

## DIDATTICA EROGATA 2026/2027

### Ingegneria delle Telecomunicazioni (LM-27)

Dipartimento: INGEGNERIA INDUSTRIALE, ELETTRONICA E MECCANICA

Codice CdS: 108660

#### INSEGNAMENTI

##### Primo anno

##### Primo semestre

#### 20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION ( - IINF-02/A - 9 CFU - 72 ore - ENG )

*Curricula: Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies*

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
SCHETTINI GIUSEPPE	48	Carico didattico	
SCHETTINI GIUSEPPE	24	Affidamento di incarico retribuito	

#### 20810544 - DIGITAL SIGNAL PROCESSING ( - IINF-03/A - 9 CFU - 72 ore - ITA )

*Curricula: Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies*

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
GIUNTA GAETANO	72	Carico didattico	

#### 20810550 - 5G COMMUNICATIONS AND BEYOND ( - IINF-03/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

*Curricula: Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies*

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
GIUNTA GAETANO	48	Affidamento di incarico retribuito	

#### 20810550 - DIGITAL COMMUNICATIONS ( - IINF-03/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

*Curricula: Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies*

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
VEGNI ANNA MARIA	24	Affidamento di incarico retribuito	
VEGNI ANNA MARIA	24	Carico didattico	

##### Secondo semestre

#### 20810338 - ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS ( - IINF-02/A - 9 CFU - 72 ore - ENG )

*Curricula: Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies*

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
BILOTTI FILIBERTO	72	Carico didattico	

#### 20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE: ALGORITHMS AND METHODS ( - IIET-01/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Mutuazioni:**

Dettaglio	Ore	Canale
<b>Fruito da:</b> 20810398 INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER L'INGEGNERIA in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 RIGANTI FULGINEI FRANCESCO	48	
<b>Fruito da:</b> 20810398 INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER L'INGEGNERIA in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 RIGANTI FULGINEI FRANCESCO	48	

### 20810549 - DESIGN OF LEARNING ALGORITHMS ( - IIET-01/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
RIGANTI FULGINEI FRANCESCO	24	Affidamento di incarico retribuito	
RIGANTI FULGINEI FRANCESCO	24	Carico didattico	

### 20810552 - ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ( - IINF-02/A - 9 CFU - 72 ore - ENG )

**Curricula:** Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
BARBUTO MIRKO	72	Carico didattico	

### 20802093 - ELETTRONICA DEI SISTEMI PROGRAMMABILI ( - IINF-01/A - 9 CFU - 72 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Mutuazioni:**

Dettaglio	Ore	Canale
<b>Mutuato da:</b> 20802093 ELETTRONICA DEI SISTEMI PROGRAMMABILI in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 N0 SAVOIA ALESSANDRO STUART	72	
<b>Mutuato da:</b> 20802093 ELETTRONICA DEI SISTEMI PROGRAMMABILI in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 N0 SAVOIA ALESSANDRO STUART	72	

### 20810554 - ETHICAL HACKING ( - IINF-03/A - 9 CFU - 72 ore - ENG )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
CARLI MARCO	72	Affidamento di incarico retribuito	

### 20810545 - INFORMATION THEORY ( - IINF-03/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
CAMPISI PATRIZIO	24	Affidamento di incarico retribuito	
CAMPISI PATRIZIO	24	Carico didattico	

### 20810546 - METAVERSE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ( - IINF-03/A - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
CARLI MARCO	24	Affidamento di incarico retribuito	
CARLI MARCO	24	Carico didattico	

## Secondo anno

### Primo semestre

#### 20810541 - ADVANCED ANTENNA ENGINEERING ( - ING-INF/02 - 6 CFU - 48 ore - ENG )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence - Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
BACCARELLI PAOLO	48	Carico didattico	

#### 20810542 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ELECTROMAGNETIC TECHNOLOGIES ( - ING-INF/02 - 9 CFU - 72 ore - ENG )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence

**Mutuazioni:**

Dettaglio	Ore	Canale
<b>Mutuato da:</b> 20810542 ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR ELECTROMAGNETIC TECHNOLOGIES in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 TOSCANO ALESSANDRO	72	

#### 20810547 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SIGNAL PROCESSING ( - ING-INF/03 - 9 CFU - 72 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
MAIORANA EMANUELE	72	Carico didattico	

#### 20810548 - BIOMETRICS AND MULTISENSORIAL INTERACTION ( - ING-INF/03 - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Applied Artificial Intelligence

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
CAMPISI PATRIZIO	48	Affidamento di incarico retribuito	

#### 20810551 - DEVICES FOR WIRELESS SYSTEMS ( - ING-INF/02 - 6 CFU - 48 ore - ENG )

**Curricula:** Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
PONTI CRISTINA	48	Carico didattico	

#### 20810543 - METAMATERIALS AND METASURFACES FOR WAVE ENGINEERING ( - ING-INF/02 - 9 CFU - 72 ore - ENG )

**Curricula:** Wireless Technologies

**Mutuazioni:**

Dettaglio	Ore	Canale
<b>Mutuato da:</b> 20810543 METAMATERIALS AND METASURFACES FOR WAVE ENGINEERING in Ingegneria elettronica per l'industria e l'innovazione LM-29 MONTI ALESSIO	72	

### Secondo semestre

#### 20810553 - WIRELESS NETWORKING AND IOT ( - ING-INF/03 - 6 CFU - 48 ore - ITA )

**Curricula:** Wireless Technologies

**Docenti:**

Nominativo	Ore	Tipo incarico	Canale
VEGNI ANNA MARIA	48	Carico didattico	

## INCARICHI DIDATTICI DEL CORSO DI LAUREA

Nominativo	Tot.Ore	Tipo incarico	Ore	Attività didattica
BACCARELLI PAOLO	48	Carico didattico	48	20810541 - ADVANCED ANTENNA ENGINEERING
BARBUTO MIRKO	72	Carico didattico	72	20810552 - ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
BILOTTI FILIBERTO	72	Carico didattico	72	20810338 - ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS
CAMPISI PATRIZIO	96	Affidamento di incarico retribuito	48	20810548 - BIOMETRICS AND MULTISENSORIAL INTERACTION
		Carico didattico	24	20810545 - INFORMATION THEORY
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810545 - INFORMATION THEORY
		Carico didattico	24	20810545 - INFORMATION THEORY
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810545 - INFORMATION THEORY
CARLI MARCO	120	Affidamento di incarico retribuito	72	20810554 - ETHICAL HACKING
		Carico didattico	24	20810546 - METAVERSE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810546 - METAVERSE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE
GIUNTA GAETANO	120	Carico didattico	72	20810544 - DIGITAL SIGNAL PROCESSING
		Affidamento di incarico retribuito	48	20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS
MAIORANA EMANUELE	72	Carico didattico	72	20810547 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SIGNAL PROCESSING
PONTI CRISTINA	48	Carico didattico	48	20810551 - DEVICES FOR WIRELESS SYSTEMS
RIGANTI FULGINEI FRANCESCO	48	Carico didattico	24	20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE
		Carico didattico	24	20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE
SCHETTINI GIUSEPPE	72	Carico didattico	48	20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION
		Carico didattico	48	20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION
VEGNI ANNA MARIA	96	Affidamento di incarico retribuito	24	20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS
		Carico didattico	24	20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS
		Affidamento di incarico retribuito	24	20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS
		Carico didattico	24	20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS
		Carico didattico	48	20810553 - WIRELESS NETWORKING AND IOT
DOCENTE NON DEFINITO	0			
<b>Totale ore</b>	<b>864</b>			

## CONTENUTI DIDATTICI

### 20810541 - ADVANCED ANTENNA ENGINEERING

**Docente:** BACCARELLI PAOLO

#### Italiano

##### Prerequisiti

Conoscenza delle nozioni di base dell'elettromagnetismo applicato (equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo, onde piane dello spazio libero riflessione e rifrazione di onde piane su interfacce piane, formalismo delle linee di trasmissione, propagazione guidata, funzioni di Green, integrali di radiazione)

##### Programma

PRIMA PARTE Cenni e richiami introduttivi: Sistemi algebrici lineari e relativa soluzione. Decomposizione ai valori singolari di matrici a valori complessi. Proprietà fondamentali della radiazione elettromagnetica. Teoremi di unicità, reciprocità ed equivalenza e relative applicazioni nell'ambito dei fenomeni radiativi. Parametri caratteristici delle antenne. Allineamenti di antenne. Reti equivalenti trasverse e metodo della risonanza trasversa: Linee di trasmissione TE, TM e TEM. Applicazioni delle reti equivalenti trasverse alle strutture dielettriche multistrato. Il grounded dielectric slab (GDS). Equazione di risonanza trasversa. Equazione di dispersione dei modi TM e TE del GDS. Soluzione grafica dell'equazione di dispersione. Soluzioni proprie e improprie. Onde superficiali TM e TE. Onde leaky. Campo lontano generato da sorgenti elementari in strutture dielettriche multistrato. Antenne stampate a microstriscia: Introduzione, principi operativi, metodi di alimentazione e caratteristiche radiative. Tecniche di progetto e formule CAD. Campo lontano e diagramma di radiazione (derivazione con metodi approssimati basati sulla sovrapposizione degli effetti e la reciprocità). Impedenza di ingresso: modelli circuitali e sviluppo in autofunzioni. Antenne a larga banda e multi banda, miniaturizzazione. SECONDA PARTE Strutture periodiche: Introduzione e teoria di base (armoniche spaziali e teorema di Floquet-Bloch). Diagrammi di Brillouin. Proprietà spettrali delle armoniche spaziali: armoniche proprie e improprie. Analisi di Bloch. Antenne a onda leaky (Leaky-wave antennas, "LWAs"): Caratteristiche generali e classificazione. Tecniche di progetto per antenne a onda leaky monodimensionali (1D-LWAs) uniformi e periodiche. Antenne a cavità di tipo Fabry-Perot. Caratteristiche generali di antenne a onda leaky bidimensionali (2D LWAs). Array per comunicazioni wireless: Caratterizzazione dei canali wireless. Arrays e diversità nel tempo, nella frequenza e nello spazio. Introduzione ai sistemi Multiple-Input/Multiple-Output (MIMO). Metodi numerici basati sulle equazioni integrali al contorno e metodo dei momenti (MoM): Rappresentazioni integrali al contorno dei campi elettromagnetici ed equazioni integrali di superficie. Equazioni integrali ai potenziali misti nello spazio libero. MoM applicato alle equazioni integrali ai potenziali misti nello spazio libero: funzioni base e di test di tipo Rao-Wilton-Glisson. Equazioni integrali ai potenziali misti in strutture dielettriche multistrato. Metodo dello "spectral domain" per la derivazione delle funzioni di Green spettrali in strutture multistrato. Integrali di Sommerfeld, estrazioni asintotiche e singolarità spaziali. Metodi di accelerazione per il calcolo numerico di integrali e serie in elettromagnetismo. MoM in strutture periodiche nello spazio libero. ESERCITAZIONE NUMERICHE CAD elettromagnetici: Ansys HFSS e CST Microwave Studio: introduzione e caratteristiche generali. Analisi di antenne a microstriscia e a onda leaky. Analisi di strutture periodiche selettive in frequenza.

##### Testi

Materiale didattico: • Appunti delle lezioni a cura del docente pubblicati sullo spazio Moodle del corso

##### Bibliografia di riferimento

Testi di consultazione: • C. A. Balanis, Antenna theory, analysis and design. New York, NY: Wiley Interscience, 2005, 3a ed. • Y.T. Lo, S.W. Lee, Antenna Handbook. Antenna theory, Volume II, Van Nostrand Reinhold, 1993 • D. R. Jackson, "Microstrip Antennas," Ch. 7 of Antenna Engineering Handbook, J. L. Volakis, Editor, McGraw Hill, 2007. • D. R. Jackson, S. A. Long, J. T. Williams, and V. B. Davis, "Computer-Aided Design of Rectangular Microstrip Antennas," Ch. 5 of Advances in Microstrip and Printed Antennas, • K. F. Lee and W. Chen, Eds., John Wiley, 1997 • D. Guha e Y. M. M. Antar, Eds., Microstrip and printed antennas: New trends, techniques and applications. Wiley, 2011. • R. E. Collin and F. J. Zucker, Antenna theory. New York, NY: McGraw-Hill, 1969. • D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005. • K. F. Warnick, Numerical methods for engineering: An introduction using Matlab and computational electromagnetics. Raleigh, NC: SciTech Publishing Inc, 2011. • D. B. Davidson, Computational electromagnetics for RF and microwave engineering. New York: Cambridge University Press, 2011. • R. C. Booton, Computational methods for electromagnetics and microwaves. New York, NY: Wiley, 1992, 2a ed. • A. F. Peterson, S. L. Ray e R. Mittra, Computational methods for electromagnetics. New York: IEEE Press, 1997.

##### Modalità erogazione

lezioni frontali, esercitazioni, seminari

##### Modalità di valutazione

-Due domande orali (max 15 punti ciascuna) rispettivamente sulla prima e seconda parte del programma. L'esame è superato se la votazione complessiva è maggiore uguale a 18/30. -E' prevista una prova di esonero, prova scritta costituita da una o più domande aperte, della prima parte del programma (max 15 punti). L'esonero dalla prima parte si ottiene con un punteggio uguale o superiore a 9. La prova finale, nel caso di esonero dalla prima parte, conterà in una domanda orale sulla seconda parte del corso (max 15 punti). L'esame è superato se la votazione complessiva è maggiore uguale a 18/30.

#### English

##### Prerequisites

Knowledge of basic notions of applied electromagnetics (fundamental electromagnetic equations, plane waves in free space, reflection and refraction of plane waves from planar boundaries, transmission-line formalism, guided-wave propagation, Green's functions, radiation integrals)

##### Programme

I PART Introductory concepts: Linear algebraic systems and their numerical solution Singular-value decomposition (SVD) of general complex matrices. Fundamentals of radiation. Antenna parameters. Elementary array theory. Beyond elementary array theory. Microstrip and Printed antennas: Overview, basic principles of operation, feeding methods, and radiation characteristics. Design procedures and CAD formulas. Circular polarization, broadband and multi-band antennas, and miniaturization. II PART Periodic

structures: Introduction, basic theory (space harmonics, Floquet theorem). Brillouin diagrams. Bloch analysis. Leaky-wave antennas (LWAs): General features and classification. Design procedures for 1D LWAs. Fabry-Perot cavity antennas; general features of 2D LWAs Arrays for wireless communications: Characterization of the wireless channel. Arrays and diversity. Introduction to Multiple-Input/Multiple-Output (MIMO) systems. Boundary integral equations and the Method of Moments (MoM): MoM for 1D integral equations; basis and test functions. MoM for thin wires. Boundary integral representations of the electromagnetic field and boundary integral equations. Mixed-Potential Integral Equation (MPIE) in free space. MoM for MPIE: basis and test functions. MPIE in layered media. Sommerfeld integrals, asymptotic extractions, and spatial singularities. Acceleration techniques for integral and series in electromagnetic problems. MoM for MPIE: periodic structures (free space and layered media). III (Numerical simulations with commercial electromagnetic software) Electromagnetic CAD: Ansys Designer and FEKO: introduction and general features. Analysis of microstrip antennas: simple patch antenna, mutual coupling, and array configurations. Analysis of Frequency Selective Surfaces. (FSSs)

### Reference books

Teaching material: • Slides of the lessons available on the Moodle area of the course

### Reference bibliography

Bibliography: • C. A. Balanis, Antenna theory, analysis and design. New York, NY: Wiley Interscience, 2005, 3a ed. • Y.T. Lo, S.W. Lee, Antenna Handbook. Antenna theory, Volume II, Van Nostrand Reinhold, 1993 • D. R. Jackson, "Microstrip Antennas," Ch. 7 of Antenna Engineering Handbook, J. L. Volakis, Editor, McGraw Hill, 2007. • D. R. Jackson, S. A. Long, J. T. Williams, and V. B. Davis, "Computer-Aided Design of Rectangular Microstrip Antennas," Ch. 5 of Advances in Microstrip and Printed Antennas, • K. F. Lee and W. Chen, Eds., John Wiley, 1997 • D. Guha e Y. M. M. Antar, Eds., Microstrip and printed antennas: New trends, techniques and applications. Wiley, 2011. • R. E. Collin and F. J. Zucker, Antenna theory. New York, NY: McGraw-Hill, 1969. • D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005. • K. F. Warnick, Numerical methods for engineering: An introduction using Matlab and computational electromagnetics. Raleigh, NC: SciTech Publishing Inc, 2011. • D. B. Davidson, Computational electromagnetics for RF and microwave engineering. New York: Cambridge University Press, 2011. • R. C. Booton, Computational methods for electromagnetics and microwaves. New York, NY: Wiley, 1992, 2a ed. • A. F. Peterson, S. L. Ray e R. Mittra, Computational methods for electromagnetics. New York: IEEE Press, 1997.

### Study modes

lectures, tutorials, seminars

### Exam modes

-

## 20810338 - ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS

**Docente:** BILOTTI FILIBERTO

### Italiano

#### Prerequisiti

Competenze di base di elettromagnetismo.

#### Programma

Parte I - Interazione tra campo elettromagnetico e materiali naturali Fondamenti della teoria dei campi elettromagnetici. Risposta macroscopica dei materiali naturali. Relazioni costitutive e classificazione dei materiali. Linearità. Dispersione. Località. Materiali stazionari ed omogenei. Causalità e relazioni di Kramers-Kronig. Risposta elettrica dei materiali naturali. Polarizzazione elettrica del materiale. Polarizzabilità elettronica, atomica, ionica, di orientamento, di interfaccia. Modello di Lorentz: derivazione e discussione. Modello di Drude: derivazione e discussione. Risposta magnetica dei materiali naturali. Risposta elettrodinamica di una ferrite magnetizzata. Parte II - Interazione tra campo elettromagnetico e materiali artificiali Materiali elettromagnetici artificiali. Prospettiva storica. Materiali chirali. Risposta microscopica della materia. Concetto di polarizzabilità. Polarizzabilità elettrica di una sfera dielettrica. Polarizzabilità magnetica di una spira metallica. Polarizzabilità elettrica di una striscia metallica. Polarizzabilità elettrica di una spira metallica. Polarizzabilità della particella metallica a forma di omega. Effetto magneto-elettrico. Campo locale e campo di interazione. Dalla risposta microscopica a quella macroscopica. Tecniche di omogeneizzazione. Formula di Maxwell-Garnett. Formula di Clausius-Mossotti. Formula di Bruggeman. Densità di energia per materiali dispersivi. Causalità e conservazione dell'energia: comportamento in frequenza dei parametri costitutivi. Dispersione anomala. Introduzione ai metamateriali. Panoramica storica. Metamateriali e loro definizioni. Studi di Victor Veselago. Indice di rifrazione negativo. Materiali con indice di rifrazione negativo e loro prima implementazione. Terminologia dei metamateriali. Materiali elettrici artificiali con permittività negativa. Il mezzo a fili. Il mezzo a piatti metallici piani e paralleli. Metalli nobili alle frequenze ottiche. Materiali elettrici artificiali nel visibile. Metamateriali ENZ. Magnetismo naturale e artificiale. Lo Split-Ring Resonator: concetto, analisi e progettazione. Miniaturizzazione di inclusioni magnetiche. Il Multiple Split-Ring Resonator: concetto, analisi e progettazione. Lo Spiral Resonator: concetto, analisi e progettazione. Il Labyrinth Resonator: concetto, analisi e progettazione. Modellazione di inclusioni metalliche nel visibile. L'induttanza cinetica degli elettroni. La struttura Fishnet. Materiali ad indice di rifrazione negativo nel visibile. Magnetismo alle frequenze ottiche. Parte III - Materiali tempo-varianti Soluzione dell'equazione delle onde in materiali tempo-varianti. Fenomeni di scattering ad una interfaccia temporale (onda riflessa e onda rifratta). Doppia interfaccia temporale: slab temporale. Interfacce temporali multiple (multi-strato temporali). Interfaccia spazio-temporale (space-time corner). Doppia interfaccia spazio-temporale (space-time slab). Interfacce controllate nel tempo e relative applicazioni. Parte IV - Imaging elettromagnetico, sensoristica elettromagnetica ed invisibilità elettromagnetica Imaging, sensoristica ed invisibilità: definizioni e principi di base. Microscopia: definizione e classificazione. Nozioni di base e principi di microscopia ottica. Tecniche di bright field, dark field, contrasto di fase, fluorescenza. Microscopia a raggi X e microscopia elettronica. TEM e SEM. Limite della diffrazione nelle lenti ottiche. La lente perfetta: aspetti fisici, progettazione, implementazione e funzionamento. Esempi di superlenti che lavorano a diverse frequenze. Metamateriali iperbolici: definizione e proprietà. Le iperlenti: aspetti fisici, progettazione, implementazione e funzionamento. Super e iper-lenti ibride. Microscopia in campo vicino. NSOM: fondamenti e principi. Modalità operative dell'NSOM: illumination, collection e scattering mode. Scattering e assorbimento di onde elettromagnetiche. Sezioni di scattering, assorbimento ed estinzione. Principi di spettroscopia. Scattering di Rayleigh (risposta elastica). Scattering Raman (risposta anelastica; scattering Stokes e anti-Stokes). Spettroscopia IR. Polaritone plasmonico di superficie (SPP): definizione ed eccitazione. Sensori elettromagnetici basati sulla risonanza plasmonica di superficie (SPR): definizione, aspetti fisici, implementazione, funzionamento. Modulazione angolare, di lunghezza d'onda, intensità, fase, polarizzazione di sensori basati su SPR. Biosensori basati

su SPR. Preparazione del campione. Sensogrammi. Sensibilità, FoM, LoD. Localized Surface Plasmon (LSP): definizione ed eccitazione. Sensori elettromagnetici basati sulla risonanza plasmonica di superficie localizzata (LSPR): definizione, fisica, implementazione, funzionamento. Principi di spettroscopia SERS. Riduzione dell'osservabilità dell'oggetto. Tecnologie stealth e RAM. Invisibilità elettromagnetica: definizione e figura di merito. L'elettromagnetismo di trasformazione come via per l'invisibilità. Approcci alternativi al cloaking. Principali limitazioni. Cancellazione dello scattering. Mantelli volumetrici per oggetti cilindrici e sferici: analisi e progettazione. Cloaking di oggetti con altre forme. Implementazione di mantelli volumetrici basati sulla cancellazione dello scattering a microonde e a frequenze ottiche. Mantle cloaking: concetto, modellistica, progettazione e realizzazione. Applicazioni del cloaking alle frequenze ottiche. Riduzione e manipolazione delle forze ottiche. Riduzione dell'effetto Casimir. Sistemi NSOM: principi di funzionamento e applicazioni. Transmission, reception e scattering mode. Punte dell'NSOM parzialmente schermate per immagini ad elevata risoluzione. Applicazioni dell'invisibilità alle antenne. Nascondere oggetti passivi e ostacoli nel campo vicino di un'antenna. Nascondere un'antenna ricevente. Nascondere antenne trasmettenti. Dispositivi di invisibilità non lineari. Metasuperfici riconfigurabili e relative applicazioni nei sistemi 5G+.

## Testi

Appunti predisposti a cura del docente.

## Bibliografia di riferimento

Appunti predisposti a cura del docente.

## Modalità erogazione

Tradizionale

## Modalità di valutazione

L'esame consiste in una prova orale (che potrà anche essere in forma scritta). Sono previste prove in itinere che si svolgono in forma scritta.

## English

### Prerequisites

Foundations of electromagnetism.

### Programme

Part I – Interaction between the electromagnetic field and natural materials Foundations of electromagnetic field theory. Macroscopic response of natural materials. Constitutive relations and material classification. Linearity. Dispersion. Locality. Stationary and homogeneous materials. Causality and Kramers-Kronig relations. Electric response of natural materials. Material polarization. Electronic, atomic/ionic, orientation, interface polarization mechanisms. Lorentz model: derivation and discussion. Drude model: derivation and discussion. Magnetic response of natural materials. Electrodynamics of a magnetized ferrite. Part II – Interaction between the electromagnetic field and artificial materials Artificial electromagnetic materials. Historical perspective. Chiral materials. Microscopic response of matter. Polarizability concept. Electric polarizability of a dielectric sphere. Magnetic polarizability of a metallic loop. Electric polarizability of a metallic strip. Electric polarizability of a metallic loop. Polarizabilities of the metallic omega particle. Magneto-electric effect. Local field and interaction field. From microscopic to macroscopic response. Homogenization techniques. Maxwell-Garnett formula. Clausius-Mossotti formula. Bruggeman formula. Energy density for dispersive materials. Causality and energy conservation: frequency behavior of the constitutive parameters. Anomalous dispersion. Introduction to metamaterials. Historical overview. Metamaterials and their definitions. Original studies by Victor Veselago. Negative index of refraction. Negative-index materials and their first implementation. Metamaterial terminology. Artificial electric materials with negative permittivity. The wire medium. The parallel-plate medium. Noble metals at optical frequencies. Artificial electric materials in the visible. Epsilon-near-zero metamaterials. Natural and artificial magnetism. The split-ring resonator: concept, analysis, and design. Miniaturization of magnetic particles. The Multiple Split-Ring Resonator: concept, analysis, and design. The Spiral Resonator: concept, analysis, and design. The Labyrinth Resonator: concept, analysis, and design. Modelling of metallic particles in the visible. The kinetic inductance of electrons. The fishnet structure. Route towards negative index material in optics. Optical magnetism. Part III – Time-varying materials Solution of the wave equation in time-varying materials. Scattering phenomena at a temporal interface (reflected wave and transmitted wave). Double temporal interface: temporal slab. Multiple temporal interfaces (temporal multilayer). Space-time interface (space-time corner). Double space-time interface (space-time slab). Time-switched interfaces and related applications. Part IV – Electromagnetic invisibility, imaging and sensing Conceptually new electromagnetic devices based on the use of metamaterials: invisibility cloaks, superlenses, hyperlenses. Cloaking. Reduction of object observability. Stealth and RAM technologies. Electromagnetic invisibility concept. Total scattering cross section. Absorption cross section. Optical theorem. Definition of an ideal invisibility cloak. Figure of merit of non-ideal cloaks. Transformation electromagnetics as a route to invisibility. Alternative approaches to cloaking. Main limitations and assessment. Scattering cancellation approach to cloaking. Volumetric cloaks for cylindrical and spherical objects: analysis and design. Cloaking objects with other shapes. Cloaking a cone. Implementation of scattering cancellation based volumetric cloaks at microwave and optical frequencies. Mantle cloaking: concept, modelling, design, and implementation. Cloaking applications: reduction and manipulation of optical forces. Reduction of the Casimir effect. Imaging and sensing. The optical lens and the diffraction limit. Superlenses: concept, physical aspects, and design. Hyperlenses: concept, physical aspects, and design. Near-field-scanning optical microscope (NSOM). Aperture and apertureless NSOM tips. Advanced imaging with partially cloaked tips. Electromagnetic sensors. Biological sensors.

### Reference books

Notes provided by the lecturer.

### Reference bibliography

Notes provided by the lecturer.

### Study modes

Traditional

### Exam modes

-

## 20810540 - ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION

**Docente:** SCHETTINI GIUSEPPE

### Italiano

#### Prerequisiti

Il docente assume che il contenuto culturale dei corsi tipici della Laurea in Ingegneria Elettronica, in particolare nel settore dei Campi elettromagnetici, siano stati ben studiati e acquisiti.

#### Programma

Fondamenti della radiazione elettromagnetica e parametri di un'antenna. Radiazione da dipolo corto. Radiazione da un loop di corrente. Radiazione da una distribuzione arbitraria di corrente. Dipolo a lambda mezzi. Impedenza d'antenna. Antenna a dipolo ripiegato, a dipolo corto e a monopolo. Antenne riceventi. Teorema di reciprocità ed area efficace. Disadattamento di polarizzazione. Formula di trasmissione di Friis. Rumore nei sistemi di comunicazione. Temperatura di rumore di antenna. Introduzione agli array. Array monodimensionali, broad-side, end-fire. Array bidimensionali. Reti di alimentazione. Array parassiti. Antenne in ricezione: teorema di reciprocità ed area efficace, formula di trasmissione di Friis. Temperatura di rumore di antenna. Progettazione degli array. Metodo di Chebyshev, arrays binomiali, array polinomiali. Reti di alimentazione. Matrici di Butler. Arrays parassiti. Arrays log-periodici. Antenne ad apertura: analisi e progettazione. Radiazione da una apertura piana. Metodo della trasformata di Fourier. Radiazione da apertura rettangolare e circolare. Principio di equivalenza. Applicazione del principio di equivalenza alla radiazione da apertura. Antenne a tromba. Radiazione da guida d'onda rettangolare e circolare. Ottica geometrica. Lenti a microonde. Antenne a paraboloide: efficienza, direttività, cross-polarizzazione. Metodo delle correnti indotte. Feed con bassa cross-polarizzazione. Sistemi a doppio riflettore. Radiazione da fenditura. Sintesi di allineamenti di fenditure. Antenne planari a microstriscia. Proprietà dei mezzi artificiali periodici e a band-gap elettromagnetico. Applicazione alle antenne. Diffusione della radiazione in ambiente elettromagnetico complesso e casi canonici. Scattering di un'onda piana da un cilindro conduttore, polarizzazione E ed H. Cilindro dielettrico. Propagazione fra punti fissi: presenza della terra, onda superficiale e riflessione da terra piatta. Indice di rifrazione per un mezzo ionizzato. Curvatura dei raggi nel plasma ionosferico. Le esercitazioni sono parte integrante del programma d'esame.

#### Testi

A. Paraboni, M. D'Amico, "Radiopropagazione" Mc Graw-Hill Libri Italia. A. Paraboni, "Antenne", Mc Graw-Hill Libri Italia. C. Balanis, "Antenna theory, analysis and design", 3rd edition, Wiley, Robert E. Collin, "Antennas and Radiowave propagation", McGraw-Hill Book Company.

#### Bibliografia di riferimento

-

#### Modalità erogazione

Testi da definire

#### Modalità di valutazione

Viene offerta la possibilità di svolgere una prova in itinere a circa metà del corso. Qualora si superi tale prova si svolge un esame orale sul programma rimanente del corso.

### English

#### Prerequisites

It is assumed that the cultural content of the typical courses of the Degree in Electronic Engineering, in particular in the field of Electromagnetic Fields, have been well studied and acquired.

#### Programme

Fundamentals of electromagnetic radiation and parameters of an antenna. Short dipole radiation. Radiation from a current loop. Radiation from an arbitrary distribution of current. Lambda dipole means. Antenna impedance. Folded dipole, short dipole and monopole antenna. Receiving antennas. Reciprocity theorem and effective area. Polarization mismatch. Friis transmission formula. Noise in communication systems. Antenna noise temperature. Introduction to arrays. One-dimensional, broad-side, end-fire arrays. Two-dimensional arrays. Power supply networks. Parasitic arrays. Receiving antennas: reciprocity theorem and effective area, Friis transmission formula. Antenna noise temperature. Array design. Chebyshev method, binomial arrays, polynomial arrays. Power supply networks. Butler matrices. Parasitic arrays. Log-periodic arrays. Aperture antennas: analysis and design. Radiation from a flat aperture. Fourier transform method. Radiation from rectangular and circular openings. Principle of equivalence. Application of the principle of equivalence to aperture radiation. Horn antennas. Radiation from rectangular and circular waveguides. Geometric optics. Microwave lenses. Paraboloid antennas: efficiency, directivity, cross-polarization. Eddy current method. Low cross-polar feeds. Dual reflector systems. Radiation from fissure. Synthesis of fissure alignments. Planar microstrip antennas. Properties of periodic and electromagnetic band-gap artificial media. Application to antennas. Diffusion of radiation in complex electromagnetic environment and canonical cases. Scattering of a plane wave from a conducting cylinder, polarization E and H. Dielectric cylinder. Propagation between fixed points: presence of earth, surface waves and reflection from flat surface. Refractive index of a ionized medium. Ray curvature in a ionospheric plasma. The exercitations are an integral part of the exam program.

#### Reference books

A. Paraboni, M. D'Amico, "Radiopropagazione" Mc Graw-Hill Libri Italia. A. Paraboni, "Antenne", Mc Graw-Hill Libri Italia. C. Balanis, "Antenna theory, analysis and design", 3rd edition, Wiley, Robert E. Collin, "Antennas and Radiowave propagation", McGraw-Hill Book Company.

#### Reference bibliography

-

#### Study modes

-  
**Exam modes**  
-

**20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

**Docente:** RIGANTI FULGINEI FRANCESCO

**Italiano**

**Prerequisiti**

**Programma**

Testi da definire

**Testi**

Testi da definire

**Bibliografia di riferimento**

Testi da definire

**Modalità erogazione**

Testi da definire

**Modalità di valutazione**

Testi da definire

**English**

**Prerequisites**

**Programme**  
-

**Reference books**  
-

**Reference bibliography**  
-

**Study modes**  
-

**Exam modes**  
-

**20810549 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

( *DESIGN OF LEARNING ALGORITHMS* )

**Docente:** RIGANTI FULGINEI FRANCESCO

**Italiano**

**Prerequisiti**

Analisi Matematica 1 Geometria ed Algebra Lineare

**Programma**

Introduzione alla teoria dell'ottimizzazione Ottimizzazione non-lineare: il problema dei minimi locali Preparazione dei dati per un corretto addestramento del sistema neurale Addestramento supervisionato: algoritmo di backpropagation per il calcolo del gradiente della funzione di errore di un MLP Realizzazione dell'algoritmo di backpropagation in C/C++ from scratch Algoritmo di addestramento a discesa del gradiente (Gradient Descent) Realizzazione dell'algoritmo Gradient Descent in C/C++ from scratch Algoritmo di addestramento a discesa stocastica del gradiente (Stochastic Gradient Descent) Realizzazione dell'algoritmo Stochastic Gradient Descent in C/C++ from scratch Algoritmo di addestramento Levenberg-Marquardt Realizzazione dell'algoritmo Levenberg-Marquardt in C/C++ from scratch Addestramento con algoritmi genetici e swarm intelligence Addestramento non supervisionato Addestramento a rinforzo

**Testi**

Dive into deep learning <https://d2l.ai/>

**Bibliografia di riferimento**

Dive into deep learning <https://d2l.ai/>

**Modalità erogazione**

Testi da definire

### Modalità di valutazione

Progettazione ed implementazione di un algoritmo/sistema di addestramento specifico

### English

#### Prerequisites

Mathematical Analysis 1 Geometry and Linear Algebra

#### Programme

Introduction to optimization theory Non-linear optimization: the problem of local minima Preparation of data for correct training of the neural system Supervised training: backpropagation algorithm for calculating the gradient of the error function of an MLP Creation of the backpropagation algorithm in C/C++ from scratch Gradient Descent training algorithm Implementation of the Gradient Descent algorithm in C/C++ from scratch Stochastic Gradient Descent training algorithm Implementation of the Stochastic Gradient Descent algorithm in C/C++ from scratch Levenberg-Marquardt training algorithm Implementation of the Levenberg-Marquardt algorithm in C/C++ from scratch Training with genetic algorithms and swarm intelligence Unsupervised training Reinforcement training

#### Reference books

Dive into deep learning <https://d2l.ai/>

#### Reference bibliography

Dive into deep learning <https://d2l.ai/>

#### Study modes

-

#### Exam modes

-

## 20810547 - ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SIGNAL PROCESSING

**Docente:** MAIORANA EMANUELE

### Italiano

#### Prerequisiti

Conoscenze relativi a variabili e processi aleatori

#### Programma

Introduzione al data analytics Statistics inference and statistical hypothesis testing regression Machine Learning classification (supervised learning) decision trees, random forests, naïve Bayes, linear discriminant analysis, k-nearest neighbor, support vector machines clustering (unsupervised learning) k-means clustering hierarchical clustering data modeling principal component analysis, independent component analysis, outlier detection and data cleansing, hidden Markov models deep learning & CNN Processing examples in Matlab & Python Students' presentations

#### Testi

S. Nolan and T. Heinzen, "Statistics for the Behavioral Sciences" G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, "An Introduction to Statistical Learning" K. P. Murphy, "Machine Learning - A Probabilistic Perspective" S. Theodoridis and K. Koutroumbas, "Pattern Recognition" T. A. Runkler, "Data Analytics - Models and Algorithms for Intelligent Data Analysis" I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, "Deep Learning" Materiale didattico ulteriore fornito dal docente

#### Bibliografia di riferimento

Choudhary, K., DeCost, B., Chen, C. et al. Recent advances and applications of deep learning methods in materials science. npj Comput Mater 8, 59 (2022). Malhotra, R., Singh, P. Recent advances in deep learning models: a systematic literature review. Multimed Tools Appl (2023).

#### Modalità erogazione

Lezioni in aula, esercitazioni, presentazioni assegnate

#### Modalità di valutazione

Discussione orale, presentazione tematica assegnata dal docente

### English

#### Prerequisites

Basic knowledge regarding stochastic variables and processes

#### Programme

Introduction to data analytics Statistics inference and statistical hypothesis testing regression Machine Learning classification (supervised learning) decision trees, random forests, naïve Bayes, linear discriminant analysis, k-nearest neighbor, support vector machines clustering (unsupervised learning) k-means clustering hierarchical clustering data modeling principal component analysis, independent component analysis, outlier detection and data cleansing, hidden Markov models deep learning & CNN Processing examples in Matlab & Python Students' presentations

## Reference books

S. Nolan and T. Heinzen, "Statistics for the Behavioral Sciences" G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, "An Introduction to Statistical Learning" K. P. Murphy, "Machine Learning - A Probabilistic Perspective" S. Theodoridis and K. Koutroumbas, "Pattern Recognition" T. A. Runkler, "Data Analytics - Models and Algorithms for Intelligent Data Analysis" I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, "Deep Learning" Further material provided by the teacher

## Reference bibliography

Choudhary, K., DeCost, B., Chen, C. et al. Recent advances and applications of deep learning methods in materials science. npj Comput Mater 8, 59 (2022). Malhotra, R., Singh, P. Recent advances in deep learning models: a systematic literature review. Multimed Tools Appl (2023).

## Study modes

Lectures, exercises, presentations

## Exam modes

-

# 20810548 - BIOMETRICS AND MULTISENSORIAL INTERACTION

**Docente:** CAMPISI PATRIZIO

## Italiano

### Prerequisiti

Conoscenze di base di Teoria dei Segnali

### Programma

Fondamenti di Biometria: Identità e biometria. Introduzione ai sistemi biometrici. Applicazioni. Identificatori biometrici morfologici: impronte digitali, volti (2D e 3D), geometria della mano, palmo della mano, strutture venose, iride, termogrammi, etc.) comportamentali (firma, voce, modalità di digitazione, andatura, movimento delle labbra, etc.) e cognitivi (segnale elettroencefalografico e risposte del sistema nervoso periferico). Progetto di un sistema biometrico: architettura dei sistemi biometrici. Fasi di progetto di un sistema biometrico (requisiti, definizione delle specifiche di progetto, architettura, implementazione, messa in esercizio, manutenzione del sistema). Verifica e valutazione delle prestazioni del sistema: FAR, FRR, FTE, FTA, curve ROC, DET, CMC, usabilità, scalabilità. Sicurezza, vulnerabilità, e privacy di un sistema biometrico: attacchi ad un sistema biometrico, protezione del template (criptosistemi biometrici, "cancelable templates"). Sistemi biometrici multimodali. Standard nei Sistemi Biometrici. Aspetti sociali, culturali e legali dell'uso dei sistemi biometrici.

### Testi

Introduction to Biometrics, Anil K. Jain , Arun A. Ross , Karthik Nandakumar , Thomas Swearingen, Springer, 2025. Handbook of Biometrics , A. K. Jain, P. Flynn, A. Ross, Springer, 2007. Handbook of Multibiometrics, A. A. Ross, K. Nandakumar, and Anil K. Jain, Springer, 2006.

### Bibliografia di riferimento

Guide to Biometrics, R. M. Bolle , J. H. Connell , S. Pankanti , N. K. Ratha , A. W. Senior , Springer, 2003.

### Modalità erogazione

Il corso è erogato in presenza

### Modalità di valutazione

Valutazione progetto/presentazione Prova scritta

## English

### Prerequisites

Basic Knowledge of Signal Theory

### Programme

Biometrics fundamentals: identity and biometrics. Introduction to biometric systems. Biometric applications. Biometric modalities. Physical: fingerprints, face (2D and 3D), hand geometry, palmprint, vein patterns, iris, thermography). Behavioral: signature, voice, keystroke, gait, lip motion). Cognitive (electroencephalographic signals and responses from the peripheral nervous system. Biometric system design: biometric system architecture. Biometric system design stages: system requirements, system specification, architecture, implementation, deployment, and maintenance. System testing: FAR, FRR, FTE, FTA, curves ROC, DET, CMC, usability, and scalability Sicurezza, vulnerabilità, e privacy di un sistema biometrico: attacchi ad un sistema biometrico, protezione del template (criptosistemi biometrici, "cancelable templates"). Security, vulnerability, and privacy of a biometric system: attacks, privacy enhancing technologies (PETs). Multimodal biometric systems. Biometric Standards. Social, cultural, and legal implications.

### Reference books

Introduction to Biometrics, Anil K. Jain , Arun A. Ross , Karthik Nandakumar , Thomas Swearingen, Springer, 2025. Handbook of Biometrics , A. K. Jain, P. Flynn, A. Ross, Springer, 2007. Handbook of Multibiometrics, A. A. Ross, K. Nandakumar, and Anil K. Jain, Springer, 2006.

### Reference bibliography

Guide to Biometrics, R. M. Bolle , J. H. Connell , S. Pankanti , N. K. Ratha , A. W. Senior , Springer, 2003.

### Study modes

The course is delivered face-to-face

### Exam modes

-

## 20810551 - DEVICES FOR WIRELESS SYSTEMS

**Docente:** PONTI CRISTINA

### Italiano

#### Prerequisiti

Conoscenza dei contenuti dei corsi di Fisica, in particolare dell'elettromagnetismo. Conoscenza dei contenuti del corso di Campi elettromagnetici.

#### Programma

Introduzione ai sistemi wireless: standard e bande di frequenze. Standard per comunicazioni mobili, Wireless LAN e Bluetooth. Standard emergenti in band millimetrica per sistemi wireless indoor ed outdoor. Standard per i sistemi radar. Circuiti Integrati a Microonde (MIC) e Circuiti Integrati a Microonde Monolitici (MMIC). Teoria delle linee di trasmissione e adattamento delle linee. Circuiti integrati in microstriscia: formule di progetto per le linee a microstriscia. Impedenze in microstriscia. Discontinuità in microstriscia. Componenti in microstriscia: componenti due porte; componenti tre porte, componewnti resistivi e divisore Wilkinson; componenti quattro porte, accoppiatori direzionali ibridi, ibrido in quadratura, accoppiatore a linee accoppiate, rat-race. Antenne integrabili nei MIC. Circuiti in tecnologia Substrate Integrated Waveguide (SIW). Progetto di strutture guidanti. Componenti in SIW. Circuiti in tecnologia Gap Waveguide. Realizzazioni della struttura guidante. Componenti in Gap Waveguide. Progetto e simulazione di circuiti a microonde in microstriscia mediante software elettromagnetico. Amplificatori a microonde: stabilità, guadagno e adattamento. Sistemi radar. Radar ad impulsi e radar in frequenza. Architettura dei sistemi radar. Il Ground Penetrating Radar; applicazioni alla localizzazione di oggetti sepolti.

#### Testi

Materiale fornito dal Docente. R.E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, McGraw Hill, 1992. D.M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 1998.

#### Bibliografia di riferimento

-

#### Modalità erogazione

Testi da definire

#### Modalità di valutazione

Prova orale e valutazione di un progetto.

### English

#### Prerequisites

Knowledge of the course of physics, in particular on the topic relevant to electromagnetic fields. Knowledge of the course of Electromagnetic Fields, and in particular of the topics: transmission line theory, theory of guided propagation, waveguides.

#### Programme

Introduction to wireless systems: standards and frequency bands. Standards for mobile communications, wireless LAN, and bluetooth. Emerging standars in the millimeter frequency band for wireless outdoor and indoor links. Applications to wireless power transfer. Standards for radar systems. Microwave Integrated Circuits (MIC) e Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMIC). Transmission line theory and matching techniques. Integrated circuits in microstrip line: technologies and design formulas for microstrip lines. Microstrip impedances. Microstrip components: two ports; three ports, resistive dividers Wilkinson power divider; four ports, directional couples, quadrature hybrid, coupled-line coupler, rat-race. Printed antennas for MIC. Simulation of microstrip components with electromagnetic software. Microwave circuits in Substrate Integrated Waveguide (SIW) for millimeter wave applications. Design of a SIW waveguide. SIW components. Design and simulation of microstrip components through dedicated electromagnetic software. Microwave amplifiers: stability, gain and matching. Radar systems. Radar equation: localization of the target, and radar cross-section evaluation. Pulsed radars and frequency-stepped radar. Radar architecture. The Ground Penetrating Radar; application to buried object detection.

#### Reference books

Material delivered by the teacher. R.E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, McGraw Hill, 1992. D.M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 1998.

#### Reference bibliography

-

#### Study modes

-

### Exam modes

-

## 20810544 - DIGITAL SIGNAL PROCESSING

**Docente:** GIUNTA GAETANO

## Italiano

### Prerequisiti

nessuno

### Programma

Segnali e sistemi discreti. Operazioni lineari e non lineari tra sequenze. Cambiamento di scala dei segnali discreti (interpolazione e decimazione digitali). Trasformate numeriche. Filtraggio. Analisi dei sistemi lineari. Filtri ottimi. Stimatori numerici e loro prestazioni. Predizione. Stimatori spettrali. Applicazioni mobili dell'elaborazione dei segnali. Codifica vocale e video. Software defined radio. Smart antennas. Rivelazione di comunicazioni nascoste. Segnali e codici spread spectrum. Esercitazioni numeriche di laboratorio con la piattaforma MatLab. Ulteriori dettagli su: <https://sp4te.uniroma3.it/elaborazione>

### Testi

G. Giunta, "Problemi di base di elaborazione numerica dei segnali" - IV edizione, Roma (Scaricabili Dal Sito Web Del Corso). Tamal Bose, Francois Meyer, "Digital Signal And Image Processing", December 2003, Wiley Publ. G. Giunta, Lucidi del corso di DSP (Scaricabili Dal Sito Web Del Corso). A.V. Oppenheim, R.W. Shafer, J.R. Buck, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall, Upper Saddle River, Nj (USA), 1999. G. Giunta, Lucidi del corso su Rivelazione e comunicazioni sicure (Scaricabili Dal Sito Web Del Corso).

### Bibliografia di riferimento

A.V. Oppenheim, R.W. Shafer, "Discrete-time signal processing", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (USA), 2010. Joseph Boccuzzi, "Signal processing for wireless communications", McGraw-Hill Professional, 2008.

### Modalità erogazione

lezioni ed esercitazioni

### Modalità di valutazione

orale con scritto preliminare

## English

### Prerequisites

none

### Programme

Discrete signals and systems. Operations between sequences. Scale changes. Digital transforms. Filtering. Linear system analysis. Optimum filters. Digital estimators and performance. Prediction. Spectral estimators. Mobile applications of DSP. Speech and video coding. Software defined radio. Smart antennas. Hidden signal detection. Spread spectrum signals and codes. Laboratory of numerical examples by MatLab platform. Further details at: <https://sp4te.uniroma3.it/elaborazione>

### Reference books

G. Giunta, "Problemi di base di elaborazione numerica dei segnali" - IV edizione, Roma (Available for free downloading). Tamal Bose, Francois Meyer, "Digital Signal And Image Processing", December 2003, Wiley Publ. G. Giunta, Lucidi del corso di DSP (Available for free downloading). A.V. Oppenheim, R.W. Shafer, J.R. Buck, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall, Upper Saddle River, Nj (USA), 1999. G. Giunta, Lucidi del corso su Rivelazione e comunicazioni sicure (Available for free downloading).

### Reference bibliography

A.V. Oppenheim, R.W. Shafer, "Discrete-time signal processing", Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (USA), 2010. Joseph Boccuzzi, "Signal processing for wireless communications", McGraw-Hill Professional, 2008.

### Study modes

lectures and exercises

### Exam modes

-

## 20810552 - ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

**Docente:** BARBUTO MIRKO

## Italiano

### Prerequisiti

• Conoscenze di base di elettromagnetismo e teoria dei circuiti. • Familiarità con l'elaborazione dei segnali e i sistemi di comunicazione (consigliato).

### Programma

Modulo 1: Introduzione alla compatibilità elettromagnetica (EMC) o Definizione, importanza e ambito dell'EMC. o Contesto storico e significato pratico nei sistemi biomedicali e nelle telecomunicazioni. o Richiami sui campi elettromagnetici, la propagazione delle onde e le linee di trasmissione. \_\_\_\_\_ Modulo 2: Fondamenti dell'Interferenza Elettromagnetica (EMI) o Fonti di EMI: naturali e create dall'uomo. o Caratteristiche delle emissioni radiate e condotte. o Crosstalk: meccanismi, impatto ed esempi. \_\_\_\_\_ Modulo 3: Principi di progettazione per l'EMC o Principi generali di progettazione EMC. o Tecniche di schermatura e materiali. o Assorbimento dei campi elettromagnetici. o Strategie di filtraggio, messa a terra e collegamento. \_\_\_\_\_ Modulo 4: Normative e quadri regolatori EMC o Panoramica delle normative EMC. o Enti regolatori principali (internazionali, regionali, specifici per settore) e processo di certificazione. o Normative

principali EMC. \_\_\_\_\_ Modulo 5: Test e Misurazioni EMC o Ambienti di test EMC (camere anecoiche, celle GTEM, ecc.). o Attrezzature per i test (sorgenti, ricevitori, sensori di campo e antenne, analizzatori di spettro, LISN, oscilloscopi, ecc.). o Normative e procedure per i test di emissioni e immunità. o Sfide pratiche nella misurazione delle EMI e nell'assicurare la conformità. \_\_\_\_\_ Modulo 6: Simulazione del accoppiamento elettromagnetico tra sistemi o Introduzione agli strumenti di simulazione circuitale ed elettromagnetica. o Utilizzo di CST MICROWAVE STUDIO per modellare fenomeni EMC e EMI. \_\_\_\_\_ Modulo 7: Nuovi materiali nell'EMC o Introduzione ai metamateriali e alle metasuperfici. o MTM e MTS per EMC. \_\_\_\_\_ Modulo 8: Fondamenti dell'interazione EM con la materia vivente o Fondamenti dell'interazione della materia vivente con i campi elettromagnetici. o Quadro normativo per l'esposizione ai campi elettromagnetici. o Tecniche di misurazione per la valutazione dell'esposizione biologica.

## Testi

Materiale didattico a cura del docente.

## Bibliografia di riferimento

1. Design for Electromagnetic Compatibility - In a Nutshell: Theory and Practice (open access) by Reto B. Keller. 2. Electromagnetic Compatibility Engineering by Henry W. Ott. 3. Introduction to Electromagnetic Compatibility by Clayton R. Paul. 4. EMC for Product Designers by Tim Williams.

## Modalità erogazione

Testi da definire

## Modalità di valutazione

La valutazione prevede una prova scritta composta da due domande sugli argomenti del corso e lo svolgimento di un progetto in itinere.

## English

### Prerequisites

- Basic knowledge of electromagnetics and circuit theory. • Familiarity with signal processing and communication systems (recommended).

### Programme

Module 1: Introduction to EMC o Definition, importance, and scope of EMC. o Historical context and practical significance in biomedical and telecom systems. o Electromagnetic fields, wave propagation, and transmission lines.

\_\_\_\_\_ Module 2: Fundamentals of Electromagnetic Interference (EMI) o Sources of EMI: natural and man-made. o Characteristics of radiated and conducted emissions. o Crosstalk: mechanisms, impact, and examples.

\_\_\_\_\_ Module 3: Design Principles for EMC o General EMC Design Principles. o Shielding techniques and materials. o Absorption of electromagnetic fields. o Filtering, grounding, and bonding strategies.

\_\_\_\_\_ Module 4: EMC standards and regulatory frameworks o Overview of EMC regulations. o Key regulatory bodies (international, regional, industry-specific) and certification process. o Core EMC Standards.

\_\_\_\_\_ Module 5: EMC Testing and Measurement o EMC testing environments (anechoic chambers, GTEM cells, etc.). o Testing equipment (sources, receivers, field sensors and antennas, spectrum analyzers, LISNs, oscilloscopes, etc.). o Standards and procedures for emissions and immunity testing. o Practical challenges in measuring EMI and ensuring compliance.

\_\_\_\_\_ Module 6: Simulation of Electromagnetic Coupling between Systems o Introduction to circuit and electromagnetic simulation tools. o Using CST MICROWAVE STUDIO to model EMC and EMI phenomena.

\_\_\_\_\_ Module 7: Novel Materials in EMC o Introduction to metamaterials and metasurfaces. o MTMs and MTSs for EMC. \_\_\_\_\_ Module 8: Fundamental of Live matter Interaction with EM fields o Fundamentals of live matter interaction with electromagnetic fields. o Regulatory framework for exposure to electromagnetic fields. o Measurement techniques for biological exposure assessment.

### Reference books

Teaching material prepared by the professor.

### Reference bibliography

1. Design for Electromagnetic Compatibility - In a Nutshell: Theory and Practice (open access) by Reto B.Keller. 2. Electromagnetic Compatibility Engineering by Henry W. Ott. 3. Introduction to Electromagnetic Compatibility by Clayton R. Paul. 4. EMC for Product Designers by Tim Williams.

### Study modes

-

### Exam modes

-

## 20810554 - ETHICAL HACKING

**Docente:** CARLI MARCO

## Italiano

### Prerequisiti

Non è richiesta alcuna conoscenza a priori

### Programma

Unità 0 - Richiami Richiami di reti Richiami di programmazione in Python e macchine virtuali Unità 1 - Introduzione all'hacking etico II

concetto di "hacking etico" Valutazione delle vulnerabilità Report e documenti relativi all'hacking etico Unità 2 - Raccolta di informazioni sull'obiettivo dell'hacking Attacchi di scanning Attacchi di sniffing Social engineering Attacchi alle password Unità 3 - Hacking etico mediante attacchi attivi Attacchi web Attacchi di Denial of Service Attacchi wireless Unit 4 - Laboratorio di hacking etico Esercitazioni pratiche riguardanti le diverse unità del corso

### Testi

Baloch Rafay. Ethical hacking and penetration testing guide. Auerbach Publications, 2015.

### Bibliografia di riferimento

Testi da definire

### Modalità erogazione

Lezioni frontali e esercitazioni pratiche

### Modalità di valutazione

La verifica dell'apprendimento avviene attraverso una prova scritta e attività di laboratorio

### English

### Prerequisites

None

### Programme

Unit 0 - Recap Recap on networks Recap on Python programming and virtual machines Unit 1 - Introduction to ethical hacking The "ethical hacking" concept Vulnerability assessment Ethical hacking reports and documents Unit 2 - Target information gathering Scanning Sniffing Social engineering Password hacking Unit 3 - Active ethical hacking Web hacking Denial of Service attacks Wireless hacking Unit 4 - Hands-on ethical hacking Lab experiences concerning the different course units

### Reference books

Baloch Rafay. Ethical hacking and penetration testing guide. Auerbach Publications, 2015.

### Reference bibliography

-

### Study modes

Lectures and laboratory activities

### Exam modes

-

## 20810545 - INFORMATION THEORY

**Docente:** CAMPISI PATRIZIO

### Italiano

### Prerequisiti

Conoscenze di base di Analisi e Geometria

### Programma

Elementi di teoria dell'informazione: entropia di una sorgente, entropia relativa. Entropia congiunta e entropia condizionata. Statistica sufficiente. Codifica di sorgente senza perdita di informazione: Codici ottimi. Limiti sulla lunghezza delle parole di codice per i codici ottimi. Disuguaglianza di Kraft per codici univocamente decodificabili. Codificatori di Huffman e di Shannon-Fano-Elias. Codifica di sorgente Universale. Codificatori aritmetici. Codificatore di Lempel-Ziv. Equivocazione, tasso di informazione mutua, capacità di canale. Capacità dei canali binari simmetrici e dei canali limitati in banda affetti da rumore additivo gaussiano. Teorema di Shannon sulla codifica di canale. Disuguaglianza di Fano. Teorema della separazione tra codifica di sorgente e la codifica di canale. Codici lineari a blocco: definizione, matrice generatrice, controlli di parità, codici sistematici Rivelazione e correzione d'errore per codici lineari a blocco. Sindrome. Codice duale di un codice lineari a blocco. Decodificatore ottimo. Rivelazione e correzione d'errore per canali binari simmetrici. Schieramento standard. Prestazioni. Campi di Galois: definizioni e proprietà. Codici ciclici. Codici di Hamming. Codici di Reed-Solomon. Codici convoluzionali: definizioni e proprietà. Decodifica a massima verosimiglianza: canali binari simmetrici e canali gaussiani Serie di Markov: definizioni e proprietà. Algoritmo di Viterbi: principio, implementazione e prestazioni Algoritmo di Viterbi: prestazioni. Turbocodici: definizioni e principio di funzionamento. Codici concatenati. Codificatori convoluzionali ricorsivi sistematici. Interallacciatori per codici convoluzionali. Calcolo della probabilità a posteriori (AAP) per i turbocodici. Principio di funzionamento dei protocolli ARQ ibridi. Decodificatori per turbo codici: algoritmo di decodifica.

### Testi

Elements of information theory Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, 2. ed., 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

### Bibliografia di riferimento

A Mathematical Theory of Communication By C. E. SHANNON The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

### Modalità erogazione

Testi da definire

## Modalità di valutazione

Durante il corso sono previste prove in itinere atte a valutare la preparazione degli studenti. Sono previste due prove: a) la prima, scritta, atta a valutare la capacità di analisi dello studente b) la seconda, orale, atta a valutare la conoscenza teorica dello studente.

## English

### Prerequisites

Basic knowledge of Analysis and Geometry

### Programme

Elements of information theory: entropy of a source, relative entropy. Joint entropy and conditional entropy. Sufficient statistics. Lossless source coding: Optimal codes. Codeword length limits for optimal codes. Kraft inequality for uniquely decodable codes. Huffman and Shannon-Fano-Elias encoders. Universal source coding. Arithmetic encoders. Lempel-Ziv encoder. Equivocation, mutual information rate, channel capacity. Capacitance of symmetric binary channels and band-limited channels affected by additive gaussian noise. Shannon's theorem on channel coding. Fano inequality. Separation theorem between source coding and channel coding. Linear block codes: definition, generating matrix, parity checks, systematic codes Error detection and correction for linear block codes. Syndrome. Dual code of a linear block code. Excellent decoder. Error detection and correction for symmetric binary channels. Standard deployment. Performance. Galois fields: definitions and properties. Cyclic codes. Hamming codes. Reed-Solomon codes. Convolutional codes: definitions and properties. Maximum likelihood decoding: symmetric binary channels and Gaussian channels Markov series: definitions and properties. Viterbi algorithm: principle, implementation and performance Viterbi algorithm: performance. Turbocodes: definitions and operating principle. Concatenated codes. Systematic recursive convolutional encoders. Interleavers for convolutional codes. Calculation of the posterior probability (AAP) for turbocodes. Operating principle of hybrid ARQ protocols. Turbo code decoders: decoding algorithm.

### Reference books

Elements of information theory Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, 2. ed., 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

### Reference bibliography

A Mathematical Theory of Communication By C. E. SHANNON The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

### Study modes

-

### Exam modes

-

## 20810546 - METAVERSE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**Docente:** CARLI MARCO

## Italiano

### Prerequisiti

Non è richiesta alcuna conoscenza a priori

### Programma

Metaverso Realtà Virtuale Realtà aumentata Realtà Mista Sicurezza ai vari livelli della pila protocollare per applicazioni nel metaverso Controllo degli accessi e della gestione delle blockchain Analisi e rilevazione di modifiche di dati multimediali Applicazioni di intelligenza artificiale nel dominio oggetto dello studio

### Testi

Stallings' Cryptography and Network Security, Seventh Edition Articoli scientifici sull'argomento

### Bibliografia di riferimento

Testi da definire

### Modalità erogazione

Lezioni in aula

### Modalità di valutazione

Prova orale ed eventuale progetto

## English

### Prerequisites

No a priori knowledge required

### Programme

Metaverse Virtual Reality Augmented Reality Mixed Reality Security at the various levels of the protocol stack for applications in the metaverse Authentication systems applied to the metaverse Access control and blockchain management Artificial intelligence applications in the domain under study

### Reference books

Stallings' Cryptography and Network Security, Seventh Edition Scientific articles on the topic

## Reference bibliography

-

## Study modes

Lectures

## Exam modes

-

## 20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS

( 5G COMMUNICATIONS AND BEYOND )

**Docente:** GIUNTA GAETANO

## Italiano

### Prerequisiti

nessuno

### Programma

Le reti mobili condivise. Strutturazione delle reti e dei servizi e loro motivazioni economiche e finanziarie. I sistemi mobili cellulari di nuova generazione (4G, 5G). Servizi offerti e qualità di servizio. Gestione della mobilità e problematiche di sicurezza, confidenzialità e autenticazione. Servizi di localizzazione. Controllo energetico dei dispositivi connessi. Tecnologie di accesso alla rete internet mediante dispositivi wireless. Evoluzione delle architetture di rete virtualizzate e riconfigurabili via SW. Tecniche di elaborazione parallela che consentono un collegamento efficiente e dedicato negli standard più moderni (5G e oltre) con e tra i terminali e gli oggetti connessi nell'loT. Maggiori dettagli sul sito: <https://sp4te.uniroma3.it/radiomobile>

### Testi

G. Giunta, Lucidi del corso. (Scaricabili Dal Sito Web Del Corso)

### Bibliografia di riferimento

Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker: "LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, 2nd Edition", Wiley publ.; July 2011. Mansoor Shafi, Andreas F. Molisch, Peter J. Smith, Thomas Haustein, Peiyong Zhu, PrasanDeSilva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour, and Gerhard Wunder: "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 35, NO. 6, JUNE 2017. Mamta Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena: "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 3, THIRD QUARTER 2016.

### Modalità erogazione

lezioni

### Modalità di valutazione

discussione orale

## English

### Prerequisites

none

### Programme

Mobile networks with shared access. Networks and services plans, including financial and economic aspects. New generation mobile networks (4G, 5G). Provided services and quality of service. Mobility management, security, secrecy and authentication problems. Localization services, power control of connected devices. Access technologies from wireless devices. Evolution of architecture based on SW network virtualization. Algorithms of array processing to allow dedicated efficient links in modern standards (5G and beyond) between terminals or smart objects connected to the loT world. Further details on the site: <https://sp4te.uniroma3.it/radiomobile>

### Reference books

G. Giunta, Lucidi del corso. (Available for free downloading)

### Reference bibliography

Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker: "LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, 2nd Edition", Wiley publ.; July 2011. Mansoor Shafi, Andreas F. Molisch, Peter J. Smith, Thomas Haustein, Peiyong Zhu, PrasanDeSilva, Fredrik Tufvesson, Anass Benjebbour, and Gerhard Wunder: "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 35, NO. 6, JUNE 2017. Mamta Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena: "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 3, THIRD QUARTER 2016.

### Study modes

lectures

### Exam modes

-

## 20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS

**Docente:** GIUNTA GAETANO

### Italiano

#### Prerequisiti

#### Programma

Testi da definire

#### Testi

Testi da definire

#### Bibliografia di riferimento

Testi da definire

#### Modalità erogazione

Testi da definire

#### Modalità di valutazione

Testi da definire

### English

#### Prerequisites

#### Programme

-

#### Reference books

-

#### Reference bibliography

-

#### Study modes

-

#### Exam modes

-

## 20810550 - NEW GENERATION MOBILE SYSTEMS

( *DIGITAL COMMUNICATIONS* )

**Docente:** VEGNI ANNA MARIA

### Italiano

#### Prerequisiti

nessuno none

#### Programma

Il corso introduce gli aspetti fondamentali delle modalità di trasmissione dell'informazione su canali digitali, anche in riferimento ai sistemi emergenti Beyond5G (B5G). A partire dai concetti acquisiti precedentemente, relativi alla teoria dei segnali, in questo corso vengono presentate le principali tecniche di modulazione in banda base e passa-banda, la teoria del ricevitore ottimo, le tecniche di trasmissione a banda larga, e il modello di attenuazione (fading) sul canale wireless trasmissivo. Gli obiettivi del corso prevedono che gli studenti acquisiscano (i) gli aspetti fondamentali delle tecniche di trasmissione dati su collegamenti digitali, anche in scenari emergenti B5G, e (ii) l'abilità di applicare tale conoscenza per la modellizzazione di canali wireless per gli scenari applicativi di prossima generazione.

#### Testi

- roakis, "Digital communications" - Dispense a cura del docente

#### Bibliografia di riferimento

Testi da definire

#### Modalità erogazione

Testi da definire

#### Modalità di valutazione

Il corso prevede una prova orale

### English

## Prerequisites

none

## Programme

The course introduces the fundamental aspects of information transmission methods on digital channels, also in reference to the recent 5G and B5G communication systems. Starting from the concepts previously acquired, related to signal theory, this course presents the main baseband and bandpass modulation techniques, the theory of the optimal receiver, the broadband transmission techniques, and the fading channels. The objectives of the course are that students acquire (i) the fundamental aspects of data transmission techniques on digital links, also in emerging Beyond5G (B5G) scenarios, and (ii) the ability to apply analytical tools to design channel models for next-generation application scenarios.

## Reference books

- Proakis, "Digital communications" - Notes edited by the lecturer

## Reference bibliography

-

## Study modes

-

## Exam modes

-

## 20810553 - WIRELESS NETWORKING AND IOT

**Docente:** VEGNI ANNA MARIA

### Italiano

#### Prerequisiti

nessuno none

#### Programma

Il corso introduce gli aspetti fondamentali delle reti di comunicazioni wireless di tipo device-to-device (D2D) e introduce le nuove tecnologie emergenti per sistemi di comunicazione avanzati. Gli obiettivi del corso prevedono che gli studenti acquisiscano (i) la conoscenza necessaria sulle tecnologie di comunicazione mobili e wireless, anche in scenari emergenti Beyond5G (B5G), e (ii) l'abilità di applicare tale conoscenza per lo sviluppo di servizi per gli scenari applicativi di tipo Internet of Things (IoT). Particolare attenzione viene posta alla tecnologia WiFi, alle comunicazioni D2D e alle tecnologie emergenti in scenari B5G (nello specifico, si studierà la tecnologia Visible Light Communications per applicazioni indoor e Free Space Optics per applicazioni outdoor).

#### Testi

- Kurose and Ross, "Computer Networking: a top-down approach" - S. Montagny, "LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners" - Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications - System and Channel Modelling with MATLAB®", Taylor and Francis - R. Herrero, "Fundamentals of IoT Communication Technologies", Springer - slides a cura del docente

#### Bibliografia di riferimento

- slides a cura del docente

#### Modalità erogazione

Testi da definire

#### Modalità di valutazione

Il corso prevede una prova orale

### English

#### Prerequisites

none

#### Programme

The course introduces the fundamental aspects of device-to-device (D2D) wireless communications networks and new emerging technologies for advanced wireless communication systems. The main objectives require students to acquire (i) the necessary knowledge on mobile and wireless communication technologies, including Beyond5G (B5G) technologies, and (ii) the ability to apply this knowledge for the development of services for Internet of Things (IoT) type application scenarios. Particular attention is paid to WiFi technology, D2D communications and emerging technologies in B5G scenarios (specifically, Visible Light Communications technology for indoor applications and Free Space Optics for outdoor applications will be studied).

#### Reference books

- Kurose and Ross, "Computer Networking: a top-down approach" - S. Montagny, "LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners" - Z. Ghassemlooy, W. Popoola, S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications - System and Channel Modelling with MATLAB®", Taylor and Francis - R. Herrero, "Fundamentals of IoT Communication Technologies", Springer - notes edited by the lecturer

#### Reference bibliography



- notes edited by the lecturer

**Study modes**

-

**Exam modes**

-