

Effiziente echtzeitfähige Algorithmen zur Implementierung kohärenter optischer Empfänger

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jonas Christian Geyer

Erlangen 2011

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung : 19. Juli 2010
Tag der Promotion : 17. Dezember 2010
Dekan : Prof. Dr.-Ing. habil. R. German
Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. B. Schmauß
Prof. Dr.-Ing. C. G. Schäffer

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Jonas Christian Geyer

**Effiziente echtzeitfähige Algorithmen zur
Implementierung kohärenter optischer Empfänger**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9979-8

ISSN 1866-6043

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen kohärenter optischer Übertragung mit DSP	3
2.1	CP-QPSK	5
2.1.1	CP-QPSK Sender	5
2.1.2	CP-QPSK Empfänger mit DSP	6
2.1.3	Digitale Signalverarbeitung	9
2.2	Minimum Mean Squared Error Entzerrer	14
2.3	Limitierende Faktoren bei optischer Langstrecken-Übertragung	17
2.3.1	Phasenrauschen von Lasern	17
2.3.2	ASE-Rauschen	18
2.3.3	Nichtlineares Phasenrauschen durch den optischen Kerr-Effekt	20
3	Effiziente digitale CD Entzerrung	23
3.1	Beziehung zwischen CD und PMD Entzerrer	23
3.2	Grundlagen der Modellierung von CD	24
3.3	FIR-Filtersynthese zur Kompensation von CD	26
3.3.1	Rechteckfensterung im Zeitbereich	26
3.3.2	Rechteckfensterung im Frequenzbereich	27
3.3.3	Root-Raised-Cosine Bandbegrenzung	29
3.3.4	Vergleich der Entwurfsverfahren	30
3.4	Kompensation mit Zeitbereichsentzerrer	33
3.4.1	Optimierung der FIR-Koeffizienten für limitierte Filterlänge	34
3.4.2	Evaluierung in Systemsimulationen	35
3.5	Kompensation mit Frequenzbereichsentzerrer	37
3.5.1	Overlap-Save Verfahren	38

3.5.2	Vergleich der Komplexität von TDE und FDE	40
3.5.3	Effiziente Filternutzung im Frequenzbereich	46
3.5.4	Evaluierung in Systemsimulationen	49
4	Konzepte zur Trägerrückgewinnung	53
4.1	Viterbi & Viterbi Trägerphasenschätzung	55
4.1.1	Grundlagen	56
4.1.2	Polarisationskopplung	62
4.1.3	Toleranz gegenüber XPM	65
4.2	Kompensation nichtlinearer Polmux-Intrakanal Fasereffekte .	71
4.2.1	Architektur der Kompensation und Regelung	74
4.2.2	Regelverhalten und Wechselwirkung mit dem Träger- rückgewinnungsverfahren	78
4.2.3	Leistungsfähigkeit des SA-NLC	84
5	Optical Performance Monitoring mit kohärenten Empfän- gern	91
5.1	Grundlagen Optical Performance Monitoring	91
5.2	OPM im kohärenten Empfänger	92
5.2.1	Separation der Entzerrermatrix	95
5.2.2	Ermitteln der Schätzwerte	98
5.3	Evaluierung der Qualität der Monitor-Signale	105
6	FPGA basierter kohärenter Echtzeitempfänger	111
6.1	Architektur	112
6.1.1	Hardware	112
6.1.2	Blockprozessierung	116
6.1.3	Algorithmen	117
6.1.4	Partitionierung der vier FPGAs	118
6.1.5	Betrieb	120
6.2	Signaldynamik und ADC-Auflösung	121
6.3	Messtechnische Charakterisierung	124
6.3.1	Back-to-Back Performance	124
6.3.2	Toleranz gegenüber linearen Verzerrungen	125
6.3.3	Toleranz gegenüber nichtlinearen Verzerrungen	128
6.3.4	Optical Performance Monitoring	131

7 Zusammenfassung	135
A Frequenzumsetzung mit optischem 90°-Hybrid	139
B Fouriertransformation der CD-Übertragungsfunktion	141
B.1 CD als Allpass	141
B.2 Komplexes Gauß-Integral mit Offset	143
B.3 CD mit rechteckiger Bandbegrenzung	145
C Q-Faktor und Bitfehlerverhältnis	147
D Quantisierung in der Trägerrückgewinnung	149
Literaturverzeichnis	151
Summary	159
Danksagung	161

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen, Naturkonstanten und Abkürzungen

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
α_r		Roll-Off-Faktor
α_{rot}	rad	Rotationswinkel
$\alpha_{X/Y}$		Gewichtungsfaktor des SA-NLC
β	s^2/rad	Hilfsvariable
β_2	$\text{s}^2/\text{rad}/\text{m}$	Quadratische Komponente bei Taylor-Reihenentwicklung der Phasenkonstante
β_{rot}	rad	Rotationswinkel
$\beta_{X/Y}$		Gewichtungsfaktor des SA-NLC
γ	W/m	Nichtlinearitätskoeffizient
γ_{eff}		Effektiver Nichtlinearitätskoeffizient
γ_{DGD}		Leistungsaufteilung im DGD-Element bzw. -Emulator
γ_{rot}	rad	Rotationswinkel
Δ	rad	Gauß'sche Zufallsvariable des Wiener-Lévy-Prozesses
θ	rad	Beobachtete Phase
κ		Verhältnis FFT-Länge zu Überlapplänge
λ		Eigenwert
λ_0	nm	Mittenwellenlänge
μ		Updateparameter
ν	Hz	Frequenz
σ		Standardabweichung
τ	ps	DGD
τ_i		Eigenwerte zur DGD-Schätzung
ϕ	rad	Trägerphase; Phase des Lasers

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\Delta\phi$	rad	Differentieller gemittelter Trägerphasenschätzwert
$\hat{\phi}$	rad	Schätzwert der Trägerphase
Φ		Leistungsdichtespektrum
ϕ_{ASE}	rad	Phasenanteil des additiven Rauschens
ϕ_{av}		Gemittelter Trägerphasenschätzwert
ϕ_{br}	rad	Phasenverschiebung bei der Doppelbrechung
$\Delta\varphi_{\mathcal{D}}$	rad	Phasendifferenz zur Berechnung der entfalteten Phase zur CD-Schätzung
$\hat{\varphi}_{\mathcal{D}}$	rad	Entfaltete Phasenwerte zur CD-Schätzung
$\varphi_{\mathcal{D},reg}$	rad	Regressionsparabel zur CD-Schätzung
$\varphi_{\mathcal{D}}$	rad	Phasenwerte zur CD-Schätzung
φ_{LO}	rad	Phase des LOs
$\Delta\phi_{NL}$	rad	Phasenänderung durch Kerr-Nichtlinearität
φ_S	rad	Phase des optischen Signals
$\Delta\phi_{SPM}$	rad	Phasenänderung durch SPM
ϕ_{unw}	rad	Entfalteter Trägerphasenschätzwert
ϕ_X		Unbestimmter Phasenoffset des X-Teilsignals (abhängig von der verwendeten Trägerrückgewinnung)
$\Delta\phi_{XPM,1}$	rad	Phasenänderung durch XPM Typ 1 (andere Frequenz, parallele Polarisation)
$\Delta\phi_{XPM,2}$	rad	Phasenänderung durch XPM Typ 2 (gleiche Frequenz, orthogonale Polarisation)
$\Delta\phi_{XPM,3}$	rad	Phasenänderung durch XPM Typ 3 (andere Frequenz, orthogonale Polarisation)
ϕ_Y		Unbestimmter Phasenoffset des Y-Teilsignals (abhängig von der verwendeten Trägerrückgewinnung)
Ψ	rad	Raumwinkel zwischen zwei SOP-Vektoren
ω	rad/s	Kreisfrequenz
Ω		Diskrete Kreisfrequenz
Ω_{ds}	Hz	Zweiseitige Bandbreite bezogen auf die Kreisfrequenz
$\Omega_{PDL,X}$	rad/s	Rotationswinkelgeschwindigkeit nach PDL-Element (X-Teilsignal)
ω_{ROT}	rad/s	Vektor-Rotationsfrequenz

Symbol	Einheit	Beschreibung
Ω_X	rad/s	Gesamt-Rotationswinkelgeschwindigkeit (X-Teilsignal)
A		Amplitude
a		Binärzahl
\mathbf{A}		PDL-Matrix mit beliebigen Hauptachsen
a_i		Binärziffer
\mathbf{A}_{XY}		Elementare PDL-Matrix
\mathbf{B}		Doppelbrechungs-Matrix
b		Binärzahl
B_A	Hz	Verstärkerbandbreite
B_{ds}	Hz	Zweiseitige Bandbreite des Entzerrers
BER		Bitfehlerverhältnis
b_i		Binärziffer
B_{LW}	Hz	Linienbreite; 3dB-Bandbreite
B_{max}	Hz	Maximale einseitige Bandbreite
B_S	Baud	Symbolrate
B_{ss}	Hz	Einseitige Bandbreite des Entzerrers
c		FIR-Koeffizienten
c_X		Gewichtungsfaktor der X-Polarisation
c_Y		Gewichtungsfaktor der Y-Polarisation
D	rad	Phasengang aufgrund von CD
D	ps/nm/km	Dispersionskoeffizient
d	rad	Phase der QPSK-Daten
Dz	ps/nm	Akkumulierte Dispersion
e		Fehlersignal
E	\sqrt{W}	Komplexe Feldamplitude
E_{LO}	\sqrt{W}	Komplexe Feldamplitude des LOs
e_ϕ		Fehlersignal des SA-NLC
E_S	\sqrt{W}	Komplexe Feldamplitude des optischen Signals
$E_{x,\omega}$	\sqrt{W}	Komplexe Feldamplitude der X-Polarisation bei Trägerfrequenz ω
f	Hz	Frequenz
f_A	Hz	Abtastrate
F_{ASE}		Rauschzahl des optischen Verstärkers
f_{BWR}	Hz	Blockwiederholrate
f_{rot}	Rot./s	Rotationsfrequenz des SOPs auf der Poincaré-Kugel
g		Impulsantwort des Pulsformers

Symbol	Einheit	Beschreibung
G		Leistungsverstärkung
h		Komplexwertige Koeffizienten
\mathbf{H}_{CD}		Matrix der CD-Entzerrerübertragungsfunktion
H_{CD}		Übertragungsfunktion des CD-Entzerrers
$H_{CD,AP}$		Übertragungsfunktion des CD-Entzerrers – Allpass
$h_{CD,AP}$		Impulsantwort des CD-Entzerrers – Allpass
$H_{CD,F}$		CD-Übertragungsfunktion der Faser
$H_{CD,RF}$		Übertragungsfunktion des CD-Entzerrers – Rechteckfensterung im Frequenzbereich
$h_{CD,RFZ}$		Impulsantwort des CD-Entzerrers – Rechteckfensterung im Zeitbereich
$H_{CD,RR}$		Übertragungsfunktion des CD-Entzerrers – Root-Raised-Cosine Bandbegrenzung
$h_{CD,RR}$		Impulsantwort des CD-Entzerrers – Root-Raised-Cosine Bandbegrenzung
h_{CDX}		Impulsantwort des CD-Entzerrers der X-Polarisation
\mathbf{H}_E		Matrix der Entzerrerübertragungsfunktion
H_E		Übertragungsfunktion des Entzerrers
$\mathbf{H}'_{G,n}$		Von CD befreite Matrix der Gesamtübertragungsfunktion aus der inversen Entzerrermatrix
\mathbf{H}'_G		Matrix der Gesamtübertragungsfunktion aus der inversen Entzerrermatrix
\mathbf{H}_G		Matrix der Gesamtübertragungsfunktion
H_G		Gesamtübertragungsfunktion, Sendepulsformer und optischer Kanal
H_L		Übertragungsfunktion des optischen Kanals
H_P		Übertragungsfunktion des Sendepulsformers
\mathbf{H}_{PMD}		Matrix der PMD-Entzerrerübertragungsfunktion
H_{PMD}		Übertragungsfunktion des PMD-Entzerrers
h_{PMDXX}		Impulsantwort des PMD-Entzerrers für die X-X-Polarisationsverkopplung
\vec{h}_R		Vektor der Entzerrerkoeffizienten
H_{RR}		Root-Raised-Cosine Übertragungsfunktion
I		Parameter der Fensterbreite bei der Vektormittelung
i	A	Strom
$\vec{J}_{X,in}$		Jones-Vektor des gesendeten X-Teilsignals

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\vec{J}_{X,out}$		Jones-Vektor des X-Teilsignals am Ende der optischen Strecke
$\vec{J}_{X,PDL}$		Jones-Vektor nach PDL-Element (X-Teilsignal)
k		Diskrete Zeitvariable
k_{PDL}		Dämpfung im PDL-Element
L		Blocklänge des FDEs
L_F	m	Länge der Faser
M		Länge der DFT / FFT
m		Skalierungsparameter des zentralen Symbols bei der Vektormittelung
m_{FDE}		Benötigte Multiplikationen, FDE
$m_{FDE,H}$		Benötigte Multiplikationen, FDE in Hardwareimplementierung
m_{TDE}		Benötigte Multiplikationen, TDE
N		FIR-Filterordnung; FDE-Überlapplänge
n		Zählvariable
\mathcal{N}_0		Spektrale Leistungsdichte des additiven Rauschens
\tilde{n}_a		Rotiertes additives Rauschen
n_a		Additives Rauschen
$n_{CD,RFZ}$		Diskrete Länge der Impulsantwort des CD-Entzerrers – Rechteckfensterung im Zeitbereich
$N_{skal.}$		Skalierte FDE-Überlapplänge
$OSNR$		Optisches Signal-Rausch-Verhältnis
$OSNR_{dB}$	dB	Optisches Signal-Rausch-Verhältnis in dB
\vec{P}		SOP-Vektor auf der Poincaré-Kugel
$P_{ASE,0,1nm}$	W	Rauschleistung in 0,1nm Bandbreite
PDL_{dB}	dB	PDL-Schätzwert in dB
p_i		i-ter Koeffizient der Regressionsparabel zur CD-Schätzung
P_{LO}	W	Leistung des LOs
P_S	W	Leistung des optischen Signals
\hat{q}		Digitales QPSK-Symbol am Empfänger
q		Digitales QPSK-Symbol am Sender
q_i		Imaginärteil der digitalen QPSK-Daten
q_r		Realteil der digitalen QPSK-Daten
\mathbf{R}		Rotationsmatrix

Symbol	Einheit	Beschreibung
\mathbf{R}_Ω		Rotationsmatrix mit konstanter Rotationsgeschwindigkeit
r		Komplexes Datensymbol
r'		(Normiertes) komplexes Datensymbol
\hat{r}		Korrigiertes komplexes Datensymbol
r_{av}		Mit vier potenziertes und gemitteltes komplexes Datensymbol
r_{NL}		Komplexes Datensymbol im SA-NLC
$r_{NL,X}$		Komplexes Datensymbol der X-Polarisation im SA-NLC
$r_{NL,X,komp}$		Komplexes kompensiertes Symbol der X-Polarisation im SA-NLC
R_P	A/W	Photodioden-Empfindlichkeit
\hat{r}_X		Korrigiertes komplexes Datensymbol der X-Polarisation
r_X		Komplexes Datensymbol der X-Polarisation
$r_{X,av}$		Mit vier potenziertes und gemitteltes komplexes Datensymbol der X-Polarisation
\vec{S}		Stokes-Vektor
S_E		Entzerrte QPSK-Daten
SNR		Signal-Rausch-Verhältnis
S_R		Empfangene QPSK-Daten
S_T		Gesendete QPSK-Daten
\mathbf{T}		SOP-Transformationsmatrix
t	s	Zeit
T	s	Abtastperiode
$T_{CD,RFZ}$	s	Länge der Impulsantwort des CD-Entzerrers – Rechteckfensterung im Frequenzbereich
$T_{CD,RFZ}$	s	Länge der Impulsantwort des CD-Entzerrers – Rechteckfensterung im Zeitbereich
Δt	s	Zeitdifferenz
t_n		Normierte Zeit
T_S	s	Symboldauer
$\hat{\mathbf{U}}$		Matrix zur PMD Schätzung
\mathbf{U}		PMD-Matrix mit beliebigen Hauptachsen
U	\sqrt{W}	Einhüllende des optischen Signals, komplexe Feldamplitude

Symbol	Einheit	Beschreibung
U_ω		Nach ω abgeleitete PMD-Matrix
U_{XY}		Elementare PMD-Matrix
v		Eigenvektor
w		Fensterfunktion
W_M		Impulsantwort der Länge M im Frequenzbereich
w_t		Impulsantwort im Zeitbereich
\vec{x}		Vektor der digitalen Eingangsdaten
x		Komplexwertige Daten/Signale
X		X-Polarisation
\hat{X}_I		digitale Daten Empfänger (X-Pol., Inphase)
X_I		digitale Daten Sender (X-Pol., Inphase)
$X_{I,d}$		digitales Signal (X-Pol., Inphase)
$X_{I,e}$		elektrisches Signal (X-Pol., Inphase)
\hat{X}_Q		digitale Daten Empfänger (X-Pol., Quadratur)
X_Q		digitale Daten Sender (X-Pol., Quadratur)
$X_{Q,d}$		digitales Signal (X-Pol., Quadratur)
$X_{Q,e}$		elektrisches Signal (X-Pol., Quadratur)
x_r		Reelle Hilfsvariable
y		Komplexwertige Daten/Signale
Y		Y-Polarisation
\hat{Y}_I		digitale Daten Empfänger (Y-Pol., Inphase)
Y_I		digitale Daten Sender (Y-Pol., Inphase)
$Y_{I,d}$		digitales Signal (Y-Pol., Inphase)
$Y_{I,e}$		elektrisches Signal (Y-Pol., Inphase)
\hat{Y}_Q		digitale Daten Empfänger (Y-Pol., Quadratur)
Y_Q		digitale Daten Sender (Y-Pol., Quadratur)
$Y_{Q,d}$		digitales Signal (Y-Pol., Quadratur)
$Y_{Q,e}$		elektrisches Signal (Y-Pol., Quadratur)
z	m	Ort; Faserlänge

Naturkonstanten

Symbol	Wert	Einheit	Bedeutung
c_0	299792458	m/s	Vakuumlichtgeschwindigkeit
h	$6,62606896 \cdot 10^{-34}$	Js	Plank'sches Wirkungsquantum
e	2,7182818285		Euler'sche Zahl

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog to Digital Converter)
AGC	Verstärkungsregelung (Automatic Gain Control)
ASE	Verstärkte spontane Emission (Amplified Spontaneous Emission)
ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung (Application Specific Integrated Circuit)
AWGN	Additives weißes gaußsches Rauschen (Additive White Gaussian Noise)
BER	Bitfehlerverhältnis (Bit Error Ratio)
BPSK	Binäre Phasenumtastung (Binary Phase Shift Keying)
CD	Chromatische Dispersion
CDR	Takt- und Datenrückgewinnung (Clock and Data Recovery)
CMA	Algorithmus für einen konstanten Betrag (Constant Modulus Algorithm)
CP-QPSK	Coherent Polarizationmultiplexed QPSK
CPE	Trägerphasenschätzer (Carrier Phase Estimator)
CW	Dauerstrich (Continuous Wave)
DCF	Dispersionskompensierende Faser (Dispersion Compensating Fiber)
DD-LMS	Entscheidungsgeführter Algorithmus kleinster mittlerer Fehlerquadrate (Decision-Directed Least-Mean-Squares Algorithm)
DFB	Distributed Feedback
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DGD	Differentielle Gruppenlaufzeit (Differential Group Delay)
DSP	Digitale Signalprozessierung (Digital Signal-Processing)
ECL	Laser mit externem Resonator (External Cavity Laser)
EDFA	Erbium-dotierter Faserverstärker (Erbium-Doped Fiber Amplifier)
FDE	Frequenzbereichsentzerrer (Frequency-Domain Equalizer)
FEC	Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction)
FFT	Schnelle Fouriertransformation (Fast Fourier-Transformation)
FIR	Endliche Impulsantwort (Finite Impulse Response)

Abkürzung	Bedeutung
FPGA	Im (Anwendungs-)Feld programmierbare Anordnung von (Logik-)Gattern (Field Programmable Gate Array)
FR	Frequenzrückgewinnung (Frequency Recovery)
FSE	Entzerrer mit Überabtastung (Fractionally Spaced Equalizer)
GUI	Graphische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface)
I	Inphase / Realteil
IC	Integrierter Schaltkreis (Integrated Circuit)
IIR	Unendliche Impulsantwort (Infinite Impulse Response)
ISI	Intersymbolinterferenz (Inter Symbol Interference)
ITLA	Integriertes durchstimmbares Lasermodul (Integrated Tunable Laser Assembly)
LMS	Kleinste mittlere Fehlerquadrate (Least-Mean-Squares)
LO	Lokaloszillator
LUT	Lookup-Tabelle (Lookup-Table)
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation
MMSE	Kleinster mittlerer quadratischer Fehler (Minimum Mean-Squared Error)
MSE	Mittlerer quadratischer Fehler (Mean-Squared Error)
MZM	Mach Zehnder Modulator
N-MZM	Nested Mach Zehnder Modulator
NLPN	Nichtlineares Phasenrauschen (Non-Linear Phase-Noise)
NRZ	Non-Return-to-Zero
OEO	Optisch-Elektrisch-Optisch
OOK	Amplitudenumtastung (On-Off Keying)
OPM	Optische Performance Überwachung (Optical Performance Monitoring)
OSNR	Optischer Signal-zu-Rauschabstand (Optical Signal-to-Noise Ratio)
PAPR	Verhältnis von Spitzenleistung und mittlerer Leistung (Peak-to-Average Power Ratio)
PBC	Polarisations-Strahlkoppler (Polarization Beam Combiner)
PC	Personal Computer
PD	Photodiode
PDL	Polarisationsabhängige Verluste (Polarisation Dependent Loss)
PLL	Phasenregelschleife (Phase-Locked Loop)

Abkürzung	Bedeutung
PMD	Polarisationsmodendispersion
PRBS	Pseudo-zufällige Binärsequenz (Pseudo-Random-Binary-Sequence)
PSK	Phasenumtastung (Phase Shift Keying)
PST	Polarisationszustandstransformation (Polarization State Transformation)
Q	Quadratur / Imaginärteil
QAM	Quadraturamplitudenmodulation (Quadrature Amplitude Modulation)
QPSK	Quartäre Phasenumtastung (Quaternary Phase Shift Keying)
RAM	Direktzugriffsspeicher (Random-Access Memory)
RFF	Rechteckfensterung im Frequenzbereich
RFZ	Rechteckfensterung im Zeitbereich
ROSNR	Für ein BER benötigtes OSNR (Required OSNR)
RRC	Wurzel-Kosinus Roll-Off (Root Raised Cosine)
RZ	Return-to-Zero
S	Optisches Signal
SA-NLC	Nichtlineare Kompensation mit automatischer Regelung und geringer Komplexität (Simple Automatic Nonlinear Compensator)
SNR	Signal-zu-Rauschabstand (Signal-to-Noise Ratio)
SOP	Polarisationszustand (State Of Polarization)
SPM	Selbstphasenmodulation (Self-Phase Modulation)
SSMF	Standardfaser (Standard Single-Mode Fiber)
TDE	Zeitbereichsentzerrer (Time-Domain Equalizer)
TIA	Transimpedanzverstärker (Trans-Impedance Amplifier)
TR	Trägerrückgewinnung
UI	Symboldauer (Unit Interval)
VCO	Spannungsgesteuerter Oszillator (Voltage Controlled Oscillator)
WDM	Wellenlängenmultiplex (Wavelength Division Multiplexing)
X	X-Polarisation / horizontale Polarisation
XPM	Kreuzphasenmodulation (Cross-Phase Modulation)
Y	Y-Polarisation / vertikale Polarisation