transistor más utilizados en los circuitos de microondas.
- 16.** Conocer el funcionamiento y propiedades de los principales tipos de diodos utilizados en microondas, así como sus aplicaciones.
- 17.** Conocer las principales clases de mezcladores y presentar sus figuras de mérito más relevantes.
- 18.** Saber diseñar multiplicadores de frecuencia y osciladores y presentar sus figuras de mérito más importantes.
- 19.** Comprender el concepto de guía de ondas, así como los diferentes tipos existentes y modos de propagación.
- 20.** Entender los conceptos de frecuencia de corte de los modos y de ancho de banda monomodal.
- 21.** Saber diferenciar entre los diferentes tipos de discontinuidades y obstáculos en una guía de ondas y conocer sus circuitos equivalentes.
- 22.** Saber diseñar circuitos pasivos con elementos de guías de ondas.

Contenidos

Módulo didáctico 1

Líneas de transmisión

Ignacio Gil Galí

1. Introducción a las líneas de transmisión. Definición y modelo equivalente
2. Impedancia característica
3. Líneas de transmisión sin pérdidas
4. Coeficiente de reflexión y cálculo de impedancias
5. Coeficiente de transmisión
6. Balance de potencia
7. Adaptación en líneas de transmisión
8. Líneas de transmisión con pérdidas. Dispersión
9. Implementación de líneas de transmisión físicas

Módulo didáctico 2

Análisis de circuitos de microondas

Albert-Miquel Sánchez Delgado

1. Los parámetros Z e Y , y sus limitaciones
2. Parámetros S de una red de microondas
3. Cálculo de los parámetros S
4. Relaciones entre parámetros S , Z , Y , T y $ABCD$
5. Analizadores de redes

Módulo didáctico 3

Circuitos pasivos de microondas

Ignacio Gil Galí

1. Componentes pasivos de alta frecuencia
2. Atenuadores y adaptadores
3. Divisores de potencia
4. Acopladores direccionales
5. Filtros y resonadores de microondas
6. Anexo. Estudio de filtros con líneas de transmisión acopladas: circuito equivalente y ecuaciones de diseño

Módulo didáctico 4

Amplificadores lineales de microondas

Carles Recasens i Aloy

1. Conceptos de ganancia en amplificadores de microondas
2. Ganancia unilateral
3. Estabilidad en amplificadores
4. Ruido en amplificadores
5. Técnicas de polarización de transistores de microondas
6. Procedimiento de diseño

Módulo didáctico 5

Mezcladores, multiplicadores y osciladores de microondas

Carles Recasens i Aloy

1. Diodos de microondas
2. El transistor MESFET
3. El transistor bipolar BJT
4. El mezclador
5. Osciladores de microondas
6. Multiplicadores de frecuencia

Módulo didáctico 6

Guías de ondas

Albert-Miquel Sánchez Delgado

1. Guías de ondas: tipos y características
2. Propagación de los modos TE y TM en guías de ondas
3. Modelización de guías de ondas como líneas de transmisión
4. Elementos circuitales en guías de ondas
5. Circuitos pasivos básicos en guías de ondas

Anexo

Carles Recasens i Aloy y Albert-Miquel Sánchez Delgado

Bibliografía

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

Carey, E.; 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. E. (2001). *Foundations for Microwave Engineering*. John Wiley & Sons.

Gentile, C. (1987). *Microwave Amplifiers and Oscillators*. Nueva 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, E.; Martí, Puig, P. (2012). *Electrónica de comunicaciones*. 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). *Circuitos d'alta freqüència*. Enginyeria La Salle (Guía de estudios semipresenciales).

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

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

Vendelin, G. D. y otros (2005). *Microwave Circuit Desing using Linear and Nonlinear Techniques*. John Wiley & Sons.