

Corso di Comunicazioni Ottiche

A. A. 2011/2012

Paolo Serena

31 maggio 2012

Lezione 1 (29-Feb-2012)

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.

Note: I principi dell'ottica a raggi si trovano in [Alb05]. Le slides della presentazione si trovano in LeA.

Approfondimenti: Un'interessante analisi sul futuro delle comunicazioni ottiche è in [Des06]. Una introduzione alla storia delle comunicazioni ottiche è in [Agrbase]. Un'analisi approfondita sui fondamenti delle comunicazioni ottiche con uno sguardo alla capacità di canale è in [Ess10]. Una lista delle maggiori aziende mondiali nel campo dell'ottica può essere trovata in [Ecoc11]. Una lista delle maggiori aziende italiane nel campo dell'ottica si può trovare in [ListITA]. Approfondimenti sull'ottica a raggi sono in [Saleh] nel capitolo "Ray Optics".

Lezione 2 (01-Mar-2012)

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.

Note: Richiami sulle fibre ottiche si trovano in [Alb05] ed in [Agrbase]. La dimostrazione rigorosa della GVD si trova in [AgrNL, Agrbase].

Approfondimenti: Per le equazioni di Maxwell si veda [Saleh]. Una dimostrazione ancor più rigorosa della GVD (e della non linearità) tramite approccio a scale multiple si trova in [Men99, Men06]. Per una lista delle principali fibre ottiche e delle relative caratteristiche si veda [Cisco]. Per la definizione di ritardo di gruppo e di fase si veda "Carrier and envelope delay" in [Carlson].

Lezione 3 (07-Mar-2012)

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.

Note: per la GVD si veda [Alb05] ed [Agrbase, AgrNL].

Approfondimenti: Per l'interpretazione del matched filter in frequenza si veda [Proakis]. Per la definizione della varianza di un segnale ed il principio di Heisenberg si veda l'appendice di [Saleh].

Lezione 4 (08-Mar-2012)

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.

Note: i dettagli si trovano in [Alb05].

Approfondimenti: La formula di Chen è stata introdotta da Chen nel contesto della dispersione modale di polarizzazione in [Chen99], ma l'idea di principio rimane anche per la GVD. Sulla trasformata di Fourier indotta dalla GVD è interessante osservare l'analogia con il fenomeno della diffrazione di Fresnel [Saleh].

Lezione 5 (13-Mar-2012)

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.

Note: i dettagli si trovano in [Alb05]. Il modello del reservoir si trova in [Alb98].

Approfondimenti: Una discussione sulle cross sections si trova in [Saleh]. I modelli dell'amplificatore sono discussi in [Sal90, Sun96].

Lezione 6 (14-Mar-2012)

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).

Note: i dettagli si trovano in [Alb05]. Per la definizione della cifra di rumore si legga [Hau98]. La proprietà che un fotone contribuisce con una sola carica alla corrente è in [Saleh] nella sezione 17.1 "Properties of semiconductor photodetectors".

Approfondimenti: una discussione generale sui fotodiodi si trova in [Alexander] e in [Agrbase].

Lezione 7 (20-Mar-2012)

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 ottici 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.

Note: i dettagli si trovano in [Alb05]. Il quantum limit è discusso anche in [Agrbase].

Approfondimenti: Una dimostrazione alternativa del teorema di Campbell si trova in [Saleh].

Lezione 8 (21-Mar-2012)

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.

Note: i dettagli si trovano in [Alb05].

Approfondimenti: discussioni generali sul power budget sono in [Saleh].

Lezione 9 (27-Mar-2012)

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

Note: i dettagli si trovano in [Alb05].

Approfondimenti: La formula di Isserlis è ben descritta in wikipedia. Per la rappresentazione di Rice di un processo passabanda si veda [Papoulis, Carlson].

Lezione 10 (28-Mar-2012)

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

Note: i dettagli si trovano in [Alb05].

Approfondimenti: per la misura della cifra di rumore si veda [Agrbase]. Metodo più corretto per calcolare la probabilità di errore senza l'ipotesi di rumore Gaussiano si trovano in [Hum91, For00].

Lezione 11 (03-Apr-2012)

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.

Note: Per la equazione non lineare di Schroedinger si veda [AgrNL]. Per le ragioni della non linearità cubica si veda [Iizuka] a p. 523.

Approfondimenti: La dimostrazione rigorosa della NLSE si trova in [Men06, Men99]. Un interessante tutorial sulla NLSE è in [Agr11].

Lezione 12 (04-Apr-2012)

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.

Note: per il SPM e WB si veda [AgrNL]. Per l'analisi del chirp si veda [And92]. Per le catene di amplificatori si veda [Alb05].

Approfondimenti: Ulteriori approfondimenti sul WB sono in [And93].

Lezione 13 (17-Apr-2012)

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.

Note: Per la dimostrazione del solitone si veda [AgrNL].

Approfondimenti: Ulteriori approfondimenti sui solitoni sono in [Agr11]. Un buon libro della biblioteca Unipr dedicato ai solitoni è [Hasegawa].

Lezione 14 (18-Apr-2012)

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.

Note: Per gli effetti cross-canale si veda [AgrNL]. Il XPM senza GVD intra-canale è trattato in [Kaz96].

Approfondimenti: l'impatto del XPM sul rumore ASE in assenza di GVD intra-canale è trattato in [Ho04] con un modello simile nel principio a quello visto a lezione.

Lezione 15 (24-Apr-2012)

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.

Note: Per il filtro di XPM si veda [Bel98, BelVar98]. Il modello ai piccoli segnali della GVD è stato introdotto per la prima volta in [Pet92]. Le slides della lezione sono disponibili in LeA.

Approfondimenti: Una derivazione alternativa del modello di XPM con GVD intra-canale si trova in [Car99]. L'analisi dell'impatto del XPM in sistemi ibridi OOK/DQPSK è svolta in [Alb09].

Lezione 16 (02-May-2012)

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.

Note: Una introduzione sullo SSFM è in [AgrNL]. La scelta del passo è analizzata in [Sin03]. Il metodo dell'errore locale come spiegato a lezione si trova in [Feldman].

Approfondimenti: Estensioni del metodo della fase non lineare includendo la GVD si trovano in [Zha08]. Un'analisi delle risonanze spurie create dal metodo del passo costante si trova in [Bos00].

Lezione 17 (08-May-2012)

Linguaggio Matlab. Linguaggio di programmazione Optilux.

Note: Le slides di introduzione sul linguaggio Matlab si trovano in LeA. Optilux si può scaricare all'indirizzo Optilux. In Linux, per scaricare Optilux con il software Subversion digitare il comando

```
<svn co https://optilux.svn.sourceforge.net/svnroot/optilux>. Per compilare i mex files di Matlab (e.g., usare la funzione comp_mex.m di Optilux) può essere utile, in sistemi Linux, installare il pacchetto build-essential. Un esempio di modello discreto di un segnale PAM si trova in LeA.
```

Approfondimenti: Versioni open-source di Matlab sono Octave e SciLab. Nel caso di Octave occorre installare anche un programma di grafica, e.g., gnuplot (in wikipedia alla voce Octave c'è una lista esaustiva di alternative). I principali

toolbox di Matlab sono presenti separatamente in Octave nel pacchetto Octave-Forge. Un primer di base su Matlab si trova in [Sig93]. Un tutorial avanzato di Matlab si trova in [Ack03]. Una collezione di programmi Matlab di utilità generale si trova in Matlab-File-Exchange.

Lezione 18 (09-May-2012)

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

Note: Per Optilux si guardi la documentazione allegata al pacchetto Optilux.

Approfondimenti: Un ottimo riferimento su come si scrive un articolo scientifico si trova in [Whi04]. Suggerisco anche di leggere [Abd08]. Alcuni commenti sulle simulazioni Matlab si trovano nel forum di Comunicazioni Ottiche in LeA alla data 9 maggio 2012.

Lezione 19 (15-May-2012)

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.

Note: Il FWM si trova in [AgrNL]. Il modello distribuito gaussiano si trova in [Alb11].

Approfondimenti: Ulteriori dettagli sul modello gaussiano si trovano in [Pog11] e in [Car12].

Lezione 20 (16-May-2012)

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.

Note: Per la modulation instability si veda [AgrNL]. Un buon tutorial sugli OPA è [Han02]. Per il rumore degli OPA si veda [Kyl04].

Approfondimenti: L'OPA a due pompe è descritto in [MKi02].

Lezione 21 (22-May-2012)

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

Note: Un ottimo libro sulla polarizzazione è [Damask]. Un tutorial si trova in [Gor00]. Il programma per esaminare lo stato di polarizzazione di un segnale si trova in LeA.

Approfondimenti: Approfondimenti si trovano sempre in [Gor00]. Il moto nell'ospazio di Stokes è ben descritto in [Fri86].

Lezione 22 (*23-May-2012*)

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.

Note: Un ottimo libro sulla polarizzazione è [Damask]. Un tutorial si trova in [Gor00].

Approfondimenti: Approfondimenti si trovano sempre in [Gor00].

Lezione 23 (*30-May-2012*)

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.

Note: Il modello pompa/segnale del Raman si trova in [AgrNL]. Le slides della presentazione si trovano in LeA. Un buon tutorial sulla DPSK è [Win06].

Approfondimenti: Le slides della presentazione contengono diversi riferimenti bibliografici sugli specifici argomenti.

Lezione 24 (*31-May-2012*)

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 keying (PS-QPSK).

Note: Le slides della presentazione si trovano in LeA. Ottimi tutorial sulla ricezione coerente sono [Cha08, Kik10, Sav10].

Approfondimenti: Le slides della presentazione contengono diversi riferimenti bibliografici sugli specifici argomenti.

Riferimenti bibliografici

- [Abd08] M. O. Abdelgawad, “Writing and Publishing Good Journal Papers,” tech. report, University of Toronto, 2008.
- [Ack03] P. J. Acklam, “MATLAB array manipulation tips and tricks,” tech. report, 2003. [Online] Available: <http://home.online.no/~pjacklam/matlab/doc/mtt/index.html>.
- [Agrbase] G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems,” Wiley, 3rd ed., 2002.
- [AgrNL] G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics,” San Diego, CA: Academic Press, 2001.
- [Agr11] G. P. Agrawal, “Nonlinear fiber optics: its history and recent progress,” *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 28, n. 12, pp. A1–A10, Dec. 2011.
- [Alb98] A. Bononi and L. A. Rusch, “Doped-Fiber Amplifier Dynamics: A System Perspective,” *J. Lightw. Technol.*, v. 16, n. 5, pp. 945–956, May 1998.
- [Alb05] A. Bononi, “Appunti di Comunicazioni Ottiche A,” Università degli Studi di Parma, 2005.
- [Alb11] E. Grellier and A. Bononi, “Quality parameter for coherent transmissions with Gaussian-distributed nonlinear noise,” *Opt. Express*, v. 19, n. 13, pp. 12781–12788, June 2011.
- [Alb09] A. Bononi, M. Bertolini, P. Serena, and G. Bellotti, “Cross-Phase Modulation Induced by OOK Channels on Higher-Rate DQPSK and Coherent QPSK Channels,” *J. Lightw. Technol.*, v. 27, n. 18, pp. 3974–3983, Sept. 2009.
- [Alexander] S. B. Alexander, “Optical Communication Receiver Design,” SPIE press, IEE, 1997.
- [And92] D. Anderson, M. Desaix, M. Karlsson, M. Lisak and M. L. Quiroga-Teixeiro, “Wave Breaking-free pulses in Nonlinear Optical Fibers,” *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 9, n. 8, pp. 1358–1361, Aug. 1992.
- [And93] D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak and M. L. Quiroga-Teixeiro, “Wave Breaking in Nonlinear Optical Fibers,” *J. Opt. Soc. Am. B*, v. 10, n. 7, pp. 1185–1190, July 1993.
- [Bel98] A. Bononi, C. Francia, and G. Bellotti, “Impulse response of crossphase modulation filters in multi-span transmission systems with dispersion compensation,” *Opt. Fiber Technol.*, v. 4, n. 4, pp. 371–383, 1998.

- [BelVar98] G. Bellotti, M. Varani, C. Francia and A. Bononi, "Intensity Distortion Induced by Cross-Phase Modulation and Chromatic Dispersion in Optical-Fiber Transmissions with Dispersion Compensation," *IEEE Photon. Technol. Letters*, v. 10, n. 12, pp. 1745–1747, Dec. 1998.
- [Bos00] G. Bosco, A. Carena, V. Curri, R. Gaudino, Member, P. Poggiolini, and S. Benedetto, "Suppression of Spurious Tones Induced by the Split-Step Method in Fiber Systems Simulation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 12, n. 5, pp. 489–491, May 2000.
- [Car12] A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Modeling of the Impact of Non-Linear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links," *J. Lightw. Technol.*, v. 30, n. 10, pp. 1524–1539, May 2012.
- [Carlson] A. B. Carlson, "Communication Systems," Mc Graw Hill, 2002.
- [Car99] "Cross-Phase Modulation in Intensity Modulation– Direct Detection WDM Systems with Multiple Optical Amplifiers and Dispersion Compensators," *J. Lightw. Technol.*, v. 17, n. 2, pp. 178–190, Feb. 1999.
- [Cha08] G. Charlet, "Coherent detection associated with digital signal processing for fiber optics communication," *Comptes Rendus Physique*, v. 9, n. 9-10, pp. 1012–1030, 2008.
- [Chen99] C.-J. Chen, "System Impairments due to Polarization mode dispersion," in *Proc. OFC99*, paper We2-1, p. 77–79, 1999.
- [Cisco] A. Barbieri, "A Guide to Select Single-Mode Fibers for Optical Communications Applications," Tech. report, Cisco Technology Marketing, pp. 1–37, 2002.
- [Damask] J. N. Damask, "Polarization optics in telecommunications," New York: Springer, 2004.
- [Des06] E. Desurvire, "Capacity Demand and Technology Challenges for Lightwave Systems in the Next Two Decades," *J. Lightw. Technol.*, v. 24, n. 12, p. 4697–4710, Dec. 2006.
- [Ecoc11] Ecoc 2011, list of exhibitors, [Online] Available: <http://2011.ecocexhibition.com/edirectory/list>.
- [Ess10] R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, B. Goebel, "Capacity Limits of Optical Fiber Networks," *J. Lightw. Technol.*, v. 18, n. 4, p. 662–701, Feb. 2010.
- [Feldman] J. Feldman, "Variable step size methods," Tech. report, Dept. of Mathematics, University of British Columbia Vancouver, BC Canada, [Online] Available: <http://www.math.ubc.ca/~feldman/math/vble.pdf>.

- [For00] E. Forestieri, "Evaluating the error probability in lightwave systems with chromatic dispersion, arbitrary pulse shape and pre- and postdetection filtering," *J. Lightw. Technol.*, v. 18, n. 11, pp. 1493–1503, Nov. 2000.
- [Fri86] N. J. Frigo, "A Generalized Geometrical Representation of Coupled Mode Theory," *IEEE J. Quantum. Electron.*, v. QE-22, n. 11, pp. 2131–2140, Nov. 1986.
- [Hasegawa] A. Hasegawa and M. Matsumoto, "Optical Solitons in Fibers," Springer, 3rd ed., 2002.
- [Han02] J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund, J. Li and P.-O. Hedekvist, "Fiber-based Optical Parametric Amplifiers and Their Applications," *J. Sel. Top. Quantum Elec.*, v. 8, n. 3, pp. 506–520, May/June 2002.
- [Hau98] H. A. Haus, "The Noise Figure of Optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Letters*, v. 10, n. 11, p. 1602–1604, Nov. 1998.
- [Ho04] K. Po Ho, "Error Probability of DPSK Signals with Cross-Phase Modulation Induced Nonlinear Phase Noise," *J. Sel. Top. Quantum. Elec.*, v. 10, n. 2, pp. 421–427, March/Apr. 2004.
- [Hum91] P. A. Humblet, "On the Bit-error rate of Lightwave Systems with Optical Amplifiers," *J. Lightw. Technol.*, v. 9, n. 11, pp. 1576–1582, Nov. 1991.
- [Iizuka] Keigo Iizuka, "Elements of Photonics, Volume I: In Free Space and Special Media", Wiley, 2002.
- [Ip08] E. Ip, A. P. T. Lau, D. J. F. Barros, and J. M. Kahn, "Coherent detection in optical fiber systems," *Opt. Express*, v. 16, n. 2, pp. 753–791, 2008.
- [Kaz96] T.-K. Chiang, N. Kagi, M. E. Marhic, and L. G. Kazovsky, "Cross-Phase Modulation in Fiber Links with Multiple Optical Amplifiers and Dispersion Compensators," *J. Lightw. Technol.*, v. 14, n. 3, pp. 249–260, March 1996.
- [Kik10] K. Kikuchi, "Coherent optical communications: Historical perspectives and future directions," *High Spectral Density Optical Communication Technologies*, pp. 11–49, 2010.
- [Kyl04] P. Kylemark, P. O. Hedekvist, H. Sunnerud, M. Karlsson and P. A. Andrekson, "Noise characteristics of fiber optical parametric amplifiers," *J. Lightw. Technol.*, v. 22, n. 2, pp. 409–416, Feb 2004.
- [Gor00] J. P. Gordon and H. Kogelnik, "PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, v. 97, n. 9, pp. 4541–4550, Apr. 2000.

- [ListITA] S. Pelli, G. C. Righini, “Optics in Italy: directory 2010,” Tech. report, Siof, 2010. [Online] Available: <http://www.siof-ottica.it/documenti/annuario10.pdf>.
- [MKi02] C. J. McKinstrie, S. Radic and A. R. Chraplyvy, “Parametric amplifiers driven by two pump waves,” *J. Sel. Top. Quantum Elec.*, v. 8, n. 3, pp. 538–547, May/June 2002.
- [Men99] C. R. Menyuk, “Application of multiple-length-scale methods to the study of optical fiber transmission,” *J. of Engineering Mathematics*, v. 36, p. 113–136, 1999.
- [Men06] C. R. Menyuk and B. S. Marks, “Interaction of Polarization Mode Dispersion and Nonlinearity in Optical Fiber Transmission Systems,” *J. Lightw. Technol.*, v. 24, n. 7, p. 2806–2826, 2006.
- [Papoulis] A. Papoulis, “Probability, random variables, and stochastic processes,” McGraw-Hill, 2002.
- [Pet92] J. Wang and K. Petermann, “Small-signal Analysis for Dispersive Optical Fiber Communication Systems,” *J. Lightw. Technol.*, v. 10, n. 1, pp. 99–100, Jan. 1992.
- [Pog11] P. Poggiolini, A. Carena, V. Curri, G. Bosco and F. Forghieri, “Analytical Modeling of Nonlinear Propagation in Uncompensated Optical Transmission Links,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 23, n. 11, pp. 742–744, June 2011.
- [Proakis] J. G. Proakis, “Digital Communications,” Mc Graw Hill.
- [Saleh] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, “Fundamentals of Photonics,” Wiley, 2007.
- [Sal90] A. A. M. Saleh, R. M. Jopson, J. D. Evankow and J. Aspell, “Modeling of Gain in Erbium-Doped Fiber Amplifiers,” *IEEE Photon. Technol. Letters*, v. 2, n. 10, pp. 714–716, Oct. 1990.
- [Sav10] S. Savory, “Digital coherent optical receivers: Algorithms and subsystems,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, v. 16, n. 5, pp. 1164–1179, 2010.
- [Sig93] K. Sigmon, “Matlab Primer”, tech. report, University of Florida, 1993. [Online] Available: <http://www.math.toronto.edu/mpugh/primer.pdf>.
- [Sin03] O. V. Sinkin, Member, R. Holzlöhner, J. Zweck, and Curtis R. Menyuk, “Optimization of the Split-Step Fourier Method in Modeling Optical-Fiber Communications Systems,” *J. Lightw. Technol.*, v. 21, n. 1, pp. 61–68, Jan. 2003.

- [Sun96] Y. Sun, G. Luo, J. L. Zyskind, A. A. M. Saleh, A. K. Srivastava and J. W. Sulhoff, "Model for gain dynamics in erbium-doped fibre amplifiers," *Electron. Letters*, v. 32, n. 16, pp. 1490–1491, Aug 1996.
- [Zha08] Q. Zhang, and M. I. Hayee, "Symmetrized Split-Step Fourier Scheme to Control Global Simulation Accuracy in Fiber-Optic Communication Systems," *J. Lightw. Technol.*, v. 26, n.2, pp. 302–316, Jan. 2008.
- [Whi04] G. M. Whitesides, "Whitesides' Group: Writing a Paper," *Advanced Materials*, v. 16, n. 15, pp. 1375–1377, 2004.
- [Win06] P. J. Winzer and R. J. Essiambre, "Advanced modulation formats," *Proceedings of the IEEE*, v. 94, n. 5, pp. 952–986, May 2006.