

# Testi del Syllabus

Resp. Did.	VANNUCCI Armando	Matricola: 005220
Anno offerta:	2015/2016	
Insegnamento:	1005258 - POLARIZED FIBER OPTIC TRANSMISSION	
Corso di studio:	5052 - COMMUNICATION ENGINEERING - INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI	
Anno regolamento:	2015	
CFU:	6	
Settore:	ING-INF/03	
Tipo Attività:	B - Caratterizzante	
Anno corso:	1	
Periodo:	Secondo Semestre	
Sede:	PARMA	

**Please skip to page 5  
for the Course Syllabus in English**



## Testi in italiano

<b>Lingua insegnamento</b>	Inglese
<b>Contenuti</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- La polarizzazione della luce.</li><li>- Propagazione di luce polarizzata in fibra ottica.</li><li>- La Dispersione Modale di Polarizzazione (PMD) e tecniche di compensazione della PMD.</li><li>- Formalismi per la rappresentazione di segnali ottici polarizzati e di sistemi ottici sensibili alla polarizzazione.</li></ul>
<b>Testi di riferimento</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Alberto Bononi, Armando Vannucci, "PMD: a Math Primer", rapporto tecnico 14 luglio 2001, rev. 18/12/2008, disponibile presso il centro copie.</li><li>- Andrea Galtarossa, Curtis R. Menyuk, (Eds.), "Polarization Mode Dispersion", Ed. Springer (New York, USA), 2005, ISBN-10: 0-387-23193-5.</li><li>- Jay N. Damask, "Polarization Optics in Telecommunications", Ed. Springer (New York, USA), 2005, ISBN: 0-387-22493-9.</li></ul>
<b>Obiettivi formativi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Conoscenza di tecniche e formalismi per rappresentare la polarizzazione della luce.</li><li>- Comprensione della propagazione lineare in fibra ottica, con particolare riguardo ai fenomeni legati alla polarizzazione della luce.</li><li>- Capacità di applicare gli strumenti matematico/geometrici per descrivere la polarizzazione della luce, nelle telecomunicazioni e in altri contesti tecnologici.</li><li>- Capacità di applicare le tecniche di propagazione della luce polarizzata per valutare distorsioni e penalità nei sistemi telecom.</li></ul>
<b>Metodi didattici</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- lezioni frontali (36h), erogate dal docente con ausilio di lavagna e proiettore/PC (per applicazioni software, figure, pagine web)</li><li>- laboratorio di simulazione (4h), con utilizzo del software di simulazione Optilux (open source, Università di Parma) per la propagazione di segnali in fibra ottica.</li><li>- laboratorio di misure (2h), con utilizzo di strumenti e dispositivi hardware.</li></ul>
<b>Altre informazioni</b>	Materiale e informazioni per il corso disponibili su piattaforma di web-learning Elly/Moodle ( <a href="http://elly.dii.unipr.it/2015/course/view.php?id=48">http://elly.dii.unipr.it/2015/course/view.php?id=48</a> )

## Modalità di verifica dell'apprendimento

esame orale:

colloquio con verifica dell'apprendimento e della capacità analitica ed espositiva degli argomenti esposti durante le lezioni del corso.

Si prevede un test a risposte multiple come prova intermedia, durante la 'sessione primaverile' (appena dopo le vacanze pasquali).

## Programma esteso

Di seguito, i contenuti dettagliati di ogni singola lezione (un asterisco precede alcune 'parole-chiave' del corso):

PFOT-lez.01: Generalità, riferimenti bibliografici, modalità didattiche e di esame, programma.

\*La polarizzazione della luce.

Utilizzo della polarizzazione EM nelle comunicazioni radio e ottiche (cenni).

Evoluzione storica della trasmissione in fibra ottica nell'ultimo trentennio (brevi cenni): velocità di trasmissione, principali impedimenti e tecnologie abilitanti.

PFOT-lez.02: Approssimazione di onda planare uniforme (TEM). Rappresentazione vettoriale del campo elettromagnetico (EM) (cenni): frequenze ottiche, banda ottica e inviluppo complesso.

Rappresentazione della polarizzazione: caso di onda monocromatica continua (CW). Curve di Lissajous.

\*Vettori di Jones e ellissi di polarizzazione:

forma implicita e parametrica; sfasamento "phi"; casi degeneri; Verso di percorrenza: polarizzazioni destrorse e sinistrorse; convenzioni.

PFOT-lez.03: Stati di polarizzazione (SOP) notevoli: LH, LV, L+45, L-45, RHC, LHC; versori di Jones ed angoli ( $\chi$ ,  $\phi$ ) corrispondenti. Prodotto interno in C2: norma, ortogonalità. Polarizzazioni più generali: SOP lineari e SOP ellittici ad azimuth nullo.

\*Ortonormalità tra stati di polarizzazione.

Azimuth ed ellitticità di un SOP: formalismo ( $\theta$ ,  $\epsilon$ ).

Programma "Polarization Tutor" (HP): uso e riscontro dei risultati teorici.

PFOT-lez.04: \*Propagazione di luce polarizzata in fibra ottica.

La fibra come sistema MIMO (2x2): matrice di trasferimento. Approccio ingegneristico al "sistema-fibra". Ritardo: variazioni dell'indice di rifrazione; dispersione cromatica e birifrangenza; cause. Attenuazione (Loss): misura in dB. Risultati sperimentali sull'attenuazione: dipendenza lineare dalla lunghezza; finestre di propagazione ed evoluzione storica; indipendenza dal SOP.

\*Cenni su Polarization Dependent Gain/Loss (PDG/PDL):

amplificatori ottici.

PFOT-lez.05: Matrice di trasferimento della fibra con perdite e "birifrangenza".

Propagazione in "fibra omogenea con birifrangenza H/V" ( $\beta$  diagonale): esempio monocromatico con SOP in diagonale. Evoluzione del SOP:

\*Lunghezza di battimento.

Autostati di polarizzazione (fibra omogenea H/V).

\*La Dispersione Modale di Polarizzazione (PMD):

allargamento dell'impulso e interferenza intersimbolica.

\*Ritardo di Gruppo Differenziale (DGD).

Assi di birifrangenza (e "forza" della birifrangenza). Generalizzazione dei risultati per qualunque fibra omogenea.

Fattorizzazione delle perdite: matrice lossless di trasferimento: matrice aggiunta; unitarietà.

PFOT-lez.06: Approcci alla propagazione ottica: ottica geometrica, ondulatoria, equazioni di Maxwell, quantistica. Esempi di applicazione. Approccio fisico alla trasmissione ottica: eq. di Maxwell e relazioni costitutive dei materiali. Caso della silice (SiO<sub>2</sub>): struttura e forme aggregative. Operatori differenziali ("nabla") e proprietà vettoriali. Eq. di Helmholtz: onda planare uniforme (TEM) e soluzione monocromatica; fronti d'onda. Suscettività dielettrica nelle fibre ottiche: assunzioni fisiche e rivolti matematici; peculiarità del corso PFOT (matrice disomogenea vs scalare omogeneo).

PFOT-lez.07: Formulazione del dominio "omega", con campi modulati "in banda stretta" (involuppo compelsso). Ipotesi "Slowly Varying Envelope Approximation" (SVEA). Ipotesi SVEA ed ottica parassiale.

Equazione di propagazione passabanda ed effetti suscettività dielettrica: attenuazione e distorsione di fase/polarizzazione. Matrici di sistema: casi generali, diagonali e degeneri.

\*L'Equazione Vettoriale di Schroedinger (VLSE):

soluzione nel caso omogeneo e relativa matrice di trasferimento.

VLSE per fibra lossless: conservazione dell'energia. Matrice "beta" (locale) e matrice T (globale).

\*La Matrice di sistema: matrici Hermitiane e matrici unitarie.

PFOT-lez.08: \*Il polarimetro: schema hardware; il fotodiode.

\*Filtri Polarizzatori ideali: il proiettore;

matrice di trasferimento, Hermitiana e idempotente. Misura di SOP e intensità del campo. Correnti in uscita da un polarimetro. Matrici di Pauli e matrice identica come somma di proiettori ortonormali.

Il Polarimetro: schema hardware semplificato; tecnologie costruttive meccanica (filtro rotante) e opto-elettronica (lamine birifrangenti). Polarimetri commerciali (HP, Thorlabs serie PAX, Thorlabs serie IPM/DPC): tecnologie, costi, prestazioni (banda di misura).

PFOT-lez.09: \*I parametri di Stokes e le matrici di Pauli.

\*Vettori di Stokes (3D),

coordinate polari. Versori di Stokes e stati di polarizzazione (SOP). Coordinate sferiche:

\*la Sfera di Poincaré.

SOP notevoli sulla sfera di Poincaré: SOP circolari e SOP lineari; emisferi (handedness). SOP ortogonali: calcolo. Relazione con azimuth/ellitticità e "coordinate geografiche".

PFOT-lez.10: \*Il grado di polarizzazione (DOP):

banda di misura di un Polarimetro e componenti di Stokes mediate. Definizione di DOP e suoi valori limite. "Luce completamente polarizzata", "luce parzialmente polarizzata" e "luce naturale" (depolarizzata): condizioni geometriche, matematiche e fisiche.

Matrice di Coerenza e DOP. Decomposizione del Proiettore.

Evoluzione del SOP sulla sfera di Poincaré: caso (noto) di fibra omogenea con birifrangenza lineare H/V. Soluzione (in Jones) e visualizzazione (in Stokes):  $L_B$  sulla sfera.

PFOT-lez.11: Equazione di Schroedinger (VLSE) per il caso di fibra omogenea con assi qualunque. Diagonalizzazione della matrice di propagazione: autovalori (reali) e autovettori (ortogonali) di matrici Hermitiane.

Luce monocromatica (completamente polarizzata).

Decomposizione spettrale (diagonalizzazione): costante di prop. "di modo comune". Soluzione VLSE: verifica (derivata); matrici esponenziali e loro derivate. Distorsioni di ampiezza, di fase e di polarizzazione; matrice unitaria T e matrice unit-determinant U.

\*Forme esponenziali per fibre omogenee:

calcolo della matrice esponenziale U e suo determinante;  $\det[T]$ . Autovalori/vettori di U: assi locali e assi globali di birifrangenza.

PFOT-lez.12: Fibre a mantenimento di polarizzazione (PMF): ragioni fisiche. Fibre PMF: propagazione di un singolo impulso polarizzato:

\*Corrente fotorivelata e "impulsi fantasma".

DGD e Interferenza Inter-Simbolica. Coefficienti di power-splitting: (esercizio x casa) completezza dei coeff. di power-splitting.

\*Compensazione della PMD: Tecnica di compensazione "PSP transmission".

PFOT-lez.13: Matrice di sistema per fibre qualunque, non omogenee: matrice unitaria (lossless) e matrice U.

Proprietà delle matrici unitarie e loro decomposizione spettrale. Forma trigonometrica e forma esponenziale per U; suoi autovalori ed autovettori;  $\det[U]=1$ .

\*Relazione tra vettori di Jones e Stokes: lo spin-vector.

Prime proprietà dello 'spin-vector': hermitianità delle matrici di Pauli, loro potenze e loro prodotti (simbolo permutatore); quadrato di matrice Hermitiana.  
Sintesi dei risultati trovati per le matrici di Jones di fibre omogenee e non.

PFOT-lez.14: soluzione esercizio: completezza dei coeff. di power-splitting. Completezza di una base ortonormale in  $C^2$ .

Matrice di Mueller M: relazione ingresso-uscita nel dominio di Stokes; matrice  $3 \times 3$  reale. Relazione tensoriale tra U e M. Calcolo esplicito di M un funzione delle coordinate di Pauli di U; sanity-check  $3 \times 3$  reale.

L'algebra dello spin-vector: tensori come array multidimensionali. Proprietà delle matrici di Pauli e del Proiettore. Ulteriori proprietà dello spin-vector; la matrice-prodotto-vettoriale [hx]: proprietà.

PFOT-lez.15: Calcolo esplicito della matrice di Mueller M; forme alternative, con diade. Richiami su matrice [hx] e sue proprietà; articolo [Gordon e Kogelnik, PNAS 2000]. Forma esponenziale: dimostrazione. Costruzione geometrica dell'azione di M: rotazione sulla sfera di Poincaré. Implicazioni: rotazioni cw e ccw; angolo e asse di rotazione, autostati di polarizzazione; determinante[M] unitario; matrice inversa=trasposta.

\*La decomposizione di Pauli:

"coordinate di Pauli" di U.

Evoluzione della polarizzazione per fibre omogenee; caso PMF: rotazione SOP in e lunghezza di battimento.

\*Propagazione vettoriale: il "vettore di birifrangenza" W.

PFOT-lez.16: Applicazioni della birifrangenza: Applicazioni in avionica, meccanica, robotica e computer-grafica: angoli di Eulero, rotazioni assiali, rotazioni generali. Arte: i "Polages".

\*Contesti tecnologici (e non) in cui si applica la polarizzazione;

\*Equazioni di moto nello spazio di Stokes

(dimostrazione dalla stessa). VLSE (Jones); articolo [Frigo, JQE 1986]. Analisi dei termini (loss, distorsione di fase, PDL e PMD). Matrice di Mueller come soluzione dell'eq. di moto (caso PMF). Evoluzione del SOP in frequenza (caso PMF): traccia di depolarizzazione.

PFOT-lez.17: "Modello RWM" per fibre reali: lamine PMF e

\*Lunghezza di correlazione:

matrice di sistema. Tracce di depolarizzazione del SOP (Stokes) "tempo di volo" di un Dirac (Jones): ritardo massimo e profilo di intensità.

\*Il vettore di PMD "Omega".

Dipendenza del SOP di uscita dalla frequenza:

\*Corrente fotorivelata e depolarizzazione: traccia di depolarizzazione;

Evoluzione del SOP: matrice N, vettore Omega, DGD e

\*Stati Principali di Polarizzazione (PSP).

\*PMD "di 1o ordine" e "di ordine superiore".

Matrici di Jones/Mueller (1o ord.). Articolo Poole-Wagner [Electron. Lett.1986].

PFOT-lez.18: Sistema di trasmissione binario (OOK), con modulatore e filtri (ottico ed elettrico): valutazione della Eye Opening. Ipotesi di Chen (trasmissione "101010...") e valutazione di campo e corrente fotorivelata (filtrati), in back-to-back e con fibra con PMD di 1o ordine.

\*Eye Closure Penalty (ECP): formula di Chen generalizzata;

espressione, valori limite, grafico; confronto con ECP da simulazione.

PFOT19-laboratorio di simulazione: Laboratorio: Ambiente di lavoro e simulazione Matlab: brevi cenni riassuntivi. Software di simulazione ottica Optilux: installazione da

repository; struttura funzionale; esempi. Ex\_02 diagramma ad occhio.

PFOT20-laboratorio di simulazione: Optilux: Simulazione di strumenti e dispositivi ottici: DOP-meter (Ex\_21, con misura OSNR da DOP) e Polarization Scrambler (Ex\_22). Simulazione di una fibra a birifrangenza casuale: RWM; matrice di Jones; analisi numerica di autostati e angolo di rotazione; analisi del vettore di PMD (DGD, PSP).

PFOT21-laboratorio di misure (Lab. di comunicazioni ottiche "Optiklab"):

Strumenti e dispositivi elettrici, elettro-ottici, ottici. Laser sintonizzabile (Tunics); misura di potenza con power-meter (portatile). Bretelle di fibra: connettori FC/PC-APC-SMC. Microscopio per ispezione: ferrula/core/cladding. Analizzatore di spettro ottico: parametri e misure. Controllore di polarizzazione manuale e ingegnerizzato (HP 11896A). Polarimetro (Thorlabs DPC5500): misure. Polarization Scrambling e DOP: tempi.



## Testi in inglese

<b>Lingua insegnamento</b>	English
<b>Contenuti</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Polarization of light.</li><li>- Fiber-optic propagation of polarized light.</li><li>- Polarization Mode Dispersion (PMD) and PMD compensation techniques.</li><li>- Formalisms to represent polarized optical signals and polarization-sensitive optical systems.</li></ul>
<b>Testi di riferimento</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Alberto Bononi, Armando Vannucci, "PMD: a Math Primer", technical report 14 July 2001, rev. 18/12/2008, available at the Faculty copying facility.</li><li>- Andrea Galtarossa, Curtis R. Menyuk, (Eds.), "Polarization Mode Dispersion", Ed. Springer (New York, USA), 2005, ISBN-10: 0-387-23193-5.</li><li>- Jay N. Damask, "Polarization Optics in Telecommunications", Ed. Springer (New York, USA), 2005, ISBN: 0-387-22493-9.</li></ul>
<b>Obiettivi formativi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Knowledge of the techniques and formalisms used for representing the polarization of light.</li><li>- Understanding linear propagation in fiber optics, with an emphasis on polarization related phenomena.</li><li>- Applying mathematical/geometrical tools for the description of light polarization, within the telecommunications context or other technological contexts.</li><li>- Ability to apply the techniques of propagation of polarized light, to evaluate distortions and penalties in telecom systems.</li></ul>
<b>Metodi didattici</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- class lectures (36h), given by the teacher, with the aid of blackboard and overhead projector/PC (for showing software applications, figures, web pages).</li><li>- simulation laboratory (4h), using the open source simulator Optilux (University of Parma) for signal propagation in fiber optics.</li><li>- measurement laboratory (2h), using hardware instruments and devices.</li></ul>
<b>Altre informazioni</b>	For this course, informations and materials are available on the Elly/Moodle web-learning platform ( <a href="http://elly.dii.unipr.it/2015/course/view.php?id=48">http://elly.dii.unipr.it/2015/course/view.php?id=48</a> )
<b>Modalità di verifica dell'apprendimento</b>	oral exam: with reference to the contents of the lectures given during the course, the understanding level is evaluated, as well as the capability of analyzing and presenting the topics. No homeworks or classworks are foreseen, during the course. A midterm multiple-choice test is foreseen during the 'spring session' (right after Easter Holidays).
<b>Programma esteso</b>	A detailed outline of each single lecture follows (an asterisk is placed before some 'keywords' of this course):  PFOT-lecture01: General informations on this course, bibliographic references, teaching and assessment methods, course outline. *Polarization of light. Use of EM polarization in radio and optical communications (hints). Historical perspective on fiber optic transmission, in the last thirty years (brief hints): transmission speed, main impairments and enabling technologies.  PFOT-lecture02: Uniform plane wave (TEM) approximation. Vectorial

representation of the Electromagnetic (EM) field (hints): optical frequencies, optical bandwidth and complex envelope.

Polarization representation: case of a continuous monochromatic wave (CW). Lissajous curves.

\*Jones vectors and polarization ellipses:

implicit and parametric forms; phase-difference " $\phi$ "; degenerate cases; handedness: right- and left-handed polarizations; conventions.

PFOT-lecture03: Special States Of Polarization (SOP): LH, LV, L+45, L-45, RHC, LHC; unitmagnitude Jones vectors and corresponding angles ( $\chi$ ,  $\phi$ ). Inner product in  $\mathbb{C}^2$ : norm, orthogonality. More general polarizations: linear SOPs and elliptic SOPs with zero azimuth.

\*Orthonormality between states of polarization.

Azimuth and ellipticity of a SOP ( $\theta$ ,  $\epsilon$ ) formalism.

Software "Polarization Tutor" (HP): use and check of theoretical results.

PFOT-lecture04: \*Fiber-optic propagation of polarized light.

The fiber as a (2x2) MIMO system: transfer matrix. The Engineer's approach to the "fiber-system". Delay: variations of refractive index; chromatic dispersion and birefringence; causes. Attenuation (Loss): measurements in dB. Experimental results on attenuation: linear dependence on fiber length; propagation windows and historical perspective; independence of SOP.

\*Hints on Polarization Dependent Gain/Loss (PDG/PDL):

optical amplifiers.

PFOT-lecture05: Transfer matrix of a "birefringent" lossy fiber.

Propagation in a "homogeneous fiber with H/V birefringence" (diagonal  $\beta$ ): example with a monochromatic diagonal input SOP. SOP evolution:

\*Beat Length.

Polarization eigenstates (for a homogeneous H/V fiber).

\*Polarization Mode Dispersion (PMD):

pulse broadening and intersymbol interference.

\*Differential Group Delay (DGD).

Birefringence axes (and birefringence "strength"). Generalization of results for any homogeneous fiber.

Factorization of losses: lossless transfer matrix: adjoint matrix; unitarity.

PFOT-lecture06: Different approaches to optical propagation: geometric optics, wave optics, Maxwell's equations, quantum optics. Examples of application. Physics approach to optical transmission: Maxwell's equations and constituent relations of matter. The case of Silica ( $\text{SiO}_2$ ): structure and aggregation forms. Differential operators (" $\nabla$ ") and vector properties. Helmholtz equation: uniform planar wave (TEM) and monochromatic solution; wavefronts. Electric susceptibility in optical fibers: physical assumptions and mathematical consequences; peculiarities of the PFOT course (inhomogeneous matrix vs homogeneous scalar).

PFOT-lecture07: Formulation in the " $\omega$ " domain, with "narrowband" modulated fields (complex envelopes). Slowly Varying Envelope Approximation (SVEA). SVEA hypothesis and paraxial optics.

Passband propagation equation and effects of electric susceptibility: attenuation and phase/polarization distortion. System matrices: general, diagonal and degenerate cases.

\*Vectorial Linear Schroedinger Equation (VLSE):

solution in the homogeneous case and corresponding transfer matrix.

VLSE for a lossless fiber: conservation of energy. " $\beta$ " (local) matrix and " $T$ " (global) matrix.

\*System matrix: Hermitian and unitary matrices.

PFOT-lecture08: \*The Polarimeter: hardware scheme; the photodiode.

\*Ideal polarizers: the projector;

Hermitian and idempotent transfer matrix. SOP measurement and field intensity. Output currents from a Polarimeter. Pauli matrixes and identity matrix as the sum of orthonormal projectors.

The Polarimeter: simplified hardware scheme; mechanical (rotating filter) and opto-electronic (birefringent waveplates) constructive technologies. Commercial Polarimeters (HP, Thorlabs series PAX, Thorlabs series

IPM/DPC): technologies, costs, performance (measurement bandwidth).

PFOT-lecture09: \*Stokes parameters and Pauli matrices.

\*Stokes vectors (3D),

polar coordinates. Unit-magnitude Stokes vectors and states of polarization (SOP).

Spherical coordinates:

\*the Poincaré sphere.

Special SOPs on the Poincaré sphere: circular SOPs and linear SOPs; emispheres (handedness). Orthogonal SOPs. relationship with azimuth/ellipticity and "geographical coordinates".

PFOT-lecture10: \*The Degree Of Polarization (DOP):

measurement bandwidth of a Polarimeter and averaged Stokes components. Definition of DOP and limit values. "Fully polarized light", "partially polarized light" and "natural (depolarized) light": corresponding geometrical, mathematical and physical conditions.

Coherency matrix and DOP. Decomposition of the Projector.

SOP evolution on the Poincaré sphere: (known) case of homogeneous fiber with linear H/V birefringence. Solution (Jones) and visualization (Stokes):  $L_B$  on the sphere.

PFOT-lecture11: Schroedinger Equation (VLSE) for a homogeneous fiber with general axes. Diagonalization of the propagation matrix: (real) eigenvalues and (orthogonal) eigenvectors for Hermitian matrices.

Monochromatic (fully polarized) light.

Spectral decomposition (diagonalization): "common mode" propagation constant.

CLSE solution: check (derivative); exponential matrices and their derivatives.

Amplitude, phase and polarization distortion: unitary matrix  $T$  and unit-determinant matrix  $U$ .

\*Exponential forms for homogeneous fibers:

calculation of the matrix exponential  $U$  and its determinant;  $\det[T]$ .

Eigenvalues/vectors of  $U$ : local and global axes of birefringence.

PFOT-lecture12: Polarization Maintaining Fibers (PMF): physical reasons. PMF fibers: propagation of a single polarized pulse:

\*Photodetected current and "ghost pulses".

DGD and Inter-Symbol Interference. Power-splitting coefficients: (homework) completeness of power-splitting coeffs.

\*PMD compensation through "PSP transmission".

PFOT-lecture13: System matrix for a general inhomogeneous fiber: unitary (lossless) matrix and  $U$  matrix.

Properties of unitary matrices and their spectral decomposition. Trigonometric form and exponential form for  $U$ ; its eigenvalues and eigenvectors;  $\det[U]=1$ .

\*Relationship between Jones and Stokes vectors: the spin-vector.

Basic properties of the 'spin-vector': hermiticity of Pauli matrices, their powers and products (permutator symbol); square of a hermitian matrix.

Summary of results found for Jones matrices of homogeneous and inhomogeneous fibers.

PFOT-lecture14: solution of homework: completeness of power-splitting coeffs. Completeness of an orthonormal basis in  $C^2$ .

Mueller matrix  $M$ : input-output relationship in the Stokes domain;  $3 \times 3$  real matrix.

Tensor relationship between  $U$  and  $M$ . Explicit calculation of  $M$  as a function of the Pauli coordinates of  $U$ ; (sanity-check)  $3 \times 3$  real.

Spin-Vector algebra: tensors as multidimensional arrays. Properties of Pauli matrices and of the Projector. Further properties of the spin-vector; the vector-product matrix  $[hx]$ : properties.

PFOT-lecture15: Explicit calculation of the Mueller matrix  $M$ ; alternative forms, with dyad. Reference to  $[hx]$  matrix and its properties; paper [Gordon e Kogelnik, PNAS 2000]. Exponential form: demonstration. Geometrical construction of the multiplication by  $M$ : rotation on the Poincaré sphere. Implications: cw and ccw rotations; rotation angle and rotation axis, polarization eigenstates; unit determinant $[M]$ ; inverse=transpose matrix..

\*Pauli decomposition:

"Pauli coordinates" of  $U$ .

Polarization evolution for homogeneous fibers; PMF case: SOP in rotation and Beat Length.

\*Vectorial propagation: the "birefringence vector"  $W$ .

PFOT-lecture16: Applications of birefringence: avionics, mechanics, robotics and computer-graphics: Euler angles, axial rotations, general rotations. Arts: "Polages".

\*Polarization-sensitive technological (and non-tech.) contexts;

\*Equations of motion in Stokes space

(its demonstration). VLSE (Jones); paper [Frigo, JQE 1986]. Analysis of the terms (loss, phase distortion, PMD and PDL). Mueller matrix as the solution of the Equation of motion (PMF case). Frequency evolution of SOP (PMF case): depolarization trace.

PFOT-lecture17: "RWM Model" for real fibers: PMF waveplates and

\*Correlation Length:

system matrix. Depolarization trace of a SOP (Stokes) and "time of flight" of a Dirac pulse (Jones): maximum delay and intensity profile.

\*The PMD vector " $\Omega$ ".

Dependence of the output SOP on frequency:

\*Photodetected current and depolarization: depolarization trace;

SOP evolution: N-matrix,  $\Omega$  vector, DGD and

Evoluzione del SOP: matrice N, vettore  $\Omega$ , DGD e

\*Principal States of Polarization (PSP).

\*\*"1st-order" PMD and "higher-order" PMD.

Jones/Mueller matrices (1st ord.). Paper by Poole-Wagner [Electron. Lett. 1986].

PFOT-lecture18: Binary transmission system (OOK), with modulator and (optical and electrical) filters: evaluation of the Eye Opening. Chen hypothesis ("101010..." transmission) and consequent evaluation of (filtered) field and photodetected current, both in back-to-back and with a 1st-order PMD fiber.

\*Eye Closure Penalty (ECP): generalized Chen's formula;

expression, limit values, plot; comparison with ECP from simulations.

PFOT19-simulation laboratory: Laboratory: Work environment and Matlab simulations: brief hints and summary. Optical simulation software Optilux: installation from repository; functional structure; examples. Ex\_02 Eye diagram.

PFOT20-simulation laboratory: Optilux: Simulation of optical instruments and devices: DOP-meter (Ex\_21, with measurement of OSNR from DOP) and Polarization Scrambler (Ex\_22). Simulation of a randomly birefringent fiber: RWM; Jones matrix; numerical analysis of eigenstates and retardation (rotation angle); PMD vector analysis (DGD, PSP).

PFOT21-measurement laboratory (Optical communications Lab. "Optiklab"): Electrical, electro-optical and optical instruments and devices. Tunable laser (Tunics); intensity measurements with (handheld) power-meter. Fiber patchcords: connectors FC/PC-APC-SMC. Microscope for inspection: ferrule/core/cladding. Optical Spectrum Analyzer (OSA): parameters and measurements. Manual and engineered (HP 11896A) Polarization Controllers (PC). Polarimeter (Thorlabs DPC5500): measurements. Polarization Scrambling and DOP: times.