



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

PROCESO DE
COORDINACIÓN DE LAS
ENSEÑANZAS PR/CL/001



E.T.S. de Ingenieros de
Telecomunicacion

ANX-PR/CL/001-01

GUÍA DE APRENDIZAJE

ASIGNATURA

93000926 - Del Procesado En Array A Las Comunicaciones Mimo

PLAN DE ESTUDIOS

09AT - Master Universitario En Teoria De La Señal Y Comunicaciones

CURSO ACADÉMICO Y SEMESTRE

2025/26 - Segundo semestre

Índice

Guía de Aprendizaje

1. Datos descriptivos.....	1
2. Profesorado.....	1
3. Conocimientos previos recomendados.....	2
4. Competencias y resultados de aprendizaje.....	2
5. Descripción de la asignatura y temario.....	3
6. Cronograma.....	7
7. Actividades y criterios de evaluación.....	10
8. Recursos didácticos.....	13
9. Otra información.....	14

1. Datos descriptivos

1.1. Datos de la asignatura

Nombre de la asignatura	93000926 - Del Procesado en Array a las Comunicaciones Mimo
No de créditos	6 ECTS
Carácter	Optativa
Curso	Primer curso
Semestre	Segundo semestre
Período de impartición	Febrero-Junio
Idioma de impartición	Inglés/Castellano
Titulación	09AT - Master Universitario en Teoría de la Señal y Comunicaciones
Centro responsable de la titulación	09 - E.T.S. De Ingenieros De Telecomunicacion
Curso académico	2025-26

2. Profesorado

2.1. Profesorado implicado en la docencia

Nombre	Despacho	Correo electrónico	Horario de tutorías *
Miguel Alejandro Salas Natera (Coordinador/a)	C-411	miguel.salas@upm.es	Sin horario. Appointment arranged by email
Ramon Martinez Rodriguez-Osorio	C-412	ramon.martinez@upm.es	Sin horario. Appointment arranged by email

Jose Luis Masa Campos	C-401	joseluis.masa@upm.es	Sin horario. Appointment arranged by email
-----------------------	-------	----------------------	--

* Las horas de tutoría son orientativas y pueden sufrir modificaciones. Se deberá confirmar los horarios de tutorías con el profesorado.

3. Conocimientos previos recomendados

3.1. Asignaturas previas que se recomienda haber cursado

- Temas Avanzados En Tecnología De Antenas
- Tecnologías De Radiofrecuencia

3.2. Otros conocimientos previos recomendados para cursar la asignatura

- It is recommended to have a strong knowledge in basic concept about antennas, radiated fields, electromagnetic waves and basic antenna parameters
- Knowledge of matrix theory, digital transmission concepts and signal processing
- It is recommended to know Matlab programming

4. Competencias y resultados de aprendizaje

4.1. Competencias

CE01 - Analizar y aplicar técnicas para el diseño y desarrollo avanzado de equipos y sistemas, basándose en la teoría de la señal y las comunicaciones, en un entorno internacional

CE03 - Valorar y contrastar la utilización de las diferentes técnicas disponibles para la resolución de problemas reales dentro del área de teoría de la señal y comunicaciones.

CT01 - Capacidad para comprender los contenidos de clases magistrales, conferencias y seminarios en lengua inglesa

CT03 - Capacidad para adoptar soluciones creativas que satisfagan adecuadamente las diferentes necesidades

planteadas

CT04 - Capacidad para trabajar de forma efectiva como individuo, organizando y planificando su propio trabajo, de forma independiente o como miembro de un equipo

CT05 - Capacidad para gestionar la información, identificando las fuentes necesarias, los principales tipos de documentos técnicos y científicos, de una manera adecuada y eficiente

4.2. Resultados del aprendizaje

RA31 - To carry out novel designs and applications in the field of MIMO antennas and systems

RA29 - Knowing the mathematical algorithms of adaptive antenna systems

RA47 - Knowing and evaluating MIMO systems

RA53 - To carry out antenna and system technologies analysis based on the algorithms of adaptive antennas

5. Descripción de la asignatura y temario

5.1. Descripción de la asignatura

This course covers the two main multiple antenna techniques: antenna array processing and MIMO systems. Both topics are covered from a formal perspective, starting with signal models as the basics to develop the diversity techniques. The course covers not only mathematical and signal processing aspects, but also the impact of selecting a particular implementation or antenna array, how multiple antenna techniques are introduced in current communication standards, and how the wireless channel affects system performance. Thus, students finish the course with an integrated vision on multiple antenna diversity techniques, system level impact and implementation issues.

The course starts with an introduction that includes the mathematical foundations of multiple antenna techniques (information theory, matrix theory and estimation).

Next unit deals with the first group of multiple antenna systems, i.e antenna array processing techniques and direction of arrival methods. The first part covers time and spatial reference approaches, and explains different adaptive algorithms and beamforming approaches. The direction of arrival sessions cover conventional or search methods based on exploiting the power angular spectrum, and subspace based methods.

The third unit covers MIMO systems, starting with Single User MIMO. It continues with Multiple User MIMO (MU MIMO), that includes signal and channel models, suboptimum approaches and optimum beamformers and power allocation in uplink and downlink scenarios.

In the fourth unit it cover Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) including signal model, RIS aided system formulation and use cases. This is part of the set of cutting edge technologies that the subject APMC presents during the course.

The last unit covers multiple antenna technologies, beginning with an explanation of the impairments that are found in the implementation of a multiple antenna system (mutual coupling, phase noise, imbalances in RF). The unit continues with a description of MIMO system architectures from RF front-ends and antenna to signal processing hardware, and the calibration issues required by the system to work properly. Finally, a set of case studies presented by students to explain the use of multiple antenna techniques to particular scenarios will be proposed.

Finally, a set of workshops are proposed. These workshops are led by experts from the industry and research centers. Following we present some alternatives for the course 2024-25:

- On board satcom payload and array processing (actual and future systems)
- In space orbit thermal analysis for onboard antenna array with Hybrid architecture (Analog + Digital).

- RFSoc implementation and test (Secure communications and calibration issues).

Course contents are presented under the theoretical point of view and complemented with the practical simulation or exercises along the course.

5.2. Temario de la asignatura

1. Introduction to multiple antenna systems
 - 1.1. Course presentation
 - 1.2. Introduction to multiple antenna systems
 - 1.2.1. Multiple antennas: system aspects
 - 1.2.2. Mathematical foundations
2. Antenna array processing and Direction of Arrival techniques
 - 2.1. Antenna array processing
 - 2.1.1. Signal model
 - 2.1.2. Iterative methods and inverse matrix approaches
 - 2.1.3. Adaptive algorithms criteria (MMSE; MV; MCOx) to iterative solutions
 - 2.1.4. Introduction to use cases implementation
 - 2.1.5. Hybrid algorithms and complexity
 - 2.2. Direction of arrival techniques
 - 2.2.1. Signal model
 - 2.2.2. Beamformer methods
 - 2.2.3. Subspace based methods
3. MIMO systems
 - 3.1. Signal and channel modelling in SU MIMO systems
 - 3.2. Introduction SU MIMO channel capacity

3.3. Multiuser MIMO (MU MIMO)

3.3.1. Signal and channel model in MU MIMO

3.3.2. Suboptimum approaches

3.3.3. Optimum beamformer and power allocation in uplink

3.3.4. Optimum beamformer and power allocation in downlink

3.4. MIMO architectures and technologies

3.5. Massive MIMO

3.5.1. Signal and channel model in single cell scenario for DoA and Beamforming implementation

3.5.2. mMIMO architectures and technologies

4. Multiple antenna and antenna array technologies

4.1. Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)

4.1.1. RIS aided formulation

4.1.2. RIS aided use case

4.2. Implementation of multiple antenna systems

4.2.1. Modelling of multiple antenna architectures. Impairments.

4.2.2. Calibration

4.2.3. Technologies in antennas, analog and digital domains

6. Cronograma

6.1. Cronograma de la asignatura *

Sem	Actividad tipo 1	Actividad tipo 2	Tele-enseñanza	Actividades de evaluación
1	<p>Introduction to the course Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Mathematical foundations Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
2	<p>Antenna array processing Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Antenna array processing Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
3	<p>Antenna array processing Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Antenna array processing Duración: 02:00 PR: Actividad del tipo Clase de Problemas</p>			
4	<p>Direction of Arrival techniques Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Direction of Arrival techniques Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
5	<p>Case study progress meeting presentation Duración: 02:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación</p> <p>Case study over RFSoc Duración: 02:00 PL: Actividad del tipo Prácticas de Laboratorio</p>			
6	<p>Array Processing and DoA review Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>	<p>Adaptive beamforming and DOA models Duración: 02:00 PL: Actividad del tipo Prácticas de Laboratorio</p>		<p>Array Processing and DoA Laboratory TI: Técnica del tipo Trabajo Individual Evaluación Progresiva Presencial Duración: 00:00</p>

7	<p>Single user MIMO Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Single user MIMO Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
8	<p>Single user MIMO Duración: 02:00 PR: Actividad del tipo Clase de Problemas</p>	<p>SU MIMO Duración: 02:00 PL: Actividad del tipo Prácticas de Laboratorio</p>		<p>Single user mimo lab TI: Técnica del tipo Trabajo Individual Evaluación Progresiva Presencial Duración: 00:00</p>
9	<p>Case study progress meeting Duración: 02:00 AIV: Aula invertida</p> <p>Multi-User MIMO Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
10	<p>massive MIMO Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>massive MIMO Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
11	<p>Multiple antenna technologies Duración: 01:30 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Multiple antenna technologies Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>	<p>Description and discussion of use cases to be used in next PR session Duración: 00:30 G: Gamificación</p>		
12	<p>Multiple antenna technologies Duración: 00:30 PR: Actividad del tipo Clase de Problemas</p> <p>Multiple antenna technologies Duración: 02:00 PR: Actividad del tipo Clase de Problemas</p>	<p>Architecture, Adaptive beamforming and DOA analysis Duración: 01:30 PL: Actividad del tipo Prácticas de Laboratorio</p>		
13	<p>Multiple antenna technologies Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p> <p>Multiple antenna technologies Duración: 02:00 LM: Actividad del tipo Lección Magistral</p>			
14	<p>Case study oral presentation Duración: 02:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación</p> <p>Case study oral presentation Duración: 02:00 OT: Otras actividades formativas / Evaluación</p>			<p>Case study report and oral presentation. TI: Técnica del tipo Trabajo Individual Evaluación Progresiva y Global Presencial Duración: 00:00</p>

15				
16				
17				<p>Global examination EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Global Presencial Duración: 02:00</p> <p>Exam EX: Técnica del tipo Examen Escrito Evaluación Progresiva Presencial Duración: 02:00</p> <p>Submission of labs and exercises TI: Técnica del tipo Trabajo Individual Evaluación Global No presencial Duración: 00:00</p>

Para el cálculo de los valores totales, se estima que por cada crédito ECTS el alumno dedicará dependiendo del plan de estudios, entre 26 y 27 horas de trabajo presencial y no presencial.

7. Actividades y criterios de evaluación

7.1. Actividades de evaluación de la asignatura

7.1.1. Evaluación (progresiva)

Sem.	Descripción	Modalidad	Tipo	Duración	Peso en la nota	Nota mínima	Competencias evaluadas
6	Array Processing and DoA Laboratory	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	Presencial	00:00	20%	3 / 10	CE01 CE03 CT05 CT01
8	Single user mimo lab	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	Presencial	00:00	20%	3 / 10	CE03 CT01 CE01 CT05
14	Case study report and oral presentation.	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	Presencial	00:00	30%	3 / 10	CT04 CE03 CT05
17	Exam	EX: Técnica del tipo Examen Escrito	Presencial	02:00	30%	3 / 10	CT01 CT03 CE01 CE03

7.1.2. Prueba evaluación global

Sem	Descripción	Modalidad	Tipo	Duración	Peso en la nota	Nota mínima	Competencias evaluadas
14	Case study report and oral presentation.	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	Presencial	00:00	30%	3 / 10	CT04 CE03 CT05
17	Global examination	EX: Técnica del tipo Examen Escrito	Presencial	02:00	40%	3 / 10	CT01 CT03 CE01 CE03
17	Submission of labs and exercises	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	No Presencial	00:00	30%	3 / 10	CT01 CT03 CT05

7.1.3. Evaluación convocatoria extraordinaria

Descripción	Modalidad	Tipo	Duración	Peso en la nota	Nota mínima	Competencias evaluadas
Global examination	PI: Técnica del tipo Presentación Individual	Presencial	02:00	50%	3 / 10	CT01 CT03 CE01 CE03
Submission of labs and exercises	TI: Técnica del tipo Trabajo Individual	Presencial	00:00	30%	3 / 10	CT01 CT03 CE01 CT05
Case study report and oral presentation.	PI: Técnica del tipo Presentación Individual	Presencial	00:30	20%	3 / 10	CT04 CE03 CT05

7.2. Criterios de evaluación

Evaluation will assess if students have acquired all the competences of the subject. Thus, evaluation through final assessment will be carried out considering all the evaluation techniques used in continuous evaluation (EX, ET, TG, etc.), and will be celebrated in the exam period approved by Junta de Escuela for the current academic semester and year. Evaluation activities that assess learning outcomes that cannot be evaluated through a single exam can be carried out along the semester.

Progressive evaluation items and qualification criteria (ordinary call)

The distributed evaluation is composed of the following items:

1. Individual and laboratory exercises (40%). They shall be delivered along the course, in general by the end of the units. These activities can be carried out on-site or be proposed as homework. Attendance to on-site activities will be mandatory for all students. The qualification of this item will be obtained as the average of the marks obtained in each of the individual and laboratory exercises.
2. Case study (30%). Students shall prepare and provide a short oral presentation about the use of multiple antenna techniques applied to the proposed case study (e.g. discuss the use of antenna arraying for a radar system, or evaluate how multiple antenna techniques are introduced in 802.11ac). It will be done individually or in groups of two students, depending on the number of students enrolled in the course. This

activity is mandatory for all students in the course.

3. Exam (30%). Written exam with theoretical questions and short exercises. A minimum of 3 points out of 10 is required to pass the exam.

Evaluation by global test in the ordinary call

In this case, students have to carry out the distributed with the same items like the progressive evaluation.

Extraordinary call

The evaluation in the extraordinary call will be carried out through the global test with a value of 100%. For those students who have passed the deliveries of laboratory exercises and case study in the progressive evaluation will calculate the grade using the same criteria as the progressive assessment,

8. Recursos didácticos

8.1. Recursos didácticos de la asignatura

Nombre	Tipo	Observaciones
David Tse, Fundamentals of Wireless Communications.	Recursos web	D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005 (http://www.eecs.berkeley.edu/~dtse/book.html).
Chandran. Advances in direction of arrival estimation	Bibliografía	Advances in direction-of-arrival estimation. Sathish Chandran. Boston Artech House cop. 2006
Compton. Adaptive antennas. Concepts and performance	Bibliografía	Adaptive antennas : concepts and performance. R.T. Compton. Englewood Cliffs, New Jersey Prentice-Hall 1988
Marzetta. Fundamentals of Massive MIMO	Bibliografía	T. L. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang and H. Q. Ngo, "Fundamentals of Massive MIMO", Cambridge University Press, 2016.
Brown. Practical Guide to the MIMO Radio Channel.	Bibliografía	T. Brown, E. De Carvalho and P. Kyritsi, "A Practical Guide to the MIMO Radio Channel", Wiley, 2012.
Paulraj. Introduction to ST Wireless Comms	Bibliografía	A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, "Introduction to Space-Time Wireless Communications", Cambridge University Press, 2006.
Raviraj Adve. Lecture notes on Smart Antennas and MIMO systems	Recursos web	https://www.comm.utoronto.ca/~rsadve
Educational Array Processing Techniques Simulation tool	Otros	Software developed by APMC professors for the evaluation of different architecture, scenarios and array processing techniques.

9. Otra información

9.1. Otra información sobre la asignatura

APMC course is related to SDG 9 ("Industry, Innovation, Infrastructure") as contents deal with the design of new infrastructures to increase access to ICT and broadband services (This is included into the case studies). The communication technologies covered in the course provide a solution to the increasing demand of communication services that will generate new business opportunities and contribute to digital innovation and reach the digital transformation of the society.