



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



GUÍA DE APRENDIZAJE

PROCESADO EN ARRAY DE ANTENAS

MÁSTER EN INGENIERÍA DE RADIOFRECUENCIA

CURSO ACADÉMICO	CÓDIGO	CURSO	CRÉDITOS	CARÁCTER	SEMESTRE
2026-27	93001361	1	3 ECTS	OBLIGATORIA	SEGUNDO SEMESTRE
IDIOMA	CENTRO RESPONSABLE				
ESPAÑOL	E.T.S. DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION				
DEPARTAMENTO RESPONSABLE					
SEÑALES, SISTEMAS Y RADIOCOMUNICACIONES					

COORDINADOR/A

MIGUEL ALEJANDRO SALAS NATERA - miguel.salas@upm.es

REQUISITOS OBLIGATORIOS

ASIGNATURAS REQUERIDAS

—

CONOCIMIENTOS PREVIOS RECOMENDADOS

ASIGNATURAS RECOMENDADAS

- ANTENAS (95000043)
- DISEÑO DE CIRCUITOS ACTIVOS DE RF Y MICROONDAS (93001358)
- RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (93001364)

OTRAS RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener un conocimiento sólido de los conceptos básicos de antenas, campos radiados, ondas electromagnéticas y parámetros fundamentales de antenas.
- Conocimientos de teoría de matrices, conceptos de transmisión digital y procesamiento de señales.
- Se recomienda tener conocimientos de programación en MATLAB.

RESULTADOS

RD-822/2021

Competencias

- C7** Incorporar criterios de sostenibilidad, seguridad y eficiencia energética en la concepción y evaluación de sistemas y tecnologías de RF.

Conocimientos

- K7** Conocer las principales líneas de investigación y los avances científicos en el ámbito de la ingeniería de radiofrecuencia.
- K3** Conocer en profundidad los mecanismos de propagación de ondas electromagnéticas en entornos complejos de comunicación.

Habilidades o destrezas

- S4** Analizar el comportamiento de sistemas de comunicaciones inalámbricas mediante modelos de propagación, técnicas de modulación y evaluación de desempeño.

DESCRIPCIÓN

La asignatura **Procesado en Array de Antenas (PAA)** tiene como objetivo proporcionar una formación avanzada en el análisis, modelado e implementación de técnicas de procesamiento aplicadas a sistemas de antenas múltiples y antenas inteligentes. Estas tecnologías constituyen uno de los habilitadores clave de los sistemas de comunicaciones inalámbricas modernos y seguros, permitiendo mejorar la capacidad, la robustez frente a interferencias y la eficiencia espectral de las redes actuales y futuras.

A lo largo del curso se aborda de forma integrada el vínculo entre los modelos de señal para arrays de antenas, los algoritmos avanzados de procesamiento en array y su impacto en las prestaciones a nivel de sistema. En particular, se estudian técnicas de beamforming adaptativo, algoritmos de inversión matricial, estimación de dirección de llegada (DoA) y procesamiento para sistemas MIMO y massive MIMO, así como su extensión a arquitecturas emergentes basadas en superficies inteligentes reconfigurables (RIS).

La asignatura introduce también los aspectos prácticos relacionados con la implementación de sistemas de antenas múltiples, incluyendo el modelado del array, los procedimientos de calibración y las arquitecturas de procesamiento digital empleadas en plataformas modernas de radiofrecuencia. En este contexto, se analizan soluciones de implementación basadas en sistemas programables y plataformas RFSoc, que permiten integrar el procesamiento digital directamente en los payloads o subsistemas de comunicaciones avanzados.

La materia combina diferentes enfoques formativos:

- Fundamentos teóricos del procesado en arrays de antenas, incluyendo modelos de señal y técnicas de estimación espacial.
- Análisis de algoritmos avanzados de beamforming y procesamiento adaptativo, aplicados a comunicaciones inalámbricas y radar.
- Estudio de arquitecturas de implementación reales, incluyendo sistemas MIMO, massive MIMO y RIS.
- Actividades prácticas y demostraciones experimentales, apoyadas en herramientas de simulación, en un emulador de onda plana (Planar Wave Emulator) equivalente a un phased array que permite validar experimentalmente algoritmos y configuraciones de arrays en condiciones controladas, como también el workshop basado en una RFSoc programada con algoritmos de digital beamforming (DBF).

Se introducen además casos de uso realistas, entre los que destacan las redes satelitales y sistemas no terrestres (NTN), las comunicaciones vehiculares, las redes celulares de nueva generación y las arquitecturas basadas en superficies inteligentes, analizando los compromisos prácticos asociados a la implementación de estas tecnologías.

En conjunto, la asignatura busca capacitar al estudiante para analizar, diseñar e implementar sistemas avanzados de antenas inteligentes, integrando conocimientos de electromagnetismo, radiofrecuencia y procesado digital de señal, y proporcionando una visión tecnológica alineada con los retos actuales de las comunicaciones inalámbricas, los sistemas espaciales y las futuras redes 6G.

TEMARIO

1. Introducción a los sistemas de múltiples antenas

- 1.1. Presentación de la asignatura
- 1.2. Introducción a los sistemas de múltiples antenas
 - 1.2.1. Sistemas de múltiples antenas: aspectos de sistema
 - 1.2.2. Fundamentos matemáticos

2. Procesado en arrays de antenas y técnicas de estimación de Dirección de Llegada (DoA)

- 2.1. Procesado en arrays de antenas
 - 2.1.1. Modelo de señal
 - 2.1.2. Métodos iterativos y técnicas de inversión matricial
 - 2.1.3. Criterios de algoritmos adaptativos (MMSE, MV, MCOx) y soluciones iterativas
 - 2.1.4. Introducción a casos de uso e implementación

2.1.5. Algoritmos híbridos y análisis de complejidad

2.2. Técnicas de estimación de Dirección de Llegada (DoA)

2.2.1. Modelo de señal

2.2.2. Métodos basados en beamforming

2.2.3. Métodos basados en subespacios

2.3. Modelos de señal y técnicas para sistemas MIMO

2.4. Modelos de señal y técnicas para sistemas Massive MIMO (mMIMO)

3. Tecnologías de antenas múltiples y arrays de antenas

3.1. Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS)

3.1.1. Formulación asistida por RIS

3.1.2. Casos de uso asistidos por RIS

3.2. Implementación de sistemas de múltiples antenas

3.2.1. Modelado de arquitecturas de múltiples antenas. Imperfecciones y degradaciones (impairments)

3.2.2. Calibración

3.2.3. Tecnologías de antenas y dominios analógico y digital

3.3. Implementación de técnicas de procesamiento en arrays sobre plataformas RFSoc

3.3.1. Análisis de requisitos de FPGA y procesadores

3.3.2. Descripción de la implementación de algoritmos de beamforming y estimación de Dirección de Llegada (DoA) mediante hardware reconfigurable

ACTIVIDADES



Actividad evaluable



Actividad formativa

 Introduction to the course	SEMANAS 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E
PRESENCIALIDAD Presencial DURACIÓN TOTAL 01h 00m LUGAR Aula (en horario) GRUPO Normal METODOLOGÍA Lección Magistral	
 Mathematical foundations	SEMANAS 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E
PRESENCIALIDAD Presencial DURACIÓN TOTAL 01h 00m LUGAR Aula (en horario) GRUPO Normal METODOLOGÍA Lección Magistral	
 Antenna array processing	SEMANAS 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E
PRESENCIALIDAD Presencial DURACIÓN TOTAL 05h 00m LUGAR Aula (en horario) GRUPO Normal METODOLOGÍA Lección Magistral	
 Direction of Arrival techniques	SEMANAS 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E
PRESENCIALIDAD Presencial DURACIÓN TOTAL 03h 30m LUGAR Aula (en horario) GRUPO Normal METODOLOGÍA Lección Magistral	
 Case study over RFSoc	SEMANAS 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E
PRESENCIALIDAD Presencial DURACIÓN TOTAL 01h 00m LUGAR Aula (en horario) GRUPO Normal METODOLOGÍA Design Thinking	

	Tutoría / Case study progress meeting presentation	SEMANAS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E	
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	GRUPO																
No presencial, con docente	00h 15m	Reducido																
METODOLOGÍA																		
Design Thinking																		

	Array Processing and DoA	SEMANAS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E	
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	LUGAR	GRUPO															
Presencial	03h 00m	Aula (en horario)	Normal															
METODOLOGÍA																		
Lección Magistral																		

	Array Processing and DoA Laboratory	SEMANAS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E	
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	LUGAR	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	NOTA MÍNIMA													
Presencial	02h 00m	Laboratorio	Progresiva	20%	3													
METODOLOGÍA																		
Trabajo Individual																		
RESULTADOS EVALUADOS																		
K3 S4 C7 K7																		

	MIMO and mMIMO Systems	SEMANAS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E	
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	LUGAR	GRUPO															
Presencial	03h 00m	Aula (en horario)	Normal															
METODOLOGÍA																		
Lección Magistral																		

	Tutoría / Case study progress meeting	SEMANAS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E	
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	GRUPO																
No presencial, con docente	00h 15m	Normal																
METODOLOGÍA																		
Aula invertida																		

	Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) and RIS aided use cases			SEMANAS 123456789101112131415E																	
PRESENCIALIDAD Presencial	DURACIÓN TOTAL 03h 00m	LUGAR Aula (en horario)	GRUPO Normal																		
METODOLOGÍA Lección Magistral																					

	Implementation of multiple antenna systems: modelado, calibración y tecnologías			SEMANAS 123456789101112131415E																	
PRESENCIALIDAD Presencial	DURACIÓN TOTAL 02h 00m	LUGAR Aula (en horario)	GRUPO Normal																		
TEMAS T3																					
METODOLOGÍA Lección Magistral Design Thinking																					

	Implementation of Array Processing Techniques on RFSoc			SEMANAS 123456789101112131415E																	
PRESENCIALIDAD Presencial	DURACIÓN TOTAL 01h 30m	LUGAR Aula (en horario)	GRUPO Normal																		
METODOLOGÍA Aprendizaje basado en investigación Aprendizaje basado en proyectos																					

	Case study report and oral presentation (progresiva & global)			SEMANAS 123456789101112131415E																
PRESENCIALIDAD Presencial	DURACIÓN TOTAL 02h 00m	LUGAR Aula (en horario)	EVALUACIÓN Progresiva, Global	PONDERACIÓN 30%	NOTA MÍNIMA 3															
METODOLOGÍA Trabajo Individual																				
RESULTADOS EVALUADOS C7 K3 K7 S4																				

Global examination (progresiva)			SEMANAS															
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E															
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	LUGAR	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	NOTA MÍNIMA													
Presencial	02h 00m	Otro	Progresiva	30%	3													
METODOLOGÍA																		
Presentación Individual																		
RESULTADOS EVALUADOS																		
C7 K3 K7 S4																		

Global examination (global)			SEMANAS															
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E															
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	LUGAR	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	NOTA MÍNIMA													
Presencial	02h 00m	Otro	Global	40%	3													
METODOLOGÍA																		
Examen Escrito																		
RESULTADOS EVALUADOS																		
C7 K3 K7 S4																		

Single user mimo lab exercises (progresiva)			SEMANAS															
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E															
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	NOTA MÍNIMA														
No presencial, sin docente	02h 00m	Progresiva	20%	3														
TEMAS																		
T2																		
METODOLOGÍA																		
Otras técnicas																		
RESULTADOS EVALUADOS																		
C7 K3 K7 S4																		

Submission of labs and exercises (global & extraordinaria)			SEMANAS															
			1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 E															
PRESENCIALIDAD	DURACIÓN TOTAL	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	NOTA MÍNIMA														
No presencial, sin docente	02h 00m	Global, Extraordinaria	30%	3														
METODOLOGÍA																		
Otras técnicas																		
RESULTADOS EVALUADOS																		
C7 K3 K7 S4																		

Global examination (extraordinaria)

SEMANAS

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

E

PRESENCIALIDAD

DURACIÓN TOTAL

LUGAR

EVALUACIÓN

PONDERACIÓN

NOTA MÍNIMA

Presencial

02h 00m

Aula (en horario)

Extraordinaria

50%

3

METODOLOGÍA

Examen Escrito

RESULTADOS EVALUADOS

C7K3K7S4

Case study report and oral presentation (extraordinaria)

SEMANAS

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

E

PRESENCIALIDAD

DURACIÓN TOTAL

EVALUACIÓN

PONDERACIÓN

NOTA MÍNIMA

No presencial, sin docente

02h 00m

Extraordinaria

20%

3

METODOLOGÍA

Presentación en Grupo

RESULTADOS EVALUADOS

C7K3K7S4

PLANIFICACIÓN SEMANAL

Actividad evaluable

Actividad formativa

Semana con actividad

E

 Período de exámenes

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E
Introduction to the course	.															
Mathematical foundations	.															
Antenna array processing	.	.														
Direction of Arrival techniques			.													
Case study over RFSoc				.												
Tutoría / Case study progress meeting presentation				.												
Array Processing and DoA				.	.											
Array Processing and DoA Laboratory					.											

Actividad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	E
 MIMO and mMIMO Systems					•	•										
 Tutoría / Case study progress meeting						•										
 Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) and RIS aided use cases						•	•									
 Implementation of multiple antenna systems: modelado, calibración y tecnologías							•									
 Implementation of Array Processing Techniques on RFSoc								•								
 Case study report and oral presentation (progresiva & global)								•								
 Global examination (progresiva)																•
 Global examination (global)																•
 Single user mimo lab exercises (progresiva)					•											
 Submission of labs and exercises (global & extraordinaria)																•
 Global examination (extraordinaria)																•
 Case study report and oral presentation (extraordinaria)								•								

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Criterios Generales

La evaluación tendrá como objetivo comprobar que los estudiantes han adquirido todas las competencias de la asignatura. Por ello, la evaluación mediante prueba final se llevará a cabo considerando todas las técnicas de evaluación empleadas en la evaluación continua (EX, ET, TG, etc.) y se realizará durante el periodo de exámenes aprobado por la Junta de Escuela para el semestre y curso académico correspondiente.

Las actividades de evaluación destinadas a valorar resultados de aprendizaje que no puedan ser evaluados mediante un único examen podrán desarrollarse a lo largo del semestre.

Criterios de Evaluación en Convocatoria Ordinaria. Evaluación progresiva

Criterios de evaluación

Elementos de evaluación continua y criterios de calificación (convocatoria ordinaria)

La evaluación continua estará compuesta por los siguientes elementos:

1. Ejercicios individuales y prácticas de laboratorio (40%)

Se entregarán a lo largo del curso, generalmente al finalizar cada unidad temática. Estas actividades podrán realizarse de forma presencial o proponerse como trabajo para realizar fuera del aula.

La asistencia a las actividades presenciales será obligatoria para todos los estudiantes.

La calificación de este apartado se obtendrá como la media de las notas obtenidas en cada uno de los ejercicios individuales y prácticas de laboratorio.

2. Caso de estudio (30%)

Los estudiantes deberán preparar y realizar una breve presentación oral sobre la aplicación de técnicas de múltiples antenas al caso de estudio propuesto (por ejemplo, analizar el uso de arrays de antenas en un sistema radar o evaluar cómo se incorporan las técnicas de múltiples antenas en el estándar IEEE 802.11ac).

La actividad se realizará de forma individual o en grupos de dos estudiantes, dependiendo del número de alumnos matriculados en la asignatura.

Esta actividad será obligatoria para todos los estudiantes.

3. Examen (30%)

Examen escrito compuesto por preguntas teóricas y ejercicios cortos.

Será necesario obtener una calificación mínima de 3 puntos sobre 10 en el examen para superar esta parte de la asignatura.

Actividades

- Array Processing and DoA Laboratory (20%)
- Case study report and oral presentation (progresiva & global) (30%)
- Global examination (progresiva) (30%)
- Single user mimo lab exercises (progresiva) (20%)

Criterios de Evaluación en Convocatoria Ordinaria. Prueba global

Criterios de evaluación

Evaluación mediante prueba global en la convocatoria ordinaria

En este caso, los estudiantes deberán realizar las mismas actividades que componen la evaluación continua, utilizando los mismos elementos de evaluación.

Actividades

- Case study report and oral presentation (progresiva & global) (30%)
- Global examination (global) (40%)
- Submission of labs and exercises (global & extraordinaria) (30%)

Criterios de Evaluación en Convocatoria Extraordinaria

Criterios de evaluación

Convocatoria extraordinaria

La evaluación en la convocatoria extraordinaria se realizará mediante una prueba global, con un valor del 100 % de la calificación.

No obstante, para aquellos estudiantes que hayan superado las entregas de prácticas de laboratorio y el caso de estudio durante la evaluación continua, la nota final se calculará considerando:

50 % correspondiente a la evaluación progresiva previamente superada.

50 % correspondiente al examen global de la convocatoria extraordinaria.

Actividades

- Submission of labs and exercises (global & extraordinaria) (30%)
- Global examination (extraordinaria) (50%)
- Case study report and oral presentation (extraordinaria) (20%)

RECURSOS

Web

David Tse, Fundamentals of Wireless Communications.

Bibliografía

Chandran. Advances in direction of arrival estimation

Compton. Adaptive antennas. Concepts and performance

Marzetta. Fundamentals of Massive MIMO

Brown. Practical Guide to the MIMO Radio Channel.

Paulraj. Introduction to ST Wireless Comms

Web

Raviraj Adve. Lecture notes on Smart Antennas and MIMO systems

Otros recursos

Educational Array Processing Techniques Simulation tool

OTRA INFORMACIÓN

La asignatura Procesado en Array de Antenas (PAA) está relacionada con el ODS 9 ("Industria, Innovación e Infraestructura"), ya que sus contenidos abordan el diseño de nuevas infraestructuras destinadas a incrementar el acceso a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) y a los servicios de banda ancha (aspecto incluido en los casos de estudio desarrollados en la asignatura).

Las tecnologías de comunicaciones estudiadas en el curso proporcionan soluciones a la creciente demanda de servicios de conectividad, generando nuevas oportunidades de negocio y contribuyendo a la innovación digital. Asimismo, favorecen el proceso de transformación digital de la sociedad mediante el desarrollo e implementación de sistemas avanzados de comunicaciones inalámbricas, redes de nueva generación y tecnologías de antenas inteligentes.