
Testi del Syllabus

Docente	SERENA PAOLO	Matricola: 006228
Anno offerta:	2013/2014	
Insegnamento:	1005256 - OPTICAL COMMUNICATIONS	
Corso di studio:	5052 - COMMUNICATION ENGINEERING - INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI	
Anno regolamento:	2012	
CFU:	9	
Settore:	ING-INF/03	
Tipo attività:	B - Caratterizzante	
Partizione studenti:	-	
Anno corso:	2	
Periodo:	Secondo Semestre	



Testi in italiano

Tipo testo

Testo

Lingua insegnamento

Inglese

Contenuti

Introduzione, motivazioni e stato dell'arte.
Richiami sulla propagazione in fibra ottica singolo modo.
Dispersione di velocità di gruppo.
Trasmettitori ottici.
Amplificatori ottici.
Principi di fotorivelazione.
Calcolo delle prestazioni.
Equazione di propagazione non lineare di Schroedinger.
Propagazione in regime non lineare.
Self phase modulation.
Cross phase modulation.
Four wave mixing.
Propagazione in regime solitonico.
Effetto Raman.
Parametric gain ed instabilità di modulazione.
Dispersione modale di polarizzazione e suoi formalismi.
Formati di modulazione avanzati e ricezione ottica coerente.

Testi di riferimento

Parte del corso è annotata in opportune dispense.

Si consiglia la lettura dei testi:

G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication Systems", 3rd ed., Wiley, 2002;

G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press

Ulteriori articoli scientifici verranno segnalati durante il corso.

Obiettivi formativi

Il corso si propone di fornire i principali strumenti per l'analisi, la comprensione e la progettazione dei moderni sistemi di comunicazione in fibra ottica. In particolare ci si propone di far comprendere allo studente i seguenti argomenti:

- gli effetti lineari in una fibra ottica.
- gli effetti non lineari in una fibra ottica.
- studio della trasmissione/amplificazione/ricezione di un segnale ottico.
- i principi della simulazione numerica di un collegamento in fibra ottica.

Le capacità di applicare le conoscenze e comprensione elencate risultano essere in particolare utili per:

- analizzare le distorsioni di un collegamento ottico.
- analizzare le principali cause di rumore ai fini del calcolo della probabilità di errore di un sistema digitale ottico.
- individuare le principali strategie di risoluzioni dei problemi di distorsione.
- modellizzare il canale ottico in diverse casistiche.
- essere in grado di scrivere un software numerico per la simulazione di un collegamento ottico.

Prerequisiti

si suggeriscono conoscenze di base di trasmissione numerica, elaborazione numerica dei segnali

Metodi didattici

le lezioni verranno svolte prevalentemente alla lavagna ma anche con l'utilizzo di video-proiettore. In particolare verranno mostrati alcuni esempi di simulazione numerica.

Tipo testo

Testo

Altre informazioni

nel corso verrà utilizzato un simulatore numerico di collegamenti ottici

Modalità di verifica dell'apprendimento

la prova d'esame consiste in una prova orale e in una tesina individuale (4 pagine) su un progetto da effettuare tramite simulazione numerica di un sistema ottico. La tesina è valutata in base alla correttezza, completezza, chiarezza di esposizione, riferimenti bibliografici.

Programma esteso

Introduzione, presentazione del corso. Breve storia delle comunicazioni ottiche. Ottica a raggi: postulati. Legge di Snell. Riflessione totale. Apertura numerica di una fibra ottica. Problematiche delle fibre multimodo.

Richiami sulle fibre singolo modo. V number. Dipendenza del V number dalla lunghezza d'onda. Dipendenza del profilo di campo elettrico dal V number. Approccio sistemistico alla fibra ottica. Costante di propagazione beta. Dispersione di Materiale e di guida d'onda. Fibre DSF e DCF. Dispersione di velocità di gruppo (GVD).

Equazioni di Maxwell. Dimostrazione rigorosa della GVD.

Attenuazione. Ritardo di gruppo. Impatto della GVD su di un impulso Gaussiano. Lunghezza di dispersione. Dispersione anomala e normale. Impatto di un chirp sulla GVD. Interpretazione del miglior chirp tramite il principio di Heisenberg. GVD come matched filter. Frequenza istantanea di GVD. Dispersione di terzo ordine.

Eye closure penalty (ECP) indotta dalla GVD. Formula di Chen. Trasformata di Fourier indotta dalla GVD dopo lunga distanza. Sequenze de Bruijn. Memoria della GVD.

Amplificatore ottico. Cross sections di assorbimento ed emissione. Equazione di propagazione del flusso di fotoni in z. Equazione di bilancio (rate equation). Reservoir. Visione sistemistica del reservoir. Guadagno ai piccoli segnali. Saturazione del guadagno. Rumore di emissione spontanea (ASE). Densità spettrale di potenza dell'ASE.

Cifra di rumore di un amplificatore ottico. Formula di Friis. Amplificazione dual stage: calcolo della cifra di rumore.

Fotoricevitori: fotodiodo. Efficienza quantica. Responsivity. Ragioni della foto-corrente: cariche generate nella regione di svuotamento. Giunzione P-i-n. Capacità parassite del fotodiodo e banda. Fotodiodo a valanga (APD).

Statistiche di Poisson. Processo di conteggio di Poisson. Shot noise. Teorema di Campbell e dimostrazione. Densità spettrale di potenza dello shot noise. Caso APD. Ricevitori ottici. Front end elettronici a bassa impedenza, alta impedenza, transimpedenza. Calcolo della probabilità di errore (BER) in un sistema ottico on-off keying (OOK). Quantum limit. Potenza di sensitivity. Impatto del rumore termico sulla BER.

Approssimazione gaussiana della BER. Rumore termico. Approssimazione gaussiana con fotodiodi APD. Valore ottimo della moltiplicazione a valanga in APD. Power budget. Legame Sensitivity penalty e Eye closure penalty (ECP). Caso con GVD.

Esercizio sul calcolo del chirp dalla sensitivity penalty. Ricevitori pre-amplificati. Rumore di battimento segnale-spontaneo, spontaneo-spontaneo. Approssimazione gaussiana del battimento spontaneo-spontaneo. Formulad di Isserlis. Calcolo della BER con formula di Personick. Confronto varianza shot-noise, rumore termico, battimento segnale-spontaneo.

Confronto rumore segnale-spontaneo, spontaneo-spontaneo. Formula di

Tipo testo

Testo

Marcuse. Ricevitori Pre-amplificati: confronto con quantum limit. Esercizi.

Metodo di Bergano per la misura del Q-factor.

Catene di amplificatori: misura della cifra di rumore. OSNR budget. Amplificazione distribuita.

Equazione non lineare di Schroedinger (NLSE). Ragioni della non linearità cubica. Self Phase Modulation (SPM). Confronto tra la visione nel tempo del SPM e la visione in frequenza della GVD.

SPM: caso di segnale sinusoidale. Allargamento di banda indotto dal SPM. Wave breaking (WB) . Impatto del SPM e della GVD sul chirp di un impulso Gaussiano.

Catene di amplificatori: limitazioni imposte dalla non linearità e dal rumore ASE. Catene disomogenee. Metodo dei moltiplicatori di Lagrange.

Solitoni. Dimostrazione del solitone fondamentale. Proprietà di scalatura dei solitoni. Solitoni di ordine superiore. Perturbazione dei solitoni: energia del continuo.

Dark solitons (cenni). Esempi numerici di propagazione solitonica: solitone di ordine 3, dark soliton, effetto del chirp, effetto della presenza di solitoni vicini.

Solitoni in sistemi amplificati. effetto del rumore ASE sui solitoni: sliding filters. Solitoni: da unità adimensionali a unità dimensionali.

Sistemi wavelength division multiplexing (WDM). NLSE a campi separati. Cross-phase modulation (XPM) e four wave mixing (FWM). GVD intra-canale e inter-canale. XPM in assenza di GVD intra-canale: soluzione in un sistema pompa/segnale.

Filtro di XPM per singola fibra. Coefficiente di walk-off. Banda 3dB del filtro di XPM.

Filtro di XPM per sistemi multi-span in assenza di GVD intra-canale. Filtro di XPM in presenza di GVD intra-canale. Modello ai piccoli segnali della GVD. Risultati numerici di filtri di XPM. Esempio di applicazione in sistema ibrido OOK/DQPSK.

Algoritmo di split-step Fourier method (SSFM). Soluzione formale con operatori. Non commutatività degli operatori. SSFM asimmetrico e simmetrico. Scelta del passo: passo costante, metodo della fase non lineare, metodo dell'errore locale stimato. Estrapolazione di Richardson.

Linguaggio Matlab. Linguaggio di programmazione Optilux.

Software Optilux: ulteriori esempi. Note su come si scrive un articolo scientifico.

Esercizio: confronto costo propagazione a campi separati e a campo unico.

Four wave mixing (FWM). Analisi perturbativa della NLSE. Campo di FWM con segnali CW. Efficienza di FWM. Coefficiente di phase matching.

Analisi della distorsione non lineare come rumore distribuito gaussiano. Potenza di soglia.

Ulteriori proprietà dell'SNR non lineare.

Modulation instability. Optical parametric amplifier (OPA). Banda e frequenza di massimo guadagno di un OPA. Rumore negli OPA. Cenni sugli OPA a due pompe.

Tipo testo

Testo

Polarizzazione della luce. Formalismo di Jones e di Stokes. Polarimetro. Sfera di Poincarè. Grado di polarizzazione (DOP). Ellissi di polarizzazione.

Equazione di moto della polarizzazione lungo la distanza. Fibre polarization maintaining fiber (PMF). Matrici hermitiane. Matrici unitarie. Equazione di moto nello spazio di Stokes. Formalismo di Pauli. Matrice di Mueller.

Polarization mode dispersion (PMD): PMD al primo ordine. Stati principali di polarizzazione (PSP). Corrente ricevuta con PMD al primo ordine.

Amplificazione Raman. Memoria introdotta dall'effetto Raman. SPM, XPM e FWM in presenza di Raman. XPM risonante Raman. Amplificazione Raman nel caso pompa-segnale.

Formati di modulazione avanzati: motivazioni. Modulatore di fase e Mach Zehnder (MZ). Impulsi return to zero (RZ) e varianti (carrier-suppressed (CS-RZ), chirped-RZ (CRZ), alternate phase-RZ (APRZ)). Duobinario. Differential phase shift keying (DPSK). Generazione e ricezione di un segnale DPSK. Rumore di fase non lineare. Differential quadrature phase shift keying (DQPSK). Generazione di M-ary PSK.

Ricezione coerente. Motivazioni. Introduzione storica. Optical hybrid. Recupero della parte in fase e quadratura di un segnale passabanda. Polarization division multiplexing (PDM). Polarization diversity receiver. Digital signal processing (DSP). Analog to digital conversion ADC: scelta del numero di campioni per simbolo. Compensazione elettronica della GVD. Compensazione elettronica della PMD: constant modulus algorithm (CMA). Stima di fase: algoritmo di Viterbi & Viterbi. Risultati numerici e sperimentali. PMD in regime non lineare. Cross polarization modulation (XpolM). Nonlinear threshold (NLT) di link ottici. Algoritmo di digital back-propagation (DBP). Polarization switched quadrature phase shift keying (PS-QPSK).



Testi in inglese

Tipo testo

Testo

Lingua insegnamento

English

Contenuti

Introduction, motivations, state of the art.
Brief introduction of single mode fibers.
Group velocity dispersion.
Optical Transmitters.
Optical Amplifiers.
Principles of Photodetection.
Performance Evaluation.
Nonlinear Schroedinger Equation.
Self phase modulation.
Cross phase modulation.
Four wave mixing.
Optical Solitons.
Raman Effect.
Parametric gain and modulation instability.
Polarization Mode Dispersion.
Advanced modulation formats and optical coherent detection.

Testi di riferimento

Part of the course is written in lecture notes.

Reading of the following books is suggested:

G. P. Agrawal, "Fiber-optic communication Systems", 3rd ed., Wiley, 2002;

G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press

Further scientific papers will be indicated during the course.

Obiettivi formativi

The course aims to provide the main tools to analyze and design modern optical communication systems. Strictly speaking, the course would like to give knowledge and understanding about:

- linear effects in an optical fiber.
- nonlinear effects in an optical fiber.
- investigation of the trasmission/amplification/detection of an optical signal.
- the basic principles of a numerical simulation of an optical link.

Applying the knowledge and the understanding mentioned above, the student should be able to:

- analyze the main distortions of an optical link.
- analyze the main sources of noise that impact the bit error rate of an optical digital transmission.
- find strategies to cope with the distortions
- describe the optical channel by theoretical models in different cases.
- write a numerical algorithm simulating the propagation of a signal within an optical fiber.

Prerequisiti

suggested basic knowledge of Digital Communications and Signal Processing.

Metodi didattici

Lessons mainly with blackboard but also by a video projector. In particular, some examples of numerical simulation will be provided.

Tipo testo

Testo

Altre informazioni

During the course a numerical simulator of optical links will be introduced

Modalità di verifica dell'apprendimento

The exam consists in an oral examination and in an individual project (4 pages) regarding the study of an optical link by simulation. The project is evaluated in terms of correctness, completeness, clarity of exposition, bibliography.

Programma esteso

Lecture 1

Introduction, presentation of the course, motivations. Brief history of optical communications.

Lecture 2

Ray optics. Fermat's principle. Snell's law. Total reflection. Numerical aperture of an optical fiber. Multi-mode fibers. Problems of multi-mode fibers. Single-mode fibers (overview). V-number (overview). Systems theory approach to the optical fiber. Phase delay and group delay. Group velocity dispersion (GVD). Propagation constant β . Delay between two frequencies induced by GVD. Conversion from β^2 to dispersion coefficient D .

Lecture 3

GVD: examples. Waveguide and material dispersion. Rigorous proof of GVD using Maxwell's equations.

Lecture 4

Attenuation. Group delay. Impact of GVD over a Gaussian pulse. Dispersion length. Anomalous and normal dispersion. GVD in presence of signal's chirp. Instantaneous frequency.

Lecture 5

GVD in presence of signal chirp. Best chirp using Heisenberg's principle. Matched filter interpretation of GVD with chirp. Third order dispersion. Eye closure penalty in presence of GVD.

Lecture 6

Chen's formula for the GVD induced eye closure penalty. Fourier transform induced by strong GVD. de Bruijn sequences. Memory of GVD.

Lecture 7

Erbium doped fiber amplifier (EDFA). Cross sections. Propagation equation for the photon flux over distance. Rate equation in time. Reservoir. State model interpretation of reservoir. Small signal gain. Gain saturation.

Lecture 8

Propagation equation with gain saturation. Fixed output power of an EDFA in saturation. Reservoir dynamics with modulated signals. Amplified spontaneous emission (ASE) noise. Noise figure of an EDFA: definition.

Lecture 9

Friis's formula. Excess noise figure. Dual stage amplification: evaluation of noise figure.

Tipo testo

Testo

Photo-detectors: photo-diode. Quantum efficiency. Responsivity. Reasons for photo-current: electron-holes contributions to current. P-i-n junction. Junction capacity. Photo-diode bandwidth.

Lecture 10

Avalanche photo-diode (APD).

Poisson statistics. Poisson counting process. Shot noise. Campbell's theorem with proof. Power spectral density (PSD) of shot noise. PSD with APD.

Notes: details can be found in [Alberto].

Supplementary reading: An alternative proof of Campbell's theorem can be found in [Saleh].

Lecture 11

Optical receivers. Matched filter. Amplifiers for the photo-current: low impedance, high impedance, trans-impedance. Bit error rate (BER) for on-off keying (OOK) transmission. Quantum limit. Sensitivity power. Thermal noise. Gaussian approximation and Personick's formula.

Lecture 12

Gaussian approximation. Q-factor. Gaussian approximation with APD. Optimal multiplication factor with APD. Power budget.

Lecture 13

Relation between Sensitivity penalty and Eye closure penalty for PIN and APD. Case with GVD using Chen's formula. Exercise regarding the amount of chirp yielding a given sensitivity penalty. Pre-amplified receivers. Signal to spontaneous and spontaneous to spontaneous noise beat.

Lecture 14

BER with ASE noise: Gaussian approximation. Isserlis's formula. Average and variance of signal/spontaneous, spontaneous/spontaneous, shot, thermal noise. Comparison of noise variances.

Lecture 15

Optical signal to noise ratio (OSNR). Comparison signal/spontaneous, spontaneous/spontaneous. Marcuse's formula. Pre-amplified receivers: comparison with quantum limit. Exercises.

Bergano's method to estimate BER. Threshold error using the Gaussian approximation.

Lecture 16

Nonlinear Schroedinger equation (NLSE). Reasons for the cubic nonlinear effect. Self Phase Modulation (SPM). Comparison between temporal interpretation of SPM and frequency interpretation of GVD.

Lecture 17

Comparison between temporal interpretation of SPM and frequency interpretation of GVD. SPM with sinusoidal power. Bandwidth enlargement induced by SPM. Wave breaking (WB). Impact of chirp induced by SPM and GVD over a Gaussian pulse.

Tipo testo

Testo

Lecture 18

Noise figure of optical amplifiers measured in the electrical domain. OSNR budget. Distributed amplification. Amplifier chains: limitations of ASE noise and nonlinear Kerr effect. Inhomogeneous amplifier chains. Lagrange multipliers method.

Lecture 19

Best amplifiers gain in inhomogeneous chains.

Solitons. Proof of fundamental soliton. Higher order solitons. Notes on Dark solitons.

Lecture 20

Solitons: from dimensionless to standard units. Collision length and symbol rate of solitons. Scaling laws of solitons. Perturbation of solitons: solitons of non-integer order, impact of chirp. Solitons in amplified systems: impact of losses. Notes on impact of ASE noise: sliding filters.

Lecture 21

Numerical examples of soliton propagation: 3rd order soliton, dark soliton, soliton of non-integer order, interaction of solitons.

Wavelength division multiplexing (WDM) systems. NLSE with separate fields. Cross-phase modulation (XPM) and four wave mixing (FWM). Intra- and inter-channel GVD.

Lecture 22

XPM with inter-channel GVD: probe/pump case. XPM filter for single fiber. Walk-off coefficient. Bandwidth of XPM filter.

Small-signal model of GVD.

Lecture 23

XPM filter for multi-span systems in absence of intra-channel GVD. XPM filter with intra-channel GVD. Numerical results. Example: hybrid OOK/DQPSK system.

Split-step Fourier method (SSFM). Formal solution using operators.

Lecture 24

Non commutative operators. SSFM with symmetrized and asymmetric step: accuracy. Choice of the step: constant step, step based on the nonlinear phase criterion, step based on the local error. Richardson extrapolation.

Lecture 25

local error method: choice of the step size. Block diagram of the local error method.

The Matlab programming language.

Lecture 26

Software Optilux. Examples. Discretization of a signal in the time and frequency domain.

Lecture 27

Tipo testo

Testo

Pills on how to write a scientific report.

Unique and separate fields: numerical cost comparison.

Four wave mixing (FWM). Regular perturbation (RP) method to approximate the solution of the NLSE.

Lecture 28

FWM with CW signals. FWM efficiency. Phase matching coefficient.

Gaussian Nonlinear (GN) model. Best power using the GN model.

Lecture 29

Application of the GN model: best SNR, scaling of SNR. Exercise: getting the entire SNR curve by two measurements. Constrained performance: scaling of nonlinear asymptote with the number of spans.

From SSFM to the first order perturbation model.

Modulation instability (MI): linearized NLSE.

Lecture 30

Modulation instability: solution in absence of attenuation. Eigenvalues of MI.

Optical parametric amplifier (OPA). Bandwidth and frequency of maximum gain of an OPA. Two pumps OPA. Quantum noise in an OPA.

Lecture 31

Noise figure of an OPA.

Raman amplification. Motivations (distributed amplification, co- and counter-propagating pump). Memory induced by Raman effect. SPM, XPM and FWM in presence of Raman. Raman impact on XPM. Raman amplification: pump-signal case.

Lecture 32

Notes on the amplified spontaneous Raman scattering and Rayleigh back scattering.

Polarization of light. Birefringence. Jones formalism. Ellipse of polarization. Polarimeter.

Lecture 33

Stokes space. Poincaré sphere. Degree of polarization (DOP). Input/output relation with birefringence. Unitary matrices. Local behavior of birefringence. Hermitian matrices. Eigenvalues and eigenvectors of Hermitian matrices.

Lecture 34

Polarization mode dispersion (PMD). Motion in omega. Differential group delay (DGD). First order PMD.

Manakov equation. Cross polarization modulation (XPoIM). Memoryless XPoIM.

Lecture 35

Advanced modulation formats: motivations. Phase modulator and Mach

Tipo testo

Testo

Zehnder (MZ) modulator. Return to zero(RZ) pulses and its variants (carrier-suppressed (CS-RZ), chirped-RZ (CRZ), alternate phase-RZ (APRZ)). Duobinary transmission. Differential phase shift keying (DPSK). Generation and detection of DPSK. Nonlinear phase noise. Differential quadrature phase shift keying (DQPSK). Generation of M-ary PSK.

Lecture 36

Coherent detection: motivations. Historical background. Optical hybrid. Detection of in-phase and quadrature components. Polarization division multiplexing (PDM). Polarization diversity receiver. Digital signal processing (DSP). Analog to digital conversion (ADC): choice of the number of samples per symbols. Electronic dispersion compensation of GVD. Electronic dispersion compensation of PMD: constant modulus algorithm (CMA). Phase estimation: Viterbi & Viterbi algorithm. Numerical and experimental results. Interaction of PMD and nonlinear Kerr effect. Cross polarization modulation (XpolM): impact of channel walk-off. Nonlinear threshold (NLT) of optical links. Digital back-propagation (DBP) algorithm. Polarization switched quadrature phase shift keying (PS-QPSK).