



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 02 065 T2 2005.03.31**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 395 010 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 02 065.4**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 360 244.4**

(96) Europäischer Anmeldetag: **26.08.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **03.03.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **24.11.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **31.03.2005**

(51) Int Cl.7: **H04L 27/20**
H04B 10/155

(73) Patentinhaber:
Alcatel, Paris, FR

(74) Vertreter:
**Patentanwälte U. Knecht und Kollegen, 70435
Stuttgart**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR**

(72) Erfinder:
**Wedding, Dr., Berthold, 70825
Korntal-Münchingen, DE**

(54) Bezeichnung: **Optisches Frequenzumastverfahren**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

Feld der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der optischen Übertragung und spezieller auf ein Verfahren zur Übertragung eines optischen Signals unter Verwendung der optischen Frequenzumtastungs-Modulation (Frequency Shift Keying, FSK).

Hintergrund der Erfindung

[0002] Bei optischen Übertragungssystemen wird typischerweise die Intensitätsmodulation (IM) verwendet, d. h. ein digitales Signal wird auf ein optisches Trägersignal moduliert, indem die Amplitude des optischen Trägers moduliert wird. Solche Systeme haben bestimmte Einschränkungen, die durch Faser-Dispersion auf der Übertragungstrecke und Laser-Chirp von direkt modulierten Lasern in den Sendern hervorgerufen werden. Zusätzlich dazu haben solche Systeme weitere Einschränkungen durch Faser-Nichtlinearitäten.

[0003] Bei fortschrittlicheren Übertragungsverfahren wird jedoch die Frequenzumtastung (FSK) verwendet, d. h. die optische Frequenz des Trägers wird durch das zu übertragene digitale Signal moduliert. Ein Verfahren, das als DST (Dispersion Supported Transmission) bekannt ist und bei dem die optische FSK-Modulation verwendet wird, ist in ITU-T G.691e, Anhang III definiert. Die optische FSK erlaubt längere Faserstrecken zwischen den Signal-Regeneratoren und ein vereinfachtes Sender-Design, da der Chirp-Effekt von direkt modulierten Lasern benutzt wird.

[0004] Ein charakterisierender Parameter der FSK-Modulation ist der Modulationsindex h , der als der maximale Frequenzabstand dividiert durch die Bitrate des digitalen Signals definiert ist. Typischerweise wird dieser Parameter h so gewählt, dass er größer als 0,5 ist. Eine FSK-Modulation mit $h = 0,5$ ist auch als MSK (Minimum Shift Keying) bekannt, da 0,5 typischerweise der kleinste Wert von h ist, der verwendet werden sollte, da unter linearen Übertragungseinflüssen die Empfänger-Empfindlichkeit bei kleineren Werten von h drastisch verringert wird.

[0005] Im Dokument EP-A-0643497 wird ein Verfahren zur Übertragung von FSK-Signalen über eine optische Faserstrecke beschrieben. Im Gegensatz zur vorliegenden Erfindung ist der benutzte Modulationsindex größer als 1/2.

[0006] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein optisches Übertragungsverfahren und ein System bereitzustellen, das eine erhöhte maximale eingespeiste Leistung des optischen Signals, eine er-

höhte Empfänger-Empfindlichkeit und einen höheren spektralen Wirkungsgrad hat.

Zusammenfassung der Erfindung

[0007] Diese und andere Ziele werden durch ein Verfahren erreicht, mit dem ein digitales Signal über eine optische Faserstrecke übertragen wird, wozu die Frequenzumtastungs-Modulation mit einem Modulationsindex $h < 0,5$ verwendet wird und eine solche optische Leistung in die optische Faser eingespeist wird, dass die Faser in einem nichtlinearen Übertragungsbereich arbeitet. Unter dem Einfluss eines nichtlinearen Übertragungseffektes in der optischen Faser führt dies erstaunlicherweise zu einem Anstieg der maximal zulässigen Leistung des optischen Signals, einer erhöhten Empfänger-Empfindlichkeit und einem erhöhten spektralen Wirkungsgrad.

[0008] Verwendet man einen direkt modulierten Laser im optischen Sender, kann die maximal überbrückbare Verbindungs-Dämpfung für $h < 0,5$ bezogen auf die herkömmliche MSK ($h = 0,5$) bei einer Übertragungs-Bitrate von 10 GBit/s auf einer Standard-Einmoden-Faser um ungefähr 3 dB erhöht werden. Die Verbesserung im Vergleich zu Übertragungssystemen bei denen Intensitätsmodulation verwendet wird, ist sogar noch größer.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0009] Eine bevorzugte Ausführung der vorliegenden Erfindung wird nun mit Bezug auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben, in denen

[0010] Fig. 1 ein optisches Übertragungssystem zeigt, in dem die FSK-Modulation verwendet wird;

[0011] Fig. 2 in einem Messwert-Diagramm einen Vergleich des erforderlichen optischen Signal-Störabstandes (OSNR) zwischen MSK- ($h = 0,5$) und FSK-Modulation gemäß der Erfindung zeigt;

[0012] Fig. 3 in einem Messwert-Diagramm den Anstieg der Streckendämpfung der FSK-Modulation gemäß der Erfindung zeigt;

[0013] Fig. 4 eine Messung eines optischen Spektrums bei Verwendung der MSK-Modulation nach dem bisherigen Stand der Technik zeigt;

[0014] Fig. 5 eine Messung eines optischen Spektrums bei Verwendung der FSK-Modulation gemäß der Erfindung zeigt.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0015] Fig. 1 zeigt eine Ausführung eines optischen Übertragungssystems, in dem die FSK-Modulation

verwendet wird. Ein optischer Sender TX erzeugt ein optisches FSK-Signal OS, d. h. ein optisches Träger-signal, dessen Frequenz mit einem zu übertragene Digital-signal DS moduliert wird. Das Digital-signal DS hat eine Bitrate von 10,7 GBit/s, was die Bitrate des Signals OTU2 ist, wie in dem neuen Standard für optische Übertragungsnetze (ITU-T G.709) definiert, das in der Lage ist, ein STM-64-Signal der Synchron Digital Hierarchy zu übertragen.

[0016] In der Ausführung wird eine direct modulierte Laserdiode als optischer Sender TX benutzt. Dies ist eine sehr einfache und kostengünstige Implementati-on eines optischen Senders, da sie den Chirp-Effekt der Laserdiode benutzt, um die Frequenz des vom Laser erzeugten optischen Trägers zu modulieren. Der zugrunde liegende physikalische Effekt ist, dass der Vorstrom den Brechungsindex der Laserdiode moduliert. Dies verursacht eine Modulation der optischen Länge des Laser-Resonators und somit eine Modulation der Wellenlänge des optischen Signals, was einer Frequenzmodulation entspricht. Die Modulation des Vorstroms verursacht weiterhin eine ungewünschte Intensitätsmodulation. Wenn die DC-Vorstrom-Komponente im Vergleich zur AC-Vorstrom-Komponente des Digital-signals DS jedoch groß ist, ist die Intensitätsmodulation im Vergleich zur Frequenzmodulation relativ klein. In der Ausführung wird die DC-Vorstrom-Komponente mit 60 mA gewählt, während das Digital-signal eine AC-Vorstrom-Komponente von 13 mA Spitze-Spitze (für einen typischen Laser-FM-Wirkungsgrad von 400 MHz/mA) hinzufügt.

[0017] Das optische Signal OS wird über eine optische Faser SMF übertragen, die in der Ausführung eine Standard-Einmoden-Faser ist. Auf der Empfangsseite der optischen Faser SMF wird das optische Signal OS an einen optischen Empfänger ORX angelegt, der eine optische Demodulation durchführt, um das Digital-signal DS' wieder herzustellen. Wie in Fig. 1 gezeigt, enthält der optische Empfänger ORX ein optisches Filter F, ein Paar Fotodioden PD1, PD2, die mit dem Filter gekoppelt sind und einen Differenzempfänger RX.

[0018] Das optische Filter wandelt die FSK-Modulation in eine IM-Modulation um. In der Ausführung ist das optische Filter ein Mach-Zehnder-Interferometer (MZI), das auf der Basis von Fasern, z. B. mit verschmolzenen Faser-Kopplern, oder auf der Basis von integrierter Optik realisiert werden kann. Das Ausgangssignal der beiden Interferometer-Arme des MZI wird an die Fotodioden PD1, PD2 angelegt. Der Vorteil eines MZI-Filters wie in der bevorzugten Ausführung ist, dass die beiden Interferometer-Arme über entsprechende Fotodioden PD1, PD2 an einen Differenzverstärker RX angeschlossen werden können. In dieser Konfiguration können die restliche Intensitätsmodulation und das optische Intensitäts-Rauschen,

wie es z. B. durch optische Verstärker eingeführt wird, verringert werden, was zu einer erhöhten Empfindlichkeit des Empfängers führt.

[0019] In einer noch mehr bevorzugten Ausführung ist der optische Empfänger OR anstelle eines herkömmlichen optischen Empfängers ein adaptiver Empfänger, zum Beispiel ein Empfänger mit adaptiver elektronischer Entzerrung. Die Vorteile der Differenz-Demodulation und der adaptiven elektronischen Entzerrung können in einer bevorzugten Weise kombiniert werden, indem getrennte adaptive elektronische lineare Entzerrungs-Filter verwendet werden und die Signale vor der Regeneration kombiniert werden. Anstelle eines MZI können auch andere Arten von optischen Filtern, wie z. B. Faser-Gitter oder Bragg-Gitter angewendet werden.

[0020] Optional kann die Faser-Dispersion durch eine optische Dispersions-Kompensations-Einheit (DCU) kompensiert werden. Optische Verstärker (in Fig. 1 nicht gezeigt) können im System entlang der Übertragungsstrecke SMF ebenfalls angewendet werden. Zum Beispiel können optische Verstärker nach dem Sender TX als optische Nachverstärker und vor dem optischen Demodulations-Filter F als optische Vorverstärker angeordnet werden.

[0021] Es wurden Messungen mit einer Bitrate von 10,7 GBit/s durchgeführt, wobei ein direkt modulierter Laser als optischer Sender, ein Booster-EDFA (Erbium-dotierter Faserverstärker), eine Einmoden-Faser mit optischer Dispersionskompensation auf der Empfangsseite, ein optischer Vorverstärker (EDFA), ein ASE-Rauschfilter, ein auf Fasern basierendes MZI als optischer Demodulator und ein adaptiver optischer Empfänger mit nur einem einzigen Fotodioden-Eingang (im Gegensatz zum doppelten Fotodioden-Eingang in Fig. 1) verwendet wurden. ASE bedeutet Amplified Spontaneous Emission (verstärkte spontane Emission). Optische Verstärker erzeugen zusätzlich zu dem verstärkten optischen Signal ein Breitband-Rauschsignal, das durch ASE verursacht wird. Ein EDFA zum Beispiel erzeugt ein ASE-Rauschen, das typischerweise im Bereich zwischen 1530 nm und 1560 nm liegt. Das ASE-Rauschfilter ist ein schmales Bandpassfilter mit einer Spektralbreite von ungefähr 1 nm und dient dazu, dieses ASE-Rauschsignal in einem Empfänger zu verringern.

[0022] Als ein Ergebnis der Experimente ist in Fig. 2 der optische Signal-Störabstand (OSNR), der dazu erforderlich ist, eine Bitfehlerrate (BER) von 10^{-5} zu erhalten, über der optischen Leistung P_{SMF} , die in die Faser eingespeist wird, für verschiedene Werte des Modulationsindex h als Parameter gezeigt.

[0023] Es war in der Technik allgemein akzeptiert, dass der minimale Wert des Modulationsindex h , der angewendet werden kann, $h = 1/2$ ist, d. h. der

FSK-Frequenzabstand ist die Hälfte der Bitrate. Es war in der Technik allgemein anerkannt, dass dies erforderlich ist, um die Orthogonalität der Signale für Mark und Space sicherzustellen (siehe zum Beispiel das bekannte Buch "Digital Communications" von John G. Proakis, dritte Auflage 1995, Seite 197). Eine FSK-Modulation mit $h = 1/2$ wird daher Minimum Shift Keying (MSK) genannt. Für eine lineare Umwandlung, d. h. im Bereich einer Übertragung mit geringer Leistung ($P_{SMF} \approx 0$ dBm) zeigen die Ergebnisse der Experimente in **Fig. 2** in der Tat die beste Leistungsfähigkeit, d. h. den niedrigsten OSNR-Wert für $h \approx 1,2$ (MSK). Für einen kleineren Modulationsindex $h \approx 1/3$ ist bei geringer Leistung ein größerer OSNR erforderlich, um dieselbe BER zu erreichen.

[0024] Im nichtlinearen Bereich bei $P_{SMF} \approx 20$ dBm, d. h. unter dem Einfluss der Faser-Nichtlinearität, ist die Situation jedoch völlig anders: Die in **Fig. 2** gezeigten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Leistungsfähigkeit bei Verwendung eines verringerten Modulationsindex von $h \approx 1/3$ viel besser als bei $h \approx 1/2$ (MSK) ist. Die Nichtlinearitäts-Grenze, d. h. die maximal mögliche P_{SMF} für ein bestimmtes OSNR wird beträchtlich erhöht. In **Fig. 2** wird auch eine dritte Messkurve gezeigt, bei der für jeden Wert von P_{SMF} der beste Modulationsindex $h = h_{min}$ benutzt wurde, um den Minimalwert von OSNR zu erhalten. Der beste Modulationsindex h_{min} in dieser Kurve liegt im Bereich zwischen $1/2$ und $1/3$. Diese Ergebnisse zeigen, dass $h_{min} < 1/2$ ist und dass eine bessere Empfänger-Empfindlichkeit (d. h. ein kleinerer OSNR) und eine größere Nichtlinearitätsgrenze erreicht werden als bei $h \approx 1/2$ (MSK).

[0025] Die Verbesserung der Übertragungseigenschaften erfolgt durch einen nichtlinearen Effekt in der optischen Faser, der als optischer Kerr-Effekt bekannt ist und der bei höheren Leistungspegeln (> 10 dBm) eine Modulation des Brechungsindex in der optischen Faser durch das optische Signal verursacht, wodurch das optische Signal verzerrt wird. Durch diesen Effekt wird die maximale optische Leistung begrenzt, die in die Faser eingespeist werden kann, da der Effekt ab einem bestimmten Punkt überwiegt und das optische Signal auf seinem Weg durch die optische Faser so viel verzerrt, dass eine Signal-Wiedergewinnung auf der Empfängerseite nicht mehr ohne eine unakzeptabel hohe Bitfehlerrate erreicht werden kann. Durch Verwendung eines kleineren Modulationsindex $h < 1/2$ wird nun die Signalverzerrung bei höheren Leistungspegeln (zwischen 10 dBm und 20 dBm) überraschenderweise verringert und die Grenze für die maximal einzuspeisende Leistung in Richtung höherer Pegel (> 20 dBm) verschoben.

[0026] Offensichtlich kann ein Signal mit einer höheren Eingangsleistung eine längere Faserstrecke ohne Verstärkung und Signal-Regeneration durchlaufen. Um die Verbesserung durch die Erfindung be-

züglich der Faser-Dämpfung zu demonstrieren, wird in **Fig. 3** die Dämpfung der überbrückbaren Strecke über der eingespeisten Leistung P_{SMF} gezeigt. Wie man sehen kann, zeigen die Messungen, dass für einen reduzierten Modulationsindex $h < 1/2$ die maximal überbrückbare Streckendämpfung im Vergleich zu $h \approx 1/2$ (MSK) vergrößert werden kann. In diesem Experiment war die gemessene Verbesserung der Streckendämpfung $3,2$ dB. Die eingespeiste Leistung P_{SMF} kann um $2,6$ dB erhöht werden.

[0027] Wie man in den **Fig. 4** und **5** sehen kann, wird die Spektralbreite des optischen Signals vom Sender auch reduziert, wenn ein reduzierter Modulationsindex angewendet wird (man beachte die unterschiedlichen Maßstäbe in horizontaler Richtung). Zum Beispiel wird die -10 dB-Breite auf ungefähr 60% des MSK-Wertes reduziert. Daher erhöht die Erfindung auch den spektralen Wirkungsgrad, da mehr Frequenzkanäle in ein gegebenes Spektralband passen.

[0028] Zusammenfassend kann man sagen, dass während es in der Technik allgemein akzeptiert war, dass $h = 1/2$ der minimale Modulationsindex für FSK ist, der angewendet werden sollte, wir herausgefunden haben, dass im nichtlinearen Bereich die Leistungsfähigkeit durch die Verwendung eines verringerten Modulationsindex $h < 1/2$ verbessert wird. Hierdurch werden bestimmte Übertragungseigenschaften verbessert: Wegen der Faser-Nichtlinearitäten wird die maximale eingespeiste Leistung erhöht. Die Empfänger-Empfindlichkeit wird erhöht (geringerer OSNR), die überbrückbare Streckendämpfung wird erhöht, und die Spektralbreite wird verringert (höherer spektraler Wirkungsgrad).

Patentansprüche

1. Ein Verfahren zur Übertragung eines Digitalsignals (DS) über eine optische Faserstrecke (SMF), wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:
 - Modulation des Digitalsignals (DS) auf einen optischen Träger unter Verwendung der Frequenzumtastungs-Modulation;
 - Kopplung des frequenzmodulierten optischen Signals (OS) in eine optische Faser (SMF);
 - Auf der Empfängerseite der optischen Faser (SMF) Demodulation des empfangenen optischen Signals (OS), um das gesendete Digitalsignal DS' zu erhalten;

dadurch gekennzeichnet, dass

für den Schritt der Frequenzumtastungs-Modulation ein Modulationsindex $h < 1/2$ verwendet wird und die in die Faser eingespeiste optische Leistung so ist, dass die Faser (SMF) im nichtlinearen Übertragungsbereich arbeitet, um die Übertragungseigenschaften zu verbessern, wobei der Modulationsindex h als maximaler Frequenzabstand dividiert durch die Bitrate des Digitalsignals definiert ist.

2. Ein Verfahren gemäß Anspruch 1, worin der Modulationsindex h im Bereich zwischen $1/2$ und $1/4$ liegt.

einen direkt modulierten Laser enthält.

Es folgt kein Blatt Zeichnungen

3. Ein Verfahren gemäß Anspruch 1, worin der Modulationsindex h gleich $1/3$ ist.

4. Ein optisches Übertragungssystem, das einen optischen Sender (TX), eine optische Faser (SMF) und einen optischen Empfänger (SRX) enthält, worin die Faser (SMF) einen nichtlinearen Übertragungseffekt zeigt, der optische Sender (TX) angepasst ist, ein zu übertragendes Digitalsignal (DS) auf einen optischen Träger zu modulieren, wozu die Frequenzumtastungs-Modulation verwendet wird. dadurch gekennzeichnet, dass der optische Sender so angepasst ist, dass er für die Frequenzumtastungs-Modulation einen Modulationsindex $h < 1/2$ verwendet und eine in die Faser eingespeiste optische Leistung so ist, dass die Faser (SMF) in einem nichtlinearen Übertragungsbereich arbeitet, um die Übertragungseigenschaften zu verbessern, wobei der Modulationsindex h als maximaler Frequenzabstand dividiert durch die Bitrate des Digitalsignals definiert ist.

5. Ein optisches Übertragungssystem gemäß Anspruch 4, das weiterhin ein optisches Dispersions-Kompensations-Modul (DCM) enthält.

6. Ein optisches Übertragungssystem gemäß Anspruch 4, worin der Empfänger ein optisches Filter (F) zur Demodulation des optischen Signals (OS) enthält.

7. Ein optisches Übertragungssystem gemäß Anspruch 6, worin das optische Filter (F) ein Mach-Zehnder-Interferometer ist, dessen beide Interferometer-Arme an entsprechende Fotodioden (PD1, PD2) gekoppelt sind, die wiederum an einen elektrischen Differenz-Empfänger (RX) gekoppelt sind.

8. Ein optischer Sender (TX) für ein optisches Übertragungssystem, wobei der optische Sender so angepasst ist, dass er ein über eine optische Faserstrecke (SMF) zu übertragendes Digitalsignal (DS) auf einen optischen Träger moduliert, wozu er die Frequenzumtastungs-Modulation verwendet, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Sender so angepasst ist, dass er für die Frequenzumtastungs-Modulation einen Modulationsindex $h < 1/2$ verwendet, und eine in die Faser eingespeiste optische Leistung so ist, dass die Faser (SMF) im nichtlinearen Übertragungsbereich arbeitet, um die Übertragungseigenschaften zu verbessern, wobei der Modulationsindex h als maximaler Frequenzabstand dividiert durch die Bitrate des Digitalsignals (DS) definiert ist.

9. Ein optischer Sender gemäß Anspruch 8, der