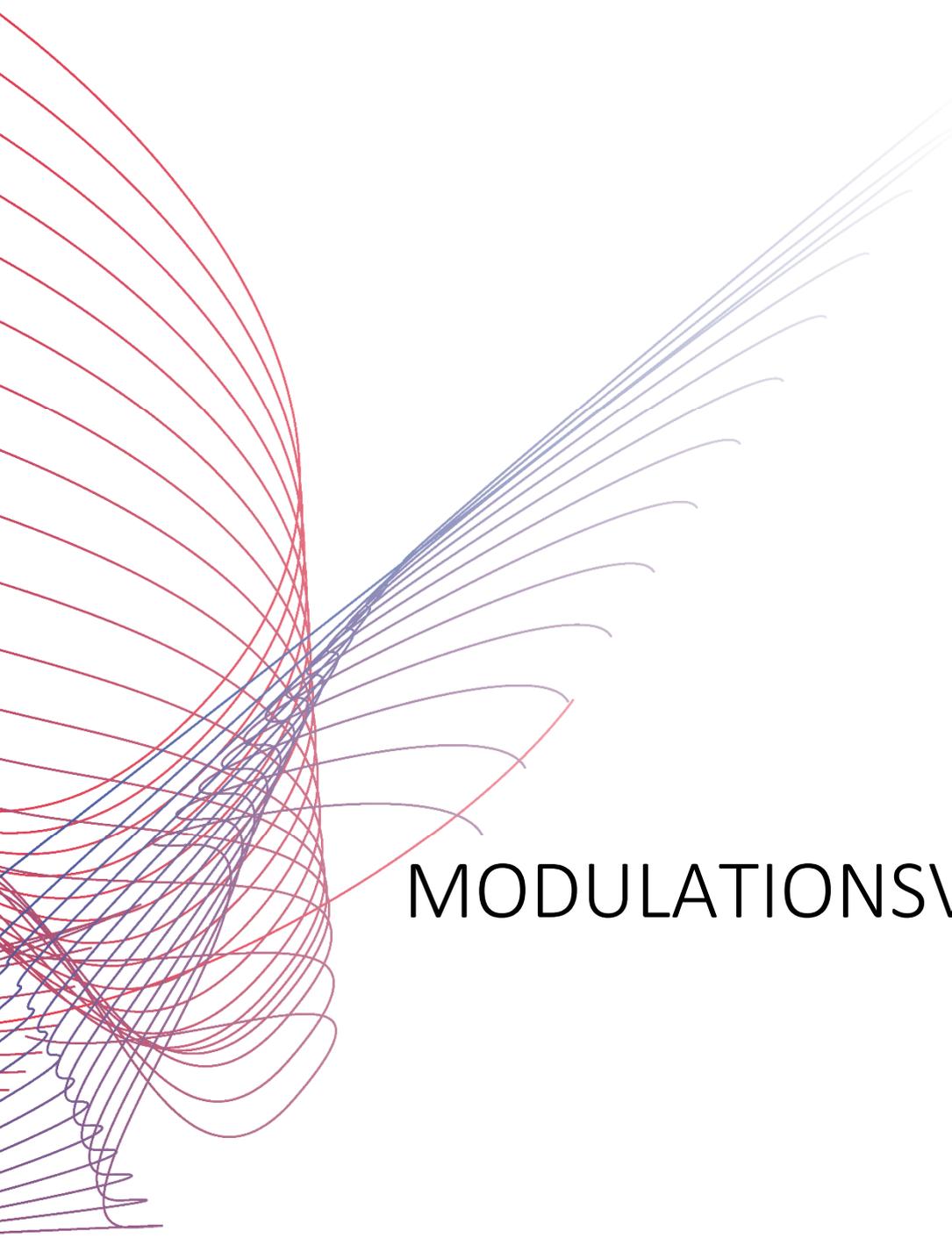




TECH
pedia



MODERNE
MODULATIONSVERFAHREN

MICHAL LUCKI

Titel der Arbeit: Moderne Modulationsverfahren
Author: Michal Lucki
Übersetzt (von): Alena Dvořáková
Veröffentlicht (von): České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktadresse: Technická 2, Prague 6, Czech Republic
Tel.: +420 224352084
Drucken: (nur elektronisch)
Anzahl der Seiten: 37
Ausgabe: 1. Ausgabe, 2017
ISBN 978-80-01-06273-9

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>



Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung (Mitteilung) trägt allein der Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

ERLÄUTERUNG



Definition(en)



Interessantheit (Interessantes)



Bemerkung



Beispiel



Zusammenfassung



Vorteile



Nachteile

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Anpassung der Signale für die Übertragung durch Lichtwellenleiter braucht man eine geeignete Modulation. Die Wahl der besten Modulationsformate stellt eine hohe Übertragungsrates und Informationskapazität der Übertragungssysteme sicher. Jede Modulation wird anders durchgeführt und ist nur für bestimmte Übertragungstypen geeignet. Deshalb sollen Studenten mit den Prinzipien der fortgeschrittenen Modulationsformate bekannt gemacht werden, die einen Bestandteil jedes Optimierungsprozesses der modernen optischen Hochgeschwindigkeits-Übertragungsnetze darstellen.

ZIELE

Dieses Lernmodul hat das Ziel, eine Übersicht der digitalen Modulationsformate einschließlich Amplitudenmodulation, Phasenmodulation, mehrstufiger Modulation und weiterer fortgeschrittener Modulationsverfahren mit einer Kombination von mehreren Parametern vorzustellen. Diese Beschreibung schließt Prinzipien der einzelnen Modulationsverfahren und ihre Vor- und Nachteile ein. Nach dem Durcharbeiten dieses Moduls können die Studenten die beste Modulation für den gegebenen Anwendungsbereich wählen, unter Berücksichtigung der erforderlichen Streckenlänge, der Informationskapazität, des Kanalabstandes usw.

LITERATUR

- [1] M. Lucki, R. Agalliu, R. Zeleny, Limits of advanced modulation formats for transition in fiber optic telecommunication systems to increase speeds from 10, 40, 100 Gb•s⁻¹ to higher bit rates, SPIE Proceedings Volume 9131: Optical Modelling and Design III, Bellingham, USA, 2014.
- [2] R. Agalliu, M. Lucki, System improvements in dense wavelength division multiplexing networks by using advanced optical modulation formats, in Proceedings of 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), IEEE, Budapest, 1-4, 2015.
- [3] L. Bohac, M. Lucki, Optické komunikační systémy, Skriptum von ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04484-1.
- [4] E. Lach, W. Idler, Modulation formats for 100G and beyond, Optical Fiber Technology 17, 377-386, 2011.
- [5] N. Clark, Simulation of Optical Transmission Systems in OptSim, Master Thesis, Thesis supervisor: Dr. Michal Lucki, Prag, 18-23, 2013.
- [6] Kim, H., Essiambre, R., „Transmission of 8 x 20 gb/s dqpsk signals over 310-km smf with 0.8-b/s/hz spectral efficiency“, IEEE Photonics Technology Letters 15(5), 769-771, 2003.

- [7] K. Kim, H.S. Chung, S.H. Chang, J.Ch. Lee, J.H. Lee: Field trial of direct-detection and multi-carrier based 100G transceiver, in Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, S. 1-3, 2014.
- [8] L. Cheng, Z. Li, Y. Yang, Ch. Lu, Y. Fang, H. Jiang, X. Xu, Q. Xiong, Sh. Zhong, Z. Chen, H. Tam, and P. Wai, 8×200-Gbit/s polarization-division multiplexed CS-RZ-DQPSK transmission over 1200 km of SSMF, OptoElectronics and Communications Conference, OECC 1(2), 13-17, 2009.
- [9] S. Shinada, H. Furukawa, N. Wada: Field demonstration of DWDM/NRZ-DQPSK optical packet switching and buffering, in 16th Opto-Electronics and Communications Conference, S. 780-781, 2011.
- [10] V. Ket-Urai, R. Maneekut, P. Kaewplung: Feasibility of 40-Gbps RZ-DQPSK signal transmission over PON, in 17th Opto-Electronics and Communications Conference, S. 319-320, 2012.
- [11] T. J. Xia, G. A. Wellbrock, M. Huang, S. Zhang, Y. Huang, D. Chang, S. Burtsev, W. Pelouch, E. Zak, H. de Pedro, W. Szeto and H. Fevrier, Transmission of 400G PM-16QAM Channels over Long-Haul Distance with Commercial All-Distributed Raman Amplification System and Aged Standard SMF in Field, in Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014.
- [12] X. Zhou, L. E. Nelson, P. Magill, R. Isaac, B. Zhu, D. W. Peckham, P. I. Borel and K. Carlson, High Spectral Efficiency 400 Gb/s Transmission Using PDM Time-Domain Hybrid 32–64 QAM and Training-Assisted Carrier Recovery, Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, Ausgabe 7, S. 999 - 1005, 2013.
- [13] B. Zhu, D. W. Peckham, X. Jiang, and R. Lingle Jr, System Performance of Long-Haul 112-Gb/s PDM-QPSK DWDM Transmission over Large-area Fiber and SSMF Spans, in Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference and Exhibition, 2013.
- [14] J. Renaudier, O. Bertran-Pardo, G. Charlet, M. Salsi, H. Mardoyan, P. Tran, and S. Bigo, "8 Tb/s Long Haul Transmission Over Low Dispersion Fibers Using 100 Gb/s PDM-QPSK Channels Paired With Coherent Detection", Bell Labs Technical Journal, Vol. 14, Ausgabe 4, S. 27-45, 2010.
- [15] J. Karaki, E. Pincemin, D. Grot, T.Guiliossou, Y. Jaouen, R. le Bidan and T. le Gall, Dual-Polarization Multi-Band OFDM versus Single-Carrier DP-QPSK for 100 Gbps Long-Haul WDM Transmission over Legacy Infrastructure, in Optical Communications (ECOC), 38th European Conference and Exhibition, 2012.
- [16] Ch. Laperle, B. Villeneuve, Zh. Zhang, D. Mcghan, H. Sun and M. O’Sullivan, WDM performance and PMD Tolerance of a Coherent 40-Gbit/s Dual-Polarization QPSK Transceiver, Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, Ausgabe 1, 2008.
- [17] G. Raybon, S. Randel, A. Adamiecki, P. J. Winzer, L. Salamanca, R. Urbanke, S. Chandrasekhar, A. Konczykowska, F. Jorge, J. Dupuy, L. Buhl, S. Draving, M. Grove,

and K. Rush, 1-Tb/s dual-carrier 80-GBaud PDM-16QAM WDM transmission at 5.2 b/s/Hz over 3200 km, *Photonics Conference (IPC)* 1(2), 23-27, 2012.

- [18] Y. Ma, Q. Yang, Y. Tang, S. Chen, W. Shieh, 1-Tb/s Single-Channel Coherent Optical OFDM Transmission With Orthogonal-Band Multiplexing and Subwavelength Bandwidth Access, *Journal of Lightwave Technology* 28(4), 308-315, 2010.
- [19] P. J. Winzer, J. Essiambre, Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks, *Journal of Lightwave Technology* 24(12), 4711- 4728, 2006.
- [20] P. J. Winzer, High-Spectral-Efficiency Optical Modulation Formats, *J. Lightwave Technology*, Vol. 30, Nr. 24, S. 3824-3835, 2012. D. Wang, D. Lu, C. Lou, L. Huo, W. Yu: Performance comparison of phase modulated formats in 160 Gb/s transmission system, in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, S. 1-6, Nov. 2011.
- [21] S. Ghoniemy, K.F. George and L. MacEachern, Performance Evaluation and Enhancements of 42.7 Gb/s DWDM Transmission System using Different Modulation Formats, in *Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference*, S. 189-194, 2011.
- [22] D. Wang, D. Lu, C. Lou, L. Huo and W. Yu, Performance Comparison of Phase Modulated Formats in 160 Gb/s Transmission System, in *Communications and Photonics Conference and Exhibition, ACP, Asien*, 2011.
- [23] Petr Jareš, Moderní modulační metody a jejich aplikace, Inovace předmětů a studijních materiálů pro e-learningovou výuku v prezenční a kombinované formě studia, teaching module, Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering

Inhaltsverzeichnis

1	Digitale Amplitudenmodulationen: AMI, DB, CSRZ.....	8
1.1	Grundlegende Einteilung der digitalen optischen Modulationen.....	8
1.2	CSRZ.....	11
1.3	Kombinierte Sende-Empfangsgeräte (Transceiver) für optische Modulationen.....	13
1.4	AMI-Modulation	15
1.5	DB-Modulation	17
2	Phasenmodulationen: DPSK und QPSK	19
2.1	DPSK.....	19
2.2	QPSK- und DQPSK-Modulationen.....	21
3	Fortgeschrittene Aspekte der optischen Modulationen zum Erzielen einer hohen Übertragungsrate und Beständigkeit gegen Signalverschlechterung	24
3.1	Polarisationsmultiplex bei QPSK-Modulation für Übertragungsraten in der Größenordnung von einigen Terabits	24
3.2	Netzkonvergenz: Koexistenz der Amplituden- und Phasenmodulation in einer Glasfaser	27
3.3	Kreuzphasenmodulation durch Koexistenz der Phasen- und Amplitudenmodulation	29
3.4	Vermeidung nichtlinearer Ereignisse hervorgerufen durch fortgeschrittene Modulation	30
3.5	Beständigkeit der digitalen Modulationen gegenüber Dispersion bei hohen Geschwindigkeiten	31
3.6	OFDM – Multiträger-Modulation – Prinzip, Anwendung	32
3.7	OFDM – Multiträger-Modulation – Parameter, Vorteile, Einschränkungen	34
3.8	VDMT – fortgeschrittene Vektormodulation – Prinzip, Anwendung.....	35
3.9	Schlussfolgerung	37

1 Digitale Amplitudenmodulationen: AMI, DB, CSRZ

1.1 Grundlegende Einteilung der digitalen optischen Modulationen



In einem optischen Kommunikationssystem können Informationen in Form von optischen Symbolen übertragen werden, die von einer modulierten Quelle der optischen Strahlung erzeugt werden.

Ziele

- Das grundlegende Ziel der Modulation besteht in der Anpassung des Informationssignals an die Form, die im Informationskanal übertragen werden kann.
- Ein weiteres Ziel ist dabei die Reduzierung der chromatischen Dispersion. Unter der chromatischen Dispersion versteht man eine Änderung der Breite des optischen Pulses wegen einer unterschiedlichen Geschwindigkeit der einzelnen Frequenzkomponenten im Laserpuls.
- Und nicht zuletzt soll die Modulation die Entstehung der Folgen von logischen Nullen oder Einsen verhindern, die Probleme mit dem Takt verursachen (Timing der Sendung von optischen Pulsen, die für ihre richtige Detektion notwendig ist).

Klassifikation

Es gibt viele Modulationsformate, die vor allem in der Kommunikation mittels Lichtwellenleitern verwendet werden. Sie können nach dem Parameter klassifiziert werden, der moduliert wird – z. B. der Amplitude oder der Phase des Signals.

- Amplitudenmodulationen:
 - **OOK** – *On-Off Keying* - bipolare Modulation „leuchtet - leuchtet nicht“
 - **AMI** – *Alternate Mark Inversion* - bipolare Modulation
 - **DB** – *Duobinary Modulation* - duobinäre Modulation
 - **CRZ** – *Chirp Return to Zero* - gechirpte Modulation mit Rückkehr zur Null
 - **CSRZ** – *Carrier Suppressed Return to Zero* - bipolare Modulation mit unterdrücktem Träger und Rückkehr zur Null

- Frequenzmodulationen:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* - orthogonales Frequenzmultiplexverfahren
 - **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* - diskrete Multitone-Vektormodulation
- Phasenmodulationen:
 - **PSK** – *Phase Shift Keying* - Phasenumtastung
 - **BPSK** – *Binary Phase Shift Keying* - binäre Phasenumtastung
 - **DPSK** – *Differential Phase Shift Keying* - differenzielle Phasenumtastung
 - **QPSK** – *Quadrature Phase Shift Keying* - Quadraturphasenumtastung
- Formate mit einer Kombination der Amplitudenmodulation, Phasenmodulation und Polarisation des Signals:
 - **PM-QPSK** – *Polarization Multiplexing QPSK* - Polarisationsmultiplex QPSK
 - **QAM** – *Quadrature Amplitude Modulation* - Quadraturamplituden-Modulation
 - 16-QAM, 64-QAM
- Multiträger-Modulationen - *Multi-Carrier Modulation (MCM)*:
 - **OFDM** – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - orthogonales Frequenzmultiplexverfahren
 - **DMT** – *Discrete Multi-Tone* - diskrete Multitone-Modulation
 - **VDMT** – *Vectored Discrete Multi-Tone* - diskrete Multitone-Vektormodulation

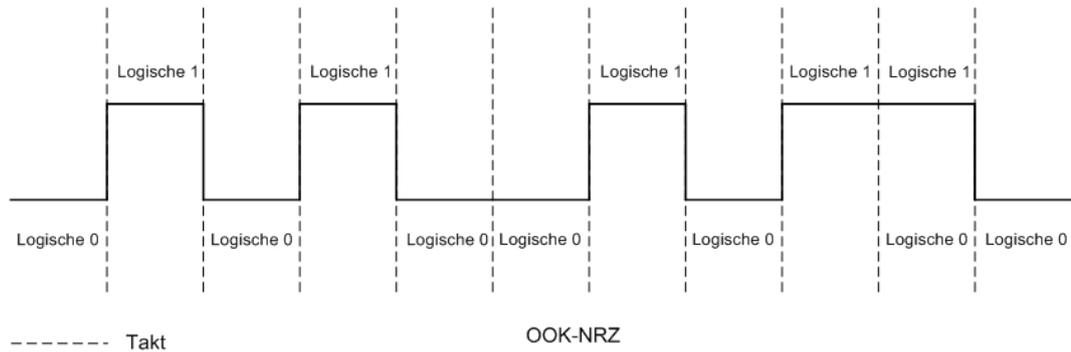
Die oben angeführten Modulationen (unter anderen) werden in der optischen Kommunikation verwendet. Diese Formate werden erfolgreich in Hochgeschwindigkeits-Übertragungssystemen eingesetzt.

Eines der meistbenutzten Formate ist die OOK-Modulation, bei welcher der logischen 1 eine gewisse Leistungsebene des Lasers zugeordnet wird. Der logischen 0 entspricht die Abwesenheit des Laserpulses. Das optische Symbol kann den ganzen Takt andauern, der für ein Informationsbit bestimmt ist. Dann handelt es sich um die Variante der Modulation ohne Rückkehr zur Null (engl. *Non-Return-to-Zero*, **NRZ**). Oder es kann nur einen Teil davon besetzen; dann spricht man von der Variante mit der Rückkehr zur Null (engl. *Return-to-Zero*, **RZ**). Es kann sich beispielsweise um ein Symbol handeln, das mit der steigenden Flanke des Laserpulses anfängt und im Verlauf des Taktes zur Null zurückkehrt, z. B. in der Mitte des Bitintervalls.

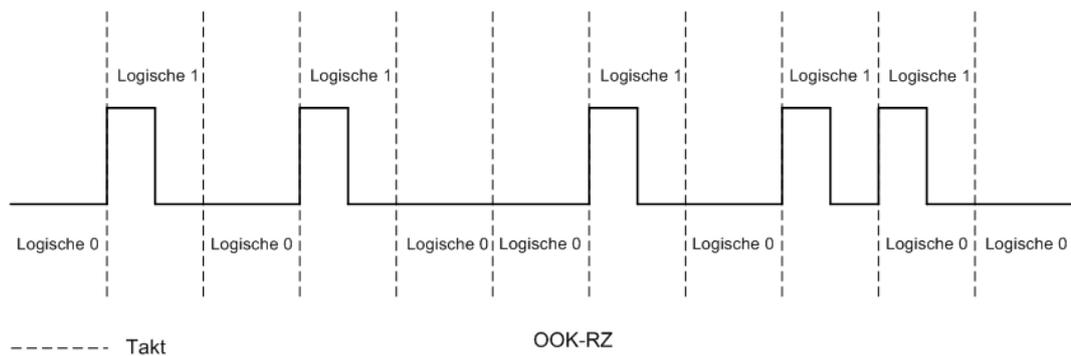
Es gibt jedoch viele andere Möglichkeiten der Implementierung von RZ. Das Symbol muss weder genau eine Hälfte des Bitintervalls dauern, noch auf der steigenden/fallenden Flanke des optischen Pulses anfangen/enden.



Der Hauptvorteil von kürzeren optischen Symbolen besteht in ihrer höheren Beständigkeit gegenüber einer Dispersion (Erweiterung des Pulses wegen unterschiedlicher Geschwindigkeiten oder der optischen Strecke für die einzelnen Komponenten, d. h. Frequenzen, Moden), die zur Intersymbolinterferenz (engl. *Inter-Symbol Interference, ISI*) führt.



Prinzip der OOK-NRZ-Modulation.



Prinzip der OOK-RZ-Modulation.

1.2 CSRZ

Modulationsprinzip

$E = m \cdot c^2$

Bei der Modulation *Carrier-Suppressed Return-to-Zero (CSRZ)* ändert sich die Phase auf dem optischen Träger um π bei jedem Bit ohne Rücksicht auf seinen logischen Wert (0 oder 1). Die Änderung der Phase verursacht eine Unterdrückung der Trägerfrequenz der optischen Strahlung. Im Frequenzspektrum auf der Trägerfrequenz gibt es keine Leistungsspitze. Die Energie wird hauptsächlich auf den benachbarten Frequenzen übertragen, wo sie viel niedriger ist. In der Praxis heißt das, dass die Anforderungen an die optische Leistung auf der zentralen Frequenz des Modulationsspektrums reduziert werden.

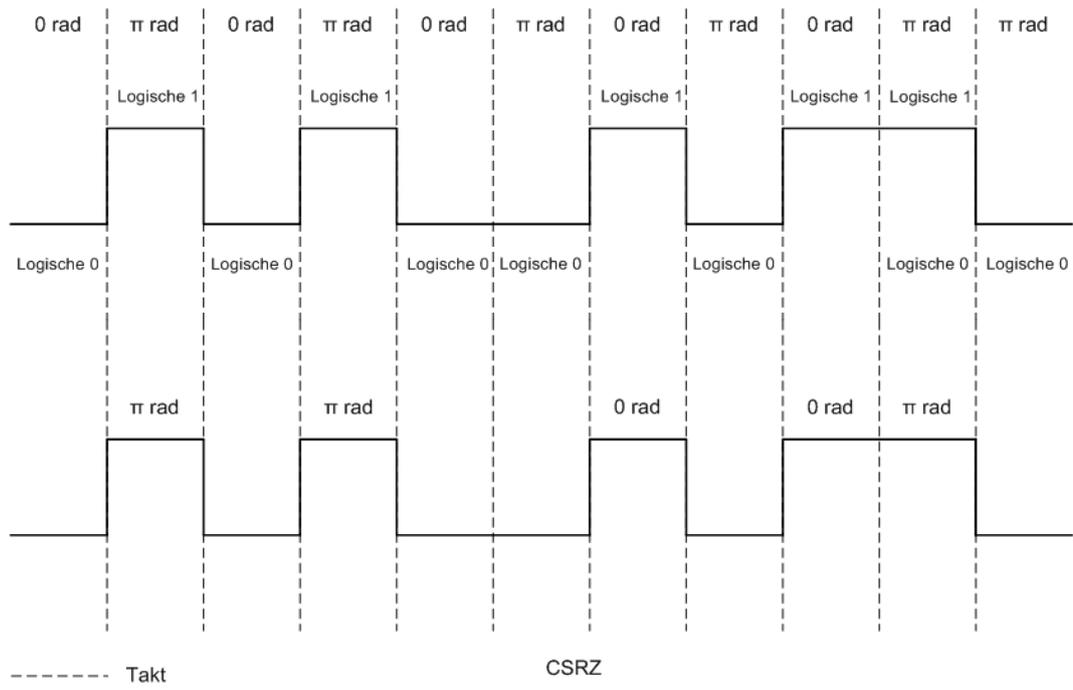
i

Die Phasen der binären Sequenz werden abgezogen, die Hauptspitze auf der Trägerfrequenz wird unterdrückt und infolgedessen wird die Leistung sinken, die hauptsächlich in anderen Teilen des Spektrums verteilt wird. Die Feldintensität sinkt zwischen den aufeinander folgenden Bits (RZ) gegen Null und die Phase der elektromagnetischen Strahlung wird zwischen den benachbarten Bits um π verschoben. Zum Beispiel: Falls die Phase des Signals bei geraden Symbolen (Bit Nummer $2n$) Null beträgt, wird die Phase der Strahlung für ungerade Symbole ($2n + 1$) π sein.

Vorteile

+

- Im Vergleich mit RZ-OOK wird CSRZ-OOK vor allem dank eines engeren Spektrums als „toleranter“ gegenüber Filterung und beständiger gegenüber chromatischer Dispersion betrachtet.
 - Die CSRZ-Signale haben eine unterdrückte Leistungsspitze auf der Trägerfrequenz – die Leistung auf dem Träger beträgt Null.
-



Prinzip der CSRZ-Modulation.

1.3 Kombinierte Sende-Empfangsgeräte (Transceiver) für optische Modulationen

$E = m \cdot c^2$

Ein Sende-Empfangsgerät (Transceiver) ist ein Gerät, das aus einem Sender und einem Empfänger besteht, die elektronische Kreise und/oder ein gemeinsames Gehäuse teilen. Transceiver arbeiten als Sender, wenn sie das Signal, das ins Übertragungsmedium (z. B. Lichtwellenleiter) gebracht wird, modulieren - codieren. Sie arbeiten auch als Empfänger, wenn sie Daten von der anderen Seite empfangen, demodulieren und decodieren.



Bei einer Übertragung in beiden Richtungen (z. B. Duplexübertragung) werden von Transceivern Daten sowohl gesendet als auch empfangen (z. B. abwechselnd oder gleichzeitig im Duplex).

Als Quelle der Symbole in optischen Netzen kann der sendende Teil einen Laser verwenden; der empfangende Teil hat eine Photodiode, die das optische Signal auf ein elektrisches transformiert. Das elektrische Signal wird weiter verarbeitet z. B. durch einen *digitalen Signalprozessor (DSP)*.

Kombinierte Sende-Empfangsgeräte (Transceiver) für CSRZ-Modulation



Die Phase jedes weiteren binären Symbols wird um π verschoben. Man verwendet den *Mach-Zehnder Modulator (MZM)* zur Erzeugung von Symbolen, die gleiche Form und verschobene Phase besitzen. Dieses Signal hat die gleiche Geschwindigkeit wie das Informationssignal.



Das Informationssignal in der Form von elektronischen Pulsen wird in den Modulator gesendet und die auf der Basis des „kontrollierenden“ Signals im Modulator hergestellten Pulse mit einer abwechselnden Phase werden gesendet oder unterdrückt. Das resultierende Signal ist dann das Ergebnis dieser zwei Signale.

- Der NRZ-Sender verwendet einen Laser im kontinuierlichen Betrieb mit einer externen Modulation durch Mach-Zehnder Modulator. (Ein kontinuierlicher Betrieb besteht in der Emission eines stetigen elektromagnetischen Feldes. Im Unterschied dazu wird im Pulsbetrieb der Laser nur in gewissen Zeitintervallen aktiv.) Man muss Parameter einstellen, wie zum Beispiel die Bitrate, die Laserfrequenz, die Halbwertsbreite (engl. *full width at half maximum*, **FWHM**), die Ausgangsleistung des Lasers, sowie den vom Modulator verursachter Verlust.
- Im Unterschied zu NRZ wird bei RZ ein Kosinus-Format im elektrischen Generator (engl. *raised cosine*) verwendet. Es handelt sich um einen Filter, der

zur Formung von Pulsen in digitalen Modulationen eingesetzt wird. Der Teil des Frequenzspektrums, der nicht Null beträgt, ist die Kosinusfunktion, die sich über der horizontalen Achse befindet.

- Bei CSRZ wird das optische NRZ-Signal mit einem anderen MZM nachfolgend moduliert, der vom sinusförmigen Signal mit der Frequenz gesteuert wird und die Hälfte der Bitrate beträgt.
 - Jede zwei benachbarte Bits sind in der Phase um π zwecks Unterdrückung des Trägers bei dem generierten modulierten CSRZ-Signal verschoben.
 - Für NRZ, RZ und CSRZ wird ein komplexer Modulator mit einem Photodetektor, einem elektrischen Verstärker und einem Filter angewendet.
-

1.4 AMI-Modulation

In der Telekommunikation werden Leitungscodes verwendet, bei denen zwei Spannungsebenen mit einer gegenseitigen Polarität wichtig sind. Ein Leitungscodierung ist ein Verfahren der Repräsentation des digitalen Signals zur Übertragung durch elektrisches Kabel mittels einer eindeutigen Funktionszuordnung von einigen Ebenen der physikalischen Größe (meistens handelt es sich um Strahlungsintensität oder Amplitude) zu logischen Bits, ohne dass komplexe Algorithmen zur Herstellung von Symbolen notwendig sind. Die Codewörter unterscheiden sich in der Polarität (Phase) der Strahlung zwecks Minimierung der Ungleichheit (Verhältnis der Anzahl von Symbolen mit der gegebenen Polarität zur Anzahl der Symbole mit der umgekehrten Polarität) der längeren Sequenzen von logischen Symbolen.

Modulationsprinzip

Das einfachste Beispiel des Paar-Ungleichheitscodes (engl. paired disparity code) ist der **AMI-Code** (engl. *Alternate Mark Inversion*). Diese Modulation verwendet drei logische Ebenen. Den ersten zwei entsprechen zwei bipolare Ebenen „+“ und „-“. Der dritte Zustand ist Null.

$E = m \cdot c^2$

Der logischen Null entspricht der Zustand der Abwesenheit des optischen Pulses (Nullspannung des elektrischen Pulses). Die logische Eins wird mit dem Laserpuls repräsentiert, dessen Phase für jede weitere Eins in die Gegenphase gedreht wird (das entspricht der positiven und negativen Spannung bei elektrischen Pulsen). Die binäre Eins wird als „Mark“ und die binäre Null als „Space“ bezeichnet.

Vorteile

Hauptvorteile der Leitungscodes mit bipolarer Codierung:

+

- Der Einsatz des bipolaren Codes bei metallischen Leitungen verhindert die Zunahme der Gleichstromkomponente und ermöglicht, dass das Kabel zur Signalübertragung über längere Entfernung verwendet werden kann.
- AMI hilft bei Aufrechterhaltung der Synchronisierung von Sender und Empfänger, vor allem für lange Sequenzen von logischen Einsen, die für NRZ problematisch sind (für jede Eins gibt es eine andere Polarisierung, umgekehrte Phase oder Spannungsebene). Ein zusätzliches Übertragungsmedium für ein Taktsignal ist nicht erforderlich.
- Fehlererkennung. Ein AMI-Signal wird in regelmäßigen Intervallen wiederhergestellt. Die Parameter *Signal-Rauschabstand* (engl. *Signal to Noise Ratio*, **SNR**) und *Bitfehlerrate* (engl. *Bit Error Rate*, **BER**) bestimmen die Fehlerrate. Beispielsweise kann eine Eins vom Empfänger fehlerhaft als Null und eine Null im Gegenteil dazu als positive Spannung oder optische Leistung ausgewertet werden. AMI ermöglicht die Erkennung eines Fehlers in der

gegebenen Sequenz, weil die Verletzung des Prinzips der Bipolarität erkannt wird (jedes weiteres Symbol ungleich null hat eine umgekehrte Polarität).

Nachteile



- Lange Nullfolgen sind wegen eines eventuellen Verlustes von Synchronisierung (Taktrückgewinnung) problematisch.
-



Die Lösung besteht in Hinzufügen einer logischen Eins nach sieben logischen Nullen und damit wird die Synchronisierung aufrechterhalten. Bei der Decodierung wird dieses Symbol beseitigt.

1.5 DB-Modulation

Modulationsprinzip

Die *duobinäre Modulation (DB)* hat drei logische Zustände.

$E = m \cdot c^2$

Die logische Null stellt die Abwesenheit des Laserpulses und die logische Eins das Laserpuls mit einer alternierenden Phase dar, die aufgrund der vorigen Symbole wie folgt bestimmt wird.

Die Phase des binären Symbols wird um π verschoben, falls eine ungerade Anzahl von logischen Nullen zwischen zwei logischen Einsen auftritt.

Das Prinzip der DB-Modulation kann mit RZ oder NRZ kombiniert werden.

- *Non-return-to-zero (NRZ)* ordnet einer logischen Eins den Laserpuls für das ganze Bitintervall zu, wobei Nullen durch Absenz des Laserpulses repräsentiert werden.
- *Return-to-zero (RZ)* ordnet einer logischen Eins den Laserpuls für einen gewissen Teil des Bitintervalls zu, wobei Nullen wieder durch Absenz des Laserpulses repräsentiert werden.

i

Die Verkürzung der Pulslänge gegenüber der Symbollänge (Rückkehr zur Null) ist insbesondere bei einer Folge von zwei oder mehr Einsen nacheinander vorteilhaft. Damit kann das Problem der Synchronisierung der logischen Einsen gelöst werden.

Vorteile

Vorteile der DB-Modulation:

+

- Hohe Beständigkeit gegen chromatische Dispersion (engl. *chromatic dispersion, CD*).
- Einfache Schmalbandfilterung (DB hat ein schmales Spektrum), die mit dem Spektrum der Modulation *Differential Quadrature Phase Shift Keying - DQPSK* verglichen werden kann. Dieses Format ist für DWDM-Netze mit einem engen Kanalabstand geeignet, z. B. 12,5 GHz.
- Die DB-Modulation ist ein einziges Intensitätsmodulationsformat, das auch über große Entfernungen stabil ist, z. B. 130 km ohne Rückgewinnung. Die Leistungsfähigkeit der DB-Modulation kann mit der Leistungsfähigkeit der Phasenmodulationen verglichen werden, insbesondere DQPSK.
- Die DB-Modulation ist effizienter als NRZ-DQPSK und CSRZ-DQPSK hinsichtlich Anforderungen an Finanzaufwendungen und Konstruktion des Senders.

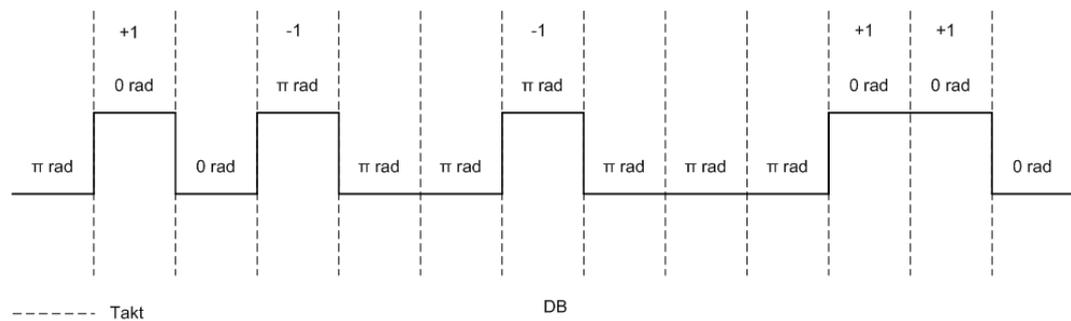
Konstruktion des Sende-Empfangsgerätes:



Der DB-Sender besteht aus einem Amplituden-MZM mit zwei Armen, der zwei elektrische Eingänge verarbeitet:

- Den ersten Eingang stellt ein übliches elektrisches Signal dar, das durch pseudozufällige binäre Sequenzsignale beim Durchgang durch einen NRZ-Codierer und einen Tiefpass erreicht wird.
- Der zweite Eingang führt die logische Operation NOT auf dem logischen Eingang durch, durch den das Signal in die Richtung zum NRZ-Codierer und elektrischen Filter durchgeht.
- Als Strahlungsquelle wird ähnlich wie bei NRZ ein Laser im kontinuierlichen Betrieb verwendet.

Auf dem folgenden Bild entspricht +1 der Phase 0 und -1 der Phase π und ihren ungeraden Vielfachen.



Prinzip der DB-Modulation – die Phase des Symbols wird um π Radianen bei einer ungeraden Anzahl von logischen Nullen (1, 3, 5...) verschoben.

2 Phasenmodulationen: DPSK und QPSK

2.1 DPSK

Modulationsprinzip

Ähnlich wie bei OOK kann DPSK auch in zwei Varianten realisiert werden: RZ und NRZ.

$E = m \cdot c^2$

Es handelt sich um einen Typ der Phasenmodulation, der die Phase der Trägerwelle ändert. Das Prinzip der Modulation wird wie folgt charakterisiert.

- Die Trägerphase wird um 180° für eine logische Eins gedreht.
- Für die logische Null wird die Phase nicht gedreht, sie bleibt wie bei dem vorigen Symbol gleich.

Vorteile

+

Der Hauptvorteil der DPSK-Modulation besteht in einer Verbesserung um 3 dB, die eine bessere Empfindlichkeit des Empfängers im Vergleich zur OOK-Modulation bedeutet. Die optische Leistung für die einzelnen Modulationszustände ist niedriger wegen der Modulation von Phasenunterschieden anstatt absoluter Phasen- oder sogar Amplitudenwerten.

Die unterschiedliche Effektivität bei NRZ-DPSK und RZ-DPSK wird primär durch die Spektrumbreite gegeben, die beim RZ-DPSK-Format größer ist.

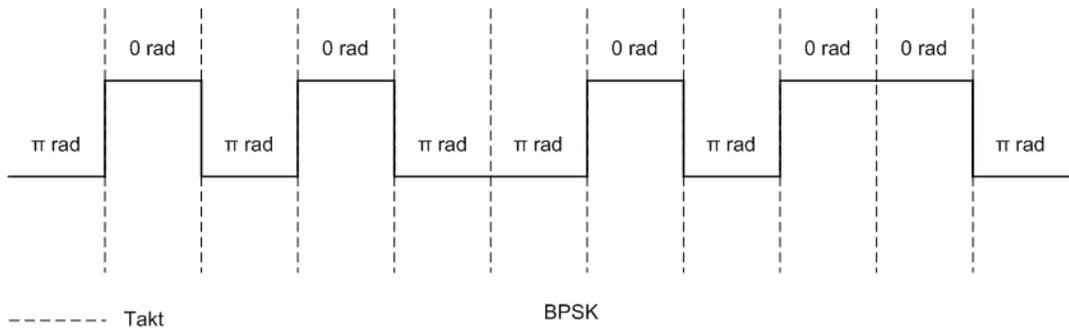
Kombinierte Sende-Empfangsgeräte für DPSK-Modulation

Konstruktion des Sende-Empfangsgerätes:

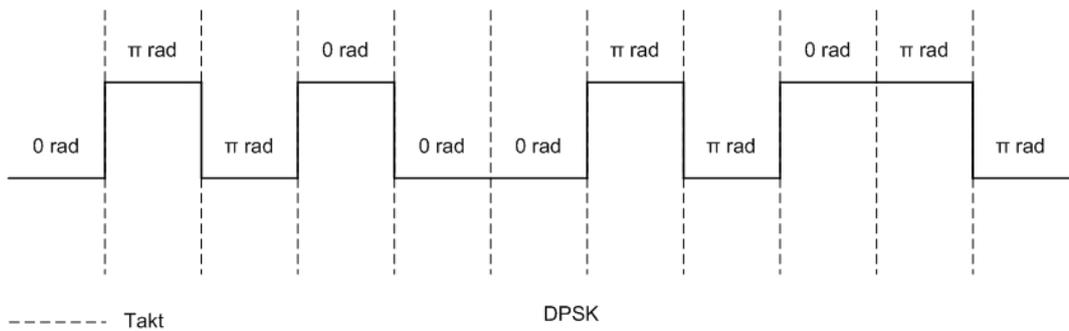
i

- NRZ-DPSK-Sender sind ähnlich wie Sender bei Amplituden-NRZ. Anstatt des MZM wird ein Phasenmodulator mit Phasenverschiebung um 180° verwendet.
- Zum Ausgleich einer ungenauen Umwandlung des elektrischen Signals in ein optisches Signal wird ein Tiefpassfilter eingesetzt.
- Der RZ-DPSK-Sender beinhaltet einen zusätzlichen Modulator zum Generieren von resultierenden RZ-Pulsen.
- Der DPSK-Empfänger besteht aus einem Verzögerungsleitung-Interferometer zur Decodierung und einem ausgewogenen Empfänger, der aus zwei üblichen zusammengesetzten Empfängern besteht. Dabei wird der elektrische Ausgang

des ersten Empfängers mit dem invertierten Ausgang des anderen Empfängers summiert.



Prinzip der BPSK-Modulation – den logischen Nullen und Einsen entsprechen Phasenzustände, die um π voneinander verschoben werden, z. B. der logischen Null wird die Phase π und der logischen Eins die Phase 0 Radianen zugeordnet.



Prinzip der DPSK-Modulation – die logische Eins verschiebt die Phase um π , die logische Null verschiebt Phasen nicht.

2.2 QPSK- und DQPSK-Modulationen

Modulationsprinzip

Differential Quadrature Phase-Shift Keying (DQPSK) ist eine mehrstufige Modulation mit Quadraturphasenumtastung.

$E = m \cdot c^2$

QPSK entspricht zwei unabhängigen BPSK-Systemen und hat deshalb eine ähnliche Leistung aber eine doppelte spektrale Effizienz.

- Den Bitpaaren werden einzelne Phasen zugeordnet, zum Beispiel:
 - 00 → 45°
 - 01 → 135°
 - 10 → 315°
 - 11 → 225°

i

Es gibt viele Varianten von QPSK – man kann den Bitpaaren unterschiedliche Phasenzustände zuordnen und die benachbarten Paaren können auch unterschiedlich sein.

$E = m \cdot c^2$

- Bei der DQPSK-Modulation entsprechen Bitpaare gegebenen Phasenverschiebungen (nicht konkreten Phasenwerten) gegenüber der Anfangsphase oder mit anderen Worten um 90° zwischen den benachbarten Symbolen.
- Man kann die Anfangsphase als 0° voraussetzen (aber in der Praxis kann sie ungleich null sein).
 - 00 → Verschiebung um 0° gegenüber dem Anfangsphasenwert
 - 01 → Verschiebung um 90° gegenüber dem Anfangsphasenwert
 - 10 → Verschiebung um 180° gegenüber dem Anfangsphasenwert
 - 11 → Verschiebung um 270° gegenüber dem Anfangsphasenwert

Vorteile

+

- Die Symbolrate ist um die Hälfte langsamer als die Bitrate.

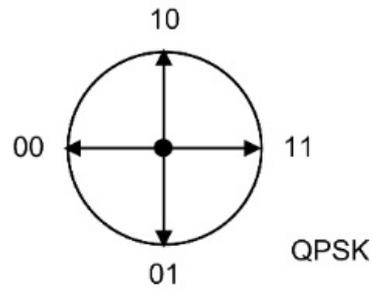
- DQPSK hat ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *Signal to Noise Ratio*, **SNR**). Die Leistungsebene des nützlichen Signals ist viel höher als der Rauschpegel.
 - Beständigkeit gegen Polarisationsmodendispersion dank längerer Symbole.
 - Erhöhte Beständigkeit gegen chromatische Dispersion.
 - Enges optisches Spektrum.
 - NRZ-DQPSK ist vielversprechend für Hochgeschwindigkeitsübertragungen sogar in der Größenordnung von einigen Terabits.
 - DQPSK ist für *passive optische Netze (PON)* mit 40 Gbit/s geeignet.
 - RZ-DQPSK ermöglicht eine Verlängerung der optischen Reichweite.
 - RZ-DPSK ist gegen optische Nichtlinearitäten für einen Kanal mit 160 Gbit/s beständig.
 - Unter den DQPSK-Formaten können die höchsten Werte des Q-Faktors für jeden optischen Kanal bei RZ-DQPSK erzielt werden.
-

Kombinierte Sende-Empfangsgeräte (Transceiver)

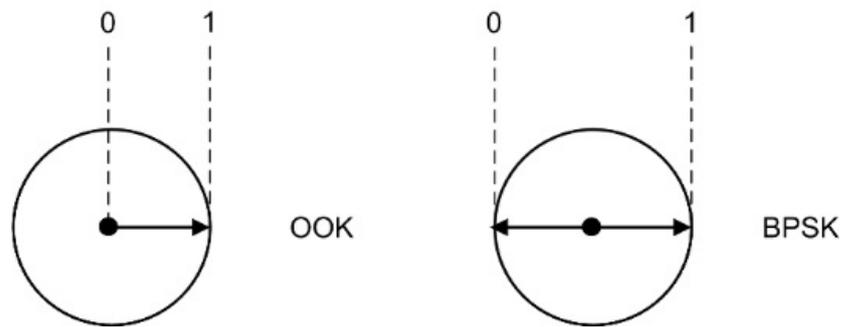
Konstruktion des Sende-Empfangsgerätes:



- Ein NRZ-DQPSK-Sender besteht aus zwei Codierern: sowohl das Phasen- als auch das Quadratursignal wird in die elektrische Wellenform umgewandelt, die von zwei MZM gesteuert werden.
 - Der Laser im kontinuierlichen Betrieb wird für beide MZM verwendet. Der Ausgang eines der Modulatoren geht durch einen Phasenmodulator zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung um 90° durch, die für die Quadraturkomponente erforderlich ist.
 - Die beiden Signale werden kombiniert, um ein moduliertes DQPSK-Signal herzustellen.
 - Das Sende-Empfangsgerät enthält zusätzlich zwei Tiefpassfilter zwischen dem Generator des elektrischen Signals und den MZM, um die Umwandlung des binären Signals ins elektrische Signal zu verbessern.
 - Bei RZ-DQPSK wird ein zusätzlicher MZM zur Realisierung von RZ eingesetzt.
 - Ein DQPSK-Empfänger verwendet zwei DPSK-Empfänger für Empfang von Quadratur- und Phasensignal. Jeder dieser Empfänger besteht aus einem einstellbaren MZI und zwei PIN-Detektoren.
-



Prinzip der QPSK-Modulation. Beispiel des Konstellationsdiagramms. Den Bitpaaren werden einzelne Symbole zugeordnet. Weil es vier Kombinationen von zwei Bits gibt, hat die Modulation vier Zustände.



Beispiel des Konstellationsdiagramms der OOK- und BPSK-Modulation. Im Konstellationsdiagramm werden Phase und Amplitude angezeigt.

3 Fortgeschrittene Aspekte der optischen Modulationen zum Erzielen einer hohen Übertragungsrate und Beständigkeit gegen Signalverschlechterung

3.1 Polarisationsmultiplex bei QPSK-Modulation für Übertragungsraten in der Größenordnung von einigen Terabits

Multiplex von Modulationszuständen der Polarisation

i

Der Polarisationsmultiplex (engl. *Polarization Division Multiplexing*, **PDM**) ist in der englischen Literatur auch als duale Polarisation (dual polarization) oder orthogonale Polarisation (orthogonal polarization) bekannt. Unter orthogonalen Polarisationskomponenten versteht man unabhängige, sich nicht beeinflussende, idealerweise aufeinander senkrechte Komponenten der Polarisation. PDM-QPSK wurde primär für Hochgeschwindigkeitssysteme mit einer Rate von 100 Gbit/s pro Kanal entworfen.

PDM-QPSK wird oft in der Kombination mit einer kohärenten Detektion (Decodierung) angewendet. Die kohärente Demodulation wird zur Demodulation einer Phase und Frequenz synchron mit dem Träger eingesetzt. Bei einer nicht kohärenten Detektion wird das Problem dieser Synchronisierung nicht gelöst. Ein kohärentes Licht ist ein Licht, dessen Phase vorhergesagt und dessen Phasenverlauf in jeder Periode der elektromagnetischen Welle aufrechterhalten werden kann. Man spricht auch über Korrelation der Phase der gegebenen Quelle gegenüber der kohärenten Referenzquelle der Strahlung. Sonst wird die Phase zufällig geändert.

Vorteile

Vorteile:

+

- Hohe spektrale Effizienz hinsichtlich Verzögerung der Symbolrate gegenüber der Bitrate
- PDM-QPSK ist der wichtigste Kandidat für Transponder mit 100 Gbit/s wegen einer hohen Toleranz der Signalverzerrung.
- PDM-QPSK ist besser als DPQSK auf Kosten der Implementierungskomplexität.
- Diese Modulation ist auch sehr effizient bei Systemen mit 100 Gbit/s pro Kanal und mit Kanalabstand von 50 GHz, bei denen eine Übertragung auf einige

hundert Kilometer möglich ist, unter Zugrundelegung des Einsatzes eines geeigneten Verfahrens zur Dispersionskompensation, Linienverstärkern usw.

Nachteile

Nachteile und Grenzen:



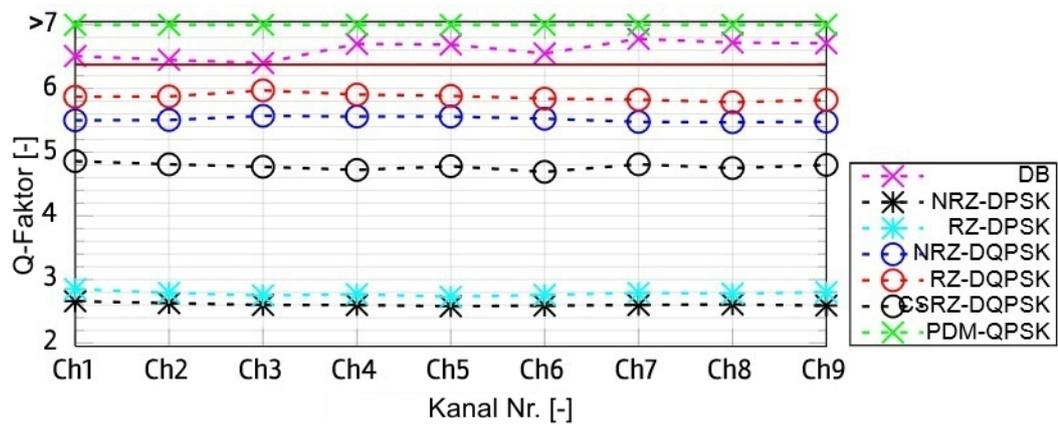
- Kosten der Implementierungskomplexität
 - Hoher Verbrauch der elektrischen Energie
 - Bedarf an schnellere Signalprozessoren
 - Notwendigkeit des Einsatzes von A/D-Wandlern
-

Sende-Empfangsgeräte

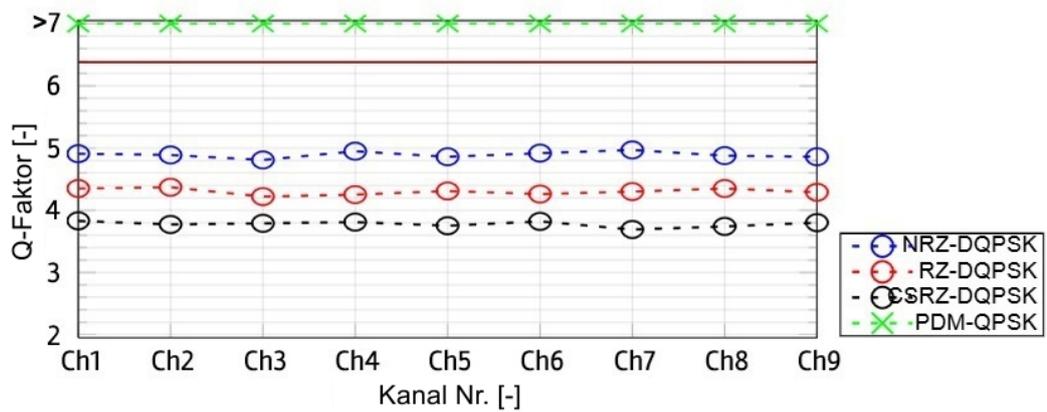
Konstruktion des Sende-Empfangsgerätes:



- Der PDM-QPSK-Sender muss vier Signalkomponenten verarbeiten: Phasen- und Quadraturkomponente, je zwei Polarisationszustände.
 - Zur Umwandlung des binären Signals in ein elektrisches Signal muss ein Tiefpass – Bessel-Filter eingesetzt werden. (Der Bessel-Filter ist ein Filter, in dem die Phasenverschiebung zur Frequenz proportional ist.)
 - Vier elektrische Signale werden dann in zwei QPSK-Modulatoren eingeführt (zwei je Modulator).
 - Das modulierte PDM-QPSK-Signal wird so erzeugt, dass das Ausgangssignal aus einem Modulator durch Polarisator durchgeht und mit dem Signal des anderen QPSK-Modulators kombiniert wird.
 - Der PDM-QPSK-Empfänger schließt viele Elemente ein, z. B. einen unsymmetrischen hybriden 90°-Oszillator, vier PIN-Photodioden für kohärente Detektion, einen Transimpedanzverstärker (Wandler des Stroms in Spannung, der als Operationsverstärker arbeitet), elektronische Filter, einen elektronischen Dispersionskompensator und einen „blinden“ Empfänger ohne Speicher zur Trennung der Phasen- und Quadraturkomponenten und orthogonalen Polarisationen.
-



Übertragung mit 40 Gbit/s durch Monomode-Lichtwellenleiter mit Kanalabstand von 100 GHz und einer Entfernung von 12 km. Die besten Ergebnisse werden beim PDM-QPSK-Format erzielt [2].



Übertragung mit 40 Gbit/s durch Monomode-Lichtwellenleiter mit Kanalabstand von 50 GHz und einer Entfernung von 12 km. Die besten Ergebnisse werden wieder beim PDM-QPSK-Format erzielt [2].

3.2 Netzkonvergenz: Koexistenz der Amplituden- und Phasenmodulation in einer Glasfaser

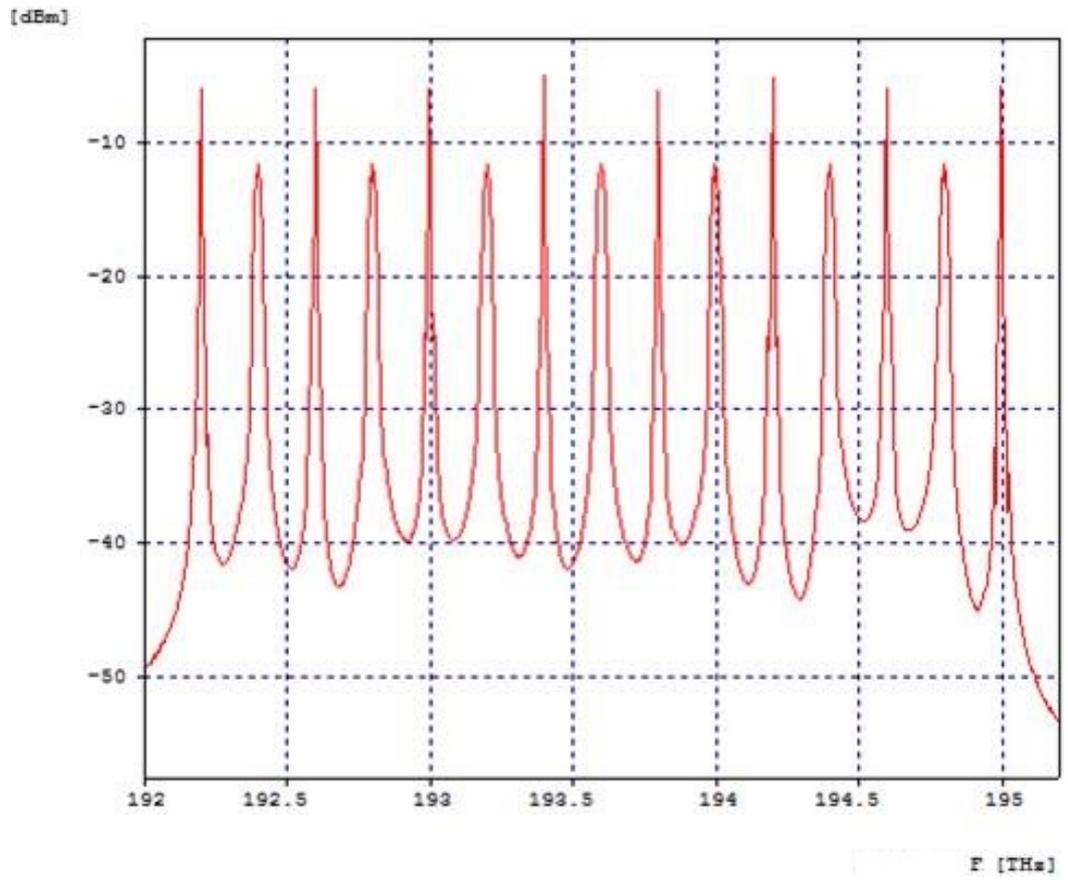
Die Anforderungen an eine größere Informationskapazität und eine höhere Übertragungsrate erfordert ein Upgrade der bestehenden optischen Systeme. Ein weiterer Trend besteht in der Anwendung mehrerer Systeme in einem Lichtwellenleiter. Das Hinzufügen eines neuen Systems braucht jedoch eine effizientere Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite. Die Koexistenz von zwei optischen Systemen bezieht sich hauptsächlich auf:

- Systeme mit grobem Wellenlängenmultiplex (engl. *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, **CWDM**) – Entfernungen zwischen den verwendeten Frequenzen (Kanalabstand) bewegen sich in der Größenordnung von einigen bis einigen zehn Nanometern.
- Systeme mit dichtem Wellenlängenmultiplex (engl. *Dense Wavelength Division Multiplexing*, **DWDM**) – Entfernungen zwischen den verwendeten Frequenzen betragen weniger als ein Nanometer.



In den meisten Fällen benutzt jedes System ein unterschiedliches Modulationsformat.

- Beispiel: hybrides 10G/40G DWDM
 - Ursprünglich 10G DWDM
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, Abstand 50 GHz
 - 6x80 km SSMF (Zweiphasenverstärker, Nachkompensation der Dispersion)
- Hybrides DWDM 10G/40G mit Interleaving von Kanälen
 - Kombination mit 7x40 Gbit/s
 - Duobinäre Modulation, P-DPSK, RZ-DQPSK
 - Einfluss von ursprünglichen Kanälen 10 Gbit/s auf neue Kanäle 40 Gbit/s
 - Potenzielles Problem der Kreuzphasenmodulation (engl. *Cross Phase Modulation*, **XPM**)



Optisches Spektrum eines DWDM-Systems mit Interleaving von Kanälen.

3.3 Kreuzphasenmodulation durch Koexistenz der Phasen- und Amplitudenmodulation



Für das Betreiben von zwei oder mehr Systemen in einem Lichtwellenleiter müssen einige Bedingungen erfüllt werden. In den meisten Fällen benutzt das bestehende, ältere System die Amplitudenmodulation und das neue System soll nur eines der modernen Modulationsformate (Phasenmodulation oder mehrstufige Modulation) anwenden. Die Kanäle der beiden Systeme können wegen einer effizienteren Ausnutzung des Bands des alten Systems verschachtelt werden. Potenziell kann das Nebensprechen von Kanälen mit der Amplitudenmodulation in die Kanäle mit der Phasenmodulation ein Problem darstellen. Dieses Nebensprechen wird als Kreuzphasenmodulation (engl. *Cross-phase modulation*, **XPM**) definiert.



XPM entsteht, weil eine größere Energiemenge von Amplitudenmodulation übertragen wird, die in weitere Kanäle des Wellenlängenmultiplexes angeknüpft wird.



Die Kreuzphasenmodulation **XPM** ist eine Änderung der Phase der optischen Strahlung auf einer gewissen Wellenlänge in Folge der Interaktion mit der Strahlung auf einer anderen Wellenlänge in einem nichtlinearen Medium.

Die Phasenänderungen können wie folgt erzielt werden:

- durch Kerr-Effekt, der eine Änderung des Brechungsindex eines Materials nach Anlegen des elektromagnetischen Feldes verursacht, z. B. einer starken optischen Strahlung (bei Lichtwellenleitern handelt es sich um einige zehn dBm)
- durch Änderung des Brechungsindex in einem *Halbleiterlaserverstärker* (engl. *Semiconductor Optical Amplifier*, **SOA**)

3.4 Vermeidung nichtlinearer Ereignisse hervorgerufen durch fortgeschrittene Modulation



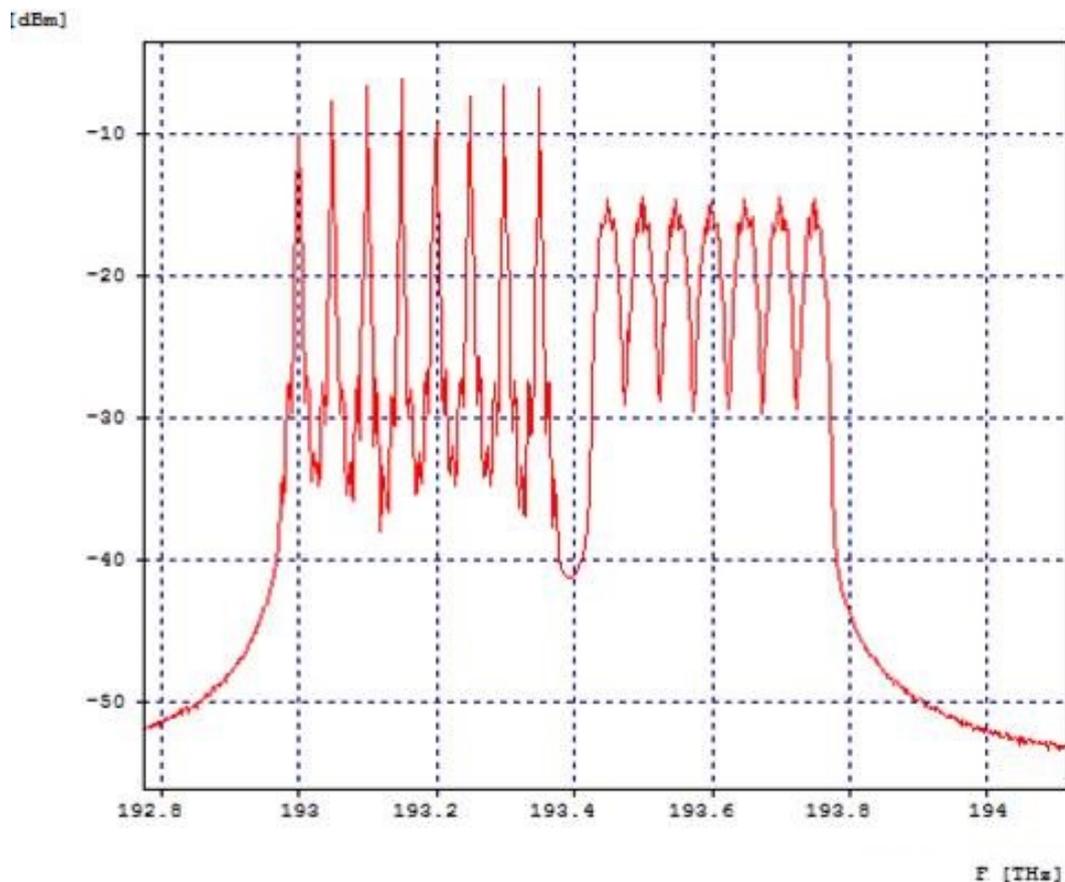
XPM ist ein unerwünschtes Ereignis in WDM-Telekommunikationssystemen, weil sie die Übertragung verzerren kann und zu Nebensprechen zwischen Kanälen und Konversion der Wellenlänge führen kann.

Eine der Lösungen dieses Problems besteht in der Trennung der Wellenlängenbänder der Modulationsformate in der Glasfaser und Einstellung von geeigneten Sicherheitsbändern, in denen es keine Übertragungskanäle gibt und daher keine Wellenlängen verwendet werden:

- Hybrides DWDM 10G/40G mit Sicherheitsband



Die spektrale Trennung der Systeme 10G und 40G mit einem Sicherheitsband hilft bei der Begrenzung der Kreuzphasenmodulation – Nebensprechen im System 10G.



Sicherheitsband (100 GHz) zwischen zwei Systemen (RZ-DQPSK und P-DPSK 40G).

3.5 Beständigkeit der digitalen Modulationen gegenüber Dispersion bei hohen Geschwindigkeiten

- Eine weitere Aufgabe der Modulation ist die Reduzierung der chromatischen Dispersion, die eine unterschiedliche Geschwindigkeit der einzelnen Frequenzkomponenten im optischen Puls verursacht.
- Im Vergleich zu NRZ ist das RZ-Format ist nicht so empfindlich gegen Dispersion und dank eines engeren Spektrums besser für die Filterung geeignet.

3.6 OFDM – Multiträger-Modulation – Prinzip, Anwendung

Prinzip des orthogonalen Multiplexes



$E=m \cdot c^2$

Das orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, **OFDM**) ist ein Verfahren zur Codierung von digitalen Daten durch Multiplexen der Trägerfrequenz. Dieses Modulationsformat gehört unter Multiträger-Modulationen (engl. *Multi-Carrier Modulation*, **MCM**). Mit anderen Worten werden bei dieser Modulation mehrere Frequenzen moduliert. Unter orthogonalen Komponenten versteht man unabhängige, sich nicht beeinflussende, idealerweise aufeinander senkrechte Komponenten.

Die OFDM-Kanäle sind orthogonal. Deshalb interferieren die Modulationskanäle miteinander nicht, selbst wenn sie scheinbar überlappen (orthogonale Komponenten werden nicht addiert).

Viele orthogonale Subkanäle mit einem geringen Abstand werden für eine gleichzeitige Datenübertragung in einigen parallelen Datenströmen oder Kanälen verwendet. Jeder Subkanal wird mit einem üblichen Modulationsverfahren (z. B. PSK oder QAM) bei einer niedrigeren Symbolrate moduliert, ähnlich wie bei der Modulation mit einer Trägerwellenlänge.



Die Quelldaten werden noch mit Faltungscodierung codiert, um die Fehlerrate beim Empfang von Symbolen zu reduzieren. OFDM wird mittels DSP realisiert. Der Faltungscodierung ist ein fehlerkorrigierender Code für Telekommunikation, mit dem jedes Informationssymbol mit m Bits mittels eines Symbols mit n Bits codiert wird. Sein Vorteil besteht in der Möglichkeit zur Wiederherstellung der ursprünglichen Daten, falls der Codierungsalgorithmus den gegebenen Fehlertyp und seine Menge korrigieren kann.

Anwendungen

- *Long Term Evolution (LTE)* – Mobilfunkstandard
 - Bandbreite 1–20 MHz
 - Kompression MPEG2 oder MPEG4
 - Übertragungsrate ~300 Mbit/s (Downlink) und 50 Mbit/s (Uplink)
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)* – Standard für Videoempfang
 - Anzahl von Subkanälen 6817
 - Kanalabstand 1116 Hz

- TV-Band 8 MHz
- Modulation in Subkanälen 4-PSK, 16-QAM, 64-QAM
- Übertragungsrate 19–25 Mbit/s
- *Wireless LAN (WLAN)* – drahtlose lokale Netzwerke
- *Digital Audio Broadcasting (DAB)* – digitale Audiosendung

3.7 OFDM – Multiträger-Modulation – Parameter, Vorteile, Einschränkungen

Parameter

i

- Das verfügbare Band B wird in N Subkanäle eingeteilt.
 - Die Breite jedes Subkanals beträgt $\Delta f = B/N$.
 - Die Modulationsrate ist $\Delta f = 1/T$, wobei T die Dauer eines Symbols ist.
-

Vorteile

+

- Spektrale Effizienz, Verhältnis der Übertragungsrate und Bandbreite
 - Durch Erhöhung der Anzahl von Subkanälen bei gleicher Übertragungsrate kann die Modulationsrate in einzelnen Subkanälen gesenkt oder die Dauer der Symbole verlängert werden.
 - Möglichkeit der Reduzierung der Intersymbolinterferenz (engl. *Inter-Symbol Interference, ISI*)
-

Nachteile

-

- Notwendigkeit der Überwachung und Aufrechterhaltung der Abstände zwischen Subkanälen
 - Falls der Kanalabstand nicht konstant ist (dieses Ereignis ist in der Literatur als jitter bekannt), wird das Prinzip der orthogonalen Kanäle verletzt und entstehen Intersymbolinterferenz und Interkanalinterferenz (engl. *Inter-Channel Interference, ICI*).
 - Dies kann zur Erhöhung der Fehlerrate (engl. *Bit Error Rate, BER*) führen.
-

3.8 VDMT – fortgeschrittene Vektormodulation – Prinzip, Anwendung

Modulationsprinzip

$E = m \cdot c^2$

Diskretes Multitone (engl. *Discrete Multi-Tone*, **DMT**) ist eine Modulation mit mehreren Trägern. Sie kann mittels DSP realisiert werden. Ihre Subkanäle verwenden PSK oder QAM, ähnlich wie OFDM. Im Unterschied zu OFDM ermöglicht DMT die Anwendung von verschiedenen Modulationsschemen oder sogar -typen in jedem Subkanal des orthogonalen Multiplexes.

Anwendungen

- *Digital Subscriber Line (xDSL)* - digitale Teilnehmeranschlüsse, die Kupferleitungen verwenden:
 - *Asymmetric Digital Subscriber Line 2+ (ADSL2+)* – asymmetrische DSL, Bandbreite 2,2 MHz, Anzahl von Subkanälen 512, Kanalabstand 4,3 kHz, Modulation QAM, gesamte Höchst-Bitrate 30,72 Mbit/s
 - *Very High Speed DSL 2 (VDSL2)* – Bandbreite 30 MHz, Anzahl von Subkanälen 3479, Kanalabstand 8,625 kHz, Modulation QAM, gesamte Höchst-Bitrate 417 Mbit/s

Vectored Discrete Multi-Tone (VDMT) - diskrete Multitone-Vektormodulation

$E = m \cdot c^2$

Für den Downstream wird VDMT üblicherweise für xDSL-Anschlüsse mit Kupferkabeln verwendet. Sie wird im Multiplexer *Digital Subscriber Line Access Multiplexer (DSLAM)* implementiert.

- Im DSLAM gibt es Informationen über alle in die Kupferleitung gesendeten Symbole (Vektor der DMT-Symbole – daher „Vektor-DMT“).
 - Im DSLAM gibt es auch Informationen über Parameter und Nebensprechen der einzelnen Twisted-Pair-Kabel. Deshalb ist es möglich, die DMT-Symbole aufgrund der Kenntnis der Übertragungsumgebung anzupassen.
 - Alle DMT-Symbole müssen synchronisiert werden.
 - In der Upstream-Richtung können die übertragenen Symbole in den Endgeräten der Benutzer angepasst werden.
-

Vorteile



- VDMT ist eine Erweiterung der DMT, löst das Problem mit mehr Ein- und Ausgangsgrößen (engl. *Multiple Input Multiple Output*, **MIMO**) und eliminiert Nebensprechen am Kabelende (engl. *Far End Crosstalk*, **FEXT**).
 - Nebensprechen am Kabelanfang (engl. *Near End Crosstalk*, **NEXT**) wird von Frequenzmultiplex beseitigt.
-

3.9 Schlussfolgerung



- Die meistbenutzten Formate sind Amplitudenmodulationen (z. B. OOK, DB, CSRZ) und Phasenmodulationen (z. B. BPSK, DPSK).
 - Im Vergleich zu Amplitudenmodulationen arbeiten Phasenmodulationen besser (niedrigere Fehlerrate für die gegebene Geschwindigkeit) auf Kosten einer komplizierten Konstruktion des Modulators.
 - Für Geschwindigkeiten von mehr als 10 Gbit/s ist das Format, das einen guten Kompromiss zwischen Übertragungsqualität und Komplexität des Modulators darstellt, die DB-Modulation. Dieses Format kann Daten mit der Raten von 40 Gbit/s pro Kanal mit Kanalabstand von 0,8 nm übertragen (es handelt sich daher um ein DWDM-System). Phasenmodulationen haben in den meisten Fällen bessere Ergebnisse, vor allem für einen dichteren Kanalabstand (0,4–0,1 nm).
 - Für Hochgeschwindigkeitssysteme und Übertragungssysteme über große Entfernungen werden mehrstufige Modulationen mit mehr als zwei Ebenen (z. B. QPSK) oder Modulationen, die Modulation der Phase und Amplitude (z. B. QAM) oder Phase und Polarisation (z. B. PM-QPSK) kombinieren, vielversprechend.
 - Die Formate, die Polarisationsmultiplex ausnutzen, können von der höheren spektralen Effizienz, optischen Reichweite, guten SNR-Eigenschaften und Beständigkeit gegen chromatische Dispersion profitieren.
 - Das vielversprechendste Format für Terabit-Übertragungen durch neue Glasfasern ist das PDM-QPSK.
 - Die neueste Entwicklung ist die Modulation mit mehreren Trägern durch OFDM und VDMT. Sie finden ihre Anwendung in digitalem Fernsehen und in der Mobilfunkkommunikation im Standard LTE.
-