

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B1)

(11) 特許番号

特許第6040288号
(P6040288)

(45) 発行日 平成28年12月7日(2016.12.7)

(24) 登録日 平成28年11月11日(2016.11.11)

(51) Int.Cl.		F I			
HO4B	10/2507	(2013.01)	HO4B	9/00	251
HO4B	10/516	(2013.01)	HO4B	9/00	516
HO4B	3/04	(2006.01)	HO4B	3/04	C

請求項の数 4 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2015-124401 (P2015-124401)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成27年6月22日 (2015.6.22)		日本電信電話株式会社
審査請求日	平成27年6月22日 (2015.6.22)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(出願人による申告) 平成25年度、総務省、「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」委託事業、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(74) 代理人	110001807 特許業務法人磯野国際特許商標事務所
		(72) 発明者	堀越 達吾 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	松下 明日香 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	中村 政則 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光データ伝送システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

伝送データとしての主信号で偏波を変調した光信号を光伝送路へ送信する光送信装置と、当該送信された光信号を受信して前記主信号を復調する光受信装置とを備える光トランシーバを、光伝送路の両端に備えて光伝送を行う光データ伝送システムであって、

前記光受信装置は、

一方側の光トランシーバで光信号を受信後に前記復調された主信号の波形歪を測定し、当該波形歪に係る波形歪情報を推定する推定部と、

他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された波形歪情報を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号する復号部と、

を備え、

前記推定部は、前記復調された主信号の非線形歪を測定し、当該測定された非線形歪から、前記波形歪情報としての非線形伝達関数を推定すると共に、他方側の光トランシーバから受信した主信号に多重化されたトレーニング信号系列の特定周波数帯域のエネルギーを測定し、当該測定された特定周波数帯域のエネルギー量に対応する線形伝達関数を推定し、

前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定部で推定された前記線形伝達関数及び前記非線形伝達関数を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、

前記光送信装置は、

前記推定部で推定された前記線形伝達関数及び前記非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成する生成部と、

前記主信号に、特定周波数帯域にエネルギーが集中した既知のトレーニング信号系列を多重化する系列多重部と、

前記推定部で推定された波形歪情報と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化する多重部と、

前記復号部で復号された波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行う予等化部と、

前記予等化された主信号及び前記推定された波形歪情報を含む多重化信号で偏波を変調して光信号に変換する変換部と、

を備え、

前記生成部は、前記推定部で推定された前記線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、

前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する前記系列多重部でトレーニング信号系列が多重された主信号とを多重化し、

前記予等化部は、前記復号部で復号された線形伝達関数及び非線形伝達関数を用いて、他方側の光トランシーバで受信される光信号の波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行う

ことを特徴とする光データ伝送システム。

【請求項 2】

前記光受信装置において、

前記推定部は、仮判定処理により他方側の光トランシーバから受信した主信号を既知の基準主信号と比較して波形歪を求め、この波形歪の線形歪成分が最小となるように、適応等化アルゴリズムにより前記線形伝達関数に対応するタップ係数ベクトルを推定し、

前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された前記タップ係数ベクトルを、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、

前記光送信装置において、

前記生成部は、前記推定されたタップ係数ベクトルをコード化して制御信号を生成し、

前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、

前記予等化部は、FIRフィルタを備え、前記多重化された主信号の予等化を行うように、当該FIRフィルタの重み付け係数として前記復号部で復号されたタップ係数ベクトルを用いる

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光データ伝送システム。

【請求項 3】

前記光受信装置において、

前記推定部は、他方側の光トランシーバから受信した主信号と既知の基準主信号との差分を取って波形歪を求め、この波形歪の非線形歪成分が最小となるように、適応等化アルゴリズムにより前記非線形伝達関数に対応するタップ係数ベクトルを推定し、

前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された前記タップ係数ベクトルを、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、

前記光送信装置において、

前記生成部は、前記推定されたタップ係数ベクトルをコード化して制御信号を生成し、

前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、

前記予等化部は、非線形FIRフィルタを備え、前記多重化された主信号の予等化を行うように、当該非線形FIRフィルタの重み付け係数として前記復号部で復号されたタップ係数ベクトルを用いる

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光データ伝送システム。

【請求項 4】

前記光受信装置において、

前記推定部は、仮判定処理により他方側の光トランシーバから受信した主信号のシンボルの分布が偏ったエラーベクトル群の平均値を算出し、当該算出された平均値に対応する前記非線形伝達関数を推定し、

前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された非線形伝達関数を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、

前記光送信装置において、

前記生成部は、前記推定された非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、

前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、

前記予等化部は、前記復号部で復号された非線形伝達関数を用いて、前記他方側の光トランシーバで受信される光信号の波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行う

ことを特徴とする請求項 1 に記載の光データ伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一方側の光トランシーバにおいて信号の波形歪を抑制する予等化を行い、この予等化された信号を光伝送路を介して他方側の光トランシーバへ光伝送する光データ伝送システムに関する。

【背景技術】

【0002】

現在、デジタルコヒーレント方式を適用した高速長距離通信において、チャンネル容量 100 Gbit/s の伝送容量が実現されている。100 Gbit/s の光トランスポート技術は、偏波多重 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 方式を採用しており、32 Gbaud 程度のボーレートで動作させている。偏波多重 QPSK は、情報シンボル当たり 4 bit の情報を送受信することができ、ボーレート 32 Gbaud では、凡そ 127 Gbit/s の通信容量を確保している。この内、100 Gbit/s を情報ペイロードに、28 Gbit/s を前方誤り訂正等の冗長ビットに割り当てることで、信頼性の高い情報伝送を実現している。

【0003】

このような伝送技術により、インターネット網を支える基幹ネットワークの大幅な大容量化が実現されると同時に、ビット当たりの伝送単価が劇的に低下している。しかし、コアネットワークに流入する伝送容量は年々増大しており、このことから、コアネットワークのチャンネル容量を将来的に更に増大する必要がある。

【0004】

光伝送容量を増大するため、今後は多値化や高ボーレート化といった技術的アップグレードが行われる可能性が高い。多値化とは、光信号の位相だけでなく、振幅も利用して情報伝送を行う方式である。

【0005】

つまり、現状の 100 Gbit/s チャンネルでは、光の位相を 4 つに区切り、情報ビットと光信号の位相を対応させることで情報伝送を行う QPSK 方式が主に用いられている。これに対して、光の位相だけでなく振幅にも情報を載せる多値化を行って伝送容量を向上させる方式により、光伝送容量を増大させることが可能となる。

【0006】

例えば、光の位相を 4 つに区切ると共に、4 段階の振幅で変調する 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式が、次世代光トランスポートネットワークでの変調方式の候補の一つとなっている。一方、高ボーレート化とは、情報シンボルの送受信レートを単純に向上させることである。現状は 32 Gbaud 程度であるが、これを 64 Gbaud に向上させることで、伝送容量を倍増させることが可能となる。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 7 】

しかしながら、多値化や高ポーレート化を実施することにより、送受信装置を構成するアナログ電子回路に対する要求はよりシビアなものになる。多値化を行うためには、アナログ電子回路の特性が線形である必要がある。このことは、とりわけ光変調器や変調器ドライバには厳しい要求となる。QPSKまでの変調であれば、アナログ電子回路は2値信号を扱うのみでよい。このため、アナログ電子回路の特性は非線形でも問題なく、むしろ非線形なりミッティング動作により、特性が改善する場合すらあった。

【 0 0 0 8 】

しかし、16QAMのような多値信号を用いる場合には、アナログ電子回路の伝達関数は線形であることが必要となる。また、高ポーレート化は、信号の広帯域化をもたらすため、アナログ電子回路もそれに合わせて広帯域化しなければ、アナログ電子回路の帯域がシステム性能上の制約となる。

10

【 0 0 0 9 】

つまり、多値化や高ポーレート化のためにアナログ電子回路の性能を向上させる必要があるが、一方で、デジタル信号処理によりアナログ電子回路の不完全性を補うアプローチも考えられる。例えば、多値信号の利用の際に問題となるアナログ電子回路の非線形性は、送信側DSP(Digital Signal Processor)にリニアライザを用意し、アナログ電子回路の非線形性を補償するような非線形伝達関数を信号に作用させることで非線形性の影響を軽減できる。

【 0 0 1 0 】

また、高ポーレート化の際に顕在化するであろうアナログ電子回路の周波数帯域不足は、ある程度、送信側でのプリエンファシスで補うことができる。プリエンファシスとは、予等化のことであり、伝送路固有の高周波数における減衰特性に応じて伝送信号の高域側を増幅して送信側から送出し、受信側で受ける信号の周波数特性を改善する変調技術である。

20

【 0 0 1 1 】

これらデジタル信号処理による補償・軽減のアプローチは、その補償・軽減を送信側DSPで行うことが効果的である。何故なら、帯域補償を受信側で行えば、ノイズエンハンスの問題によって効果が限定され、また非線形性補償を受信側で行うと、ノイズプロファイルを変化させてしまうため、軟判定誤り訂正符号の復号に悪影響を与えるからである。

30

【 0 0 1 2 】

このため、従来技術では送信側DSPで予等化を行ってきた。この予等化を用いた通信技術として非特許文献1に記載の技術がある。この技術では、アナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する受信信号の波形歪を、送信側で計算し、この計算された波形歪の逆の歪を送信信号の波形に与えて伝送し、受信時に信号の波形歪がキャンセル(相殺)されるようにしている。

【 先行技術文献 】

【 非特許文献 】

【 0 0 1 3 】

【 非特許文献 1 】 杉原隆嗣「高速光通信における予等化技術の現状と展望」信学技報 IEICE Technical Report OCS2011-41 (2011-7) pp.83-88.

40

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 4 】

しかしながら、アナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する波形歪は、受信側であれば受信信号又はトレーニング信号を用いて計測することが可能であるが、送信側では計測することが基本的にできない。このため、非特許文献1のように計算により波形歪を求めても実際とは誤差があるので、送信側で適正な予等化ができないという問題があった。

【 0 0 1 5 】

50

また、予め受信側で信号の波形歪を計測しておき、この波形歪を送信側で用いて予等化を行うことも可能であるが、この場合、環境変化等によりアナログ電子回路の非線形性や周波数特性が変動すると、予め求めた波形歪と誤差が生じるので、送信側で適正な予等化ができなくなるという問題が生じる。

【0016】

本発明は、このような事情に鑑みてなされたものであり、送信側において、受信側で受信される信号の波形歪を相殺可能な予等化を適正に行うことができる光データ伝送システムを提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0017】

上記課題を解決するための手段として、請求項1に係る発明は、伝送データとしての主信号で偏波を変調した光信号を光伝送路へ送信する光送信装置と、当該送信された光信号を受信して前記主信号を復調する光受信装置とを備える光トランシーバを、光伝送路の両端に備えて光伝送を行う光データ伝送システムであって、前記光受信装置は、一方側の光トランシーバで光信号を受信後に前記復調された主信号の波形歪を測定し、当該波形歪に係る波形歪情報を推定する推定部と、他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された波形歪情報を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号する復号部と、を備え、前記推定部は、前記復調された主信号の非線形歪を測定し、当該測定された非線形歪から、前記波形歪情報としての非線形伝達関数を推定すると共に、他方側の光トランシーバから受信した主信号に多重化されたトレーニング信号系列の特定周波数帯域のエネルギーを測定し、当該測定された特定周波数帯域のエネルギー量に対応する線形伝達関数を推定し、前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定部で推定された前記線形伝達関数及び前記非線形伝達関数を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、前記光送信装置は、前記推定部で推定された前記線形伝達関数及び前記非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成する生成部と、前記主信号に、特定周波数帯域にエネルギーが集中した既知のトレーニング信号系列を多重化する系列多重部と、前記推定部で推定された波形歪情報と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化する多重部と、前記復号部で復号された波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行う予等化部と、前記予等化された主信号及び前記推定された波形歪情報を含む多重化信号で偏波を変調して光信号に変換する変換部と、を備え、前記生成部は、前記推定部で推定された前記線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する前記系列多重部でトレーニング信号系列が多重された主信号とを多重化し、前記予等化部は、前記復号部で復号された線形伝達関数及び非線形伝達関数を用いて、他方側の光トランシーバで受信される光信号の波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行うことを特徴とする光データ伝送システムである。

【0018】

この構成によれば、一方側の光トランシーバ（一方側ともいう）が光伝送路を介して他方側の光トランシーバ（他方側ともいう）に光信号を送信する際に、一方側から光送信する多重化信号に含まれる主信号に対して、他方側から受信した波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、これから送信する多重化信号中の主信号の予等化を行う。上記の波形歪情報は、一方側が送信した光信号を他方側が受信して推定した波形歪情報なので、一方側のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する信号の波形歪を示している。

【0019】

このことから、上述したように一方側において、他方側から受信した波形歪情報で、他方側へ送信する主信号に対して予等化を行えば、次のような作用効果が得られる。即ち、一方側から送信された光信号が他方側で受信された際に、光信号には本来発生する波形歪が打ち消されるように予等化処理が施されているので、他方側で受信された光信号において波形歪を低減又は無くすることができる。このように、本発明によれば、送信側（一方側の光トランシーバ）において、受信側（他方側の光トランシーバ）で受信される信号の波

10

20

30

40

50

形歪を相殺可能な予等化を適正に行うことができる。また、予等化を行う波形歪情報として、他方側からの光信号を復調した主信号の線形歪及び非線形歪を測定し推定した線形伝達関数及び非線形伝達関数を用いるようにした。これらの伝達関数は、一方側から光信号を光伝送路を介して他方側へ送信した際に、他方側へどのように伝達されるかの信号状態を関数で表している。このため、それらの伝達関数を予等化に用いれば、一方側から他方側へ送信する主信号の予等化を、より精度良く行うことができる。更に、トレーニング信号系列の特定周波数のエネルギーを測定すると、エネルギーが低下していれば、その周波数の信号波形が歪んでいることが分かる。この歪んだ信号は、他方側から送信されてきたものである。そこで、上記の低下したエネルギー量に対応付けられた線形伝達関数を他方側へ送信し、他方側の予等化部で、その線形伝達関数を前述したように用いて予等化を行う。この予等化により、他方側から主信号を光信号として送信し、一方側で受信すれば、受信された主信号には線形歪成分が低減又は無い状態となる。

10

【 0 0 2 2 】

請求項2に係る発明は、前記光受信装置において、前記推定部は、仮判定処理により他方側の光トランシーバから受信した主信号を既知の基準主信号と比較して波形歪を求め、この波形歪の線形歪成分が最小となるように、適応等化アルゴリズムにより前記線形伝達関数に対応するタップ係数ベクトルを推定し、前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された前記タップ係数ベクトルを、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、前記光送信装置において、前記生成部は、前記推定されたタップ係数ベクトルをコード化して制御信号を生成し、前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、前記予等化部は、FIRフィルタを備え、前記多重化された主信号の予等化を行うように、当該FIRフィルタの重み付け係数として前記復号部で復号されたタップ係数ベクトルを用いることを特徴とする請求項1に記載の光データ伝送システムである。

20

【 0 0 2 3 】

この構成によれば、次のような作用効果を得ることができる。例えば、受信された主信号系列において、現信号よりも1つ前の信号(シンボル)が現信号に混ざって波形歪が生じているとする。この場合に、FIRフィルタにおいて、1つ前の信号を、線形伝達関数に対応する重み付け係数としてのタップ係数ベクトルでマイナスとし、これを現信号に加算すれば、上記の混ざりを無くして波形歪の線形歪成分を相殺できる。このように、FIRフィルタのタップ係数ベクトルを推定して重み付けを行えば、他方側へ送信する主信号の線形歪を打ち消すように、主信号の予等化を行うことができる。

30

【 0 0 2 4 】

請求項3に係る発明は、前記光受信装置において、前記推定部は、他方側の光トランシーバから受信した主信号と既知の基準主信号との差分を取って波形歪を求め、この波形歪の非線形歪成分が最小となるように、適応等化アルゴリズムにより前記非線形伝達関数に対応するタップ係数ベクトルを推定し、前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された前記タップ係数ベクトルを、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、前記光送信装置において、前記生成部は、前記推定されたタップ係数ベクトルをコード化して制御信号を生成し、前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、前記予等化部は、非線形FIRフィルタを備え、前記多重化された主信号の予等化を行うように、当該非線形FIRフィルタの重み付け係数として前記復号部で復号されたタップ係数ベクトルを用いることを特徴とする請求項1に記載の光データ伝送システムである。

40

【 0 0 2 5 】

この構成によれば、次のような作用効果を得ることができる。例えば、受信された主信号系列において、現信号よりも1つ前の信号(シンボル)が現信号に混ざって波形歪が生じている場合に、非線形FIRフィルタにおいて、1つ前の信号を重み付け係数としての非線形伝達関数に対応するタップ係数ベクトルでマイナスとする。これを現信号に加算

50

すれば、その混ざりを無くして波形歪の非線形歪成分を相殺できる。このように、非線形 F I R フィルタのタップ係数ベクトルを推定して重み付けを行えば、他方側へ送信する主信号の非線形歪を打ち消すように、主信号の予等化を行うことができる。

【 0 0 2 8 】

請求項 4 に係る発明は、前記光受信装置において、前記推定部は、仮判定処理により他方側の光トランシーバから受信した主信号のシンボルの分布が偏ったエラーベクトル群の平均値を算出し、当該算出された平均値に対応する前記非線形伝達関数を推定し、前記復号部は、前記他方側の光トランシーバにおいて前記推定と同様に推定された非線形伝達関数を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号し、前記光送信装置において、前記生成部は、前記推定された非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、前記多重部は、前記生成された制御信号と、前記他方側の光トランシーバへ送信する主信号とを多重化し、前記予等化部は、前記復号部で復号された非線形伝達関数を用いて、前記他方側の光トランシーバで受信される光信号の波形歪を打ち消すように、前記多重化された主信号の予等化を行うことを特徴とする請求項 1 に記載の光データ伝送システムである。

10

【 0 0 2 9 】

この構成によれば、予等化が、波形歪が生じていることを示すエラーベクトル群の平均値（非線形伝達関数）で行なわれるが、言い換えれば、エラーベクトル群の平均値を打ち消す逆ベクトルを発生し、この逆ベクトルで他方側へ送信する主信号に対して予等化が行なわれている。このように、一方側が、他方側から受信した主信号から、波形歪を示すエラーベクトル群の平均値に対応する非線形伝達関数を復号する。この復号された非線形伝達関数は、一方側のアナログ電子回路の非線形性に起因する非線形歪に対応している。従って、一方側において、その復号された非線形伝達関数で、他方側へ光送信する主信号に対して予等化を行えば、他方側で受信された主信号には非線形歪成分が低減又は無い状態となる。

20

【発明の効果】

【 0 0 3 0 】

本発明によれば、送信側において、受信側で受信される信号の波形歪を相殺可能な予等化を適正に行うことができる光データ伝送システムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

30

【 0 0 3 1 】

【図 1】本発明の実施形態に係る光データ伝送システムの構成を示すブロック図である。

【図 2】本実施形態の光データ伝送システムの光トランシーバの構成を示すブロック図である。

【図 3】本実施形態の光データ伝送システムの具体構成例を示す回路図である。

【図 4】本実施形態の光データ伝送システムの具体構成における光変調器の接続構成を示す回路図である。

【図 5】F I R フィルタの構成を示すブロック図である。

【図 6】非線形 F I R フィルタの構成を示すブロック図である。

【図 7】本実施形態の変形例 3 の光トランシーバの構成を示すブロック図である。

40

【図 8】(a) 2 つ以上の特定周波数に電力が集中することを示す周波数スペクトル図、(b) I Q 平面上の B P S K 信号 - S , S を示す図である。

【図 9】I Q 平面上のエラーベクトル及びエラーベクトルの分布の偏りを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 3 2 】

以下、本発明の実施形態を、図面を参照して説明する。

<実施形態の構成>

図 1 は、本発明の実施形態に係る光データ伝送システムの構成を示すブロック図である。

。

図 1 に示す光データ伝送システム 1 0 は、並列に布設された光伝送路としての 2 本の光

50

ファイバ 11, 12 と、光ファイバ 11, 12 の両端に接続された光トランシーバ 14, 15 とを備えて構成されている。光ファイバ 11, 12 の途中には、必要に応じて光増幅器 17, 18 が介挿されるようになっている。例えば、光ファイバ 11, 12 の長さが概ね 100 km を超える場合には、光ファイバ 11, 12 の途中に光増幅器 17, 18 が接続されて、光信号の増幅を行う。

【0033】

光トランシーバ 14, 15 は、光送信装置 20 及び光受信装置 30 を備える。光トランシーバ 14 の光送信装置 20 と、光トランシーバ 15 の光受信装置 30 とが 1 本の光ファイバ 11 で接続され、光トランシーバ 15 の光送信装置 20 と、光トランシーバ 14 の光受信装置 30 とが 1 本の光ファイバ 12 で接続されている。

10

【0034】

本実施形態の特徴は、まず、一方側の光トランシーバ 14 の光受信装置 30 で受信された信号の波形歪を測定して波形歪情報を推定する。その測定された波形歪は、他方側の光トランシーバ 15 のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する波形歪である。次に、一方側の光トランシーバ 14 の光送信装置 20 において、その推定された波形歪情報を制御信号として主信号に多重化し、この多重化された信号を光ファイバ 11 へ送信する。

【0035】

その光ファイバ 11 を経由して送信されてきた信号を、他方側の光トランシーバ 15 の光受信装置 30 で受信して制御信号を分離し、他方側の光トランシーバ 15 の光送信装置 20 において、その分離された制御信号に示される波形歪情報で主信号の予等化を行う。つまり、波形歪情報による波形歪を打ち消す波形歪（例えば、逆の波形歪）で送信信号の予等化を行うようにした。

20

【0036】

その予等化は、一方側の光トランシーバ 14 においても同様に行なわれる。また、波形歪の推定も他方側の光トランシーバ 15 において同様に行なわれる。

但し、主信号は、伝送データ系列（送信情報）を含むデジタル信号である。また、波形歪情報は、後述する線形伝達関数と非線形伝達関数を含む。また、一方側の光トランシーバ 14 は一方側、他方側の光トランシーバ 15 は他方側とも称す。

【0037】

光送信装置 20 は、主信号を、平行又は直交する X 偏波と Y 偏波とを利用して光ファイバ 11, 12 を介して並列伝送する機能を有し、送信信号処理部 40 と、E/O（電気/光）変換部 50 とを備えて構成されている。なお、請求項記載の変換部は、E/O 変換部 50 で構成される。

30

光受信装置 30 は、光ファイバ 11, 12 から受信した信号を復調する機能を有し、受信信号処理部 60 と、O/E（光/電気）変換部 70 とを備えて構成されている。

【0038】

また、光トランシーバ 14, 15 の各々において、受信信号処理部 60 と送信信号処理部 40 は、データの入出力処理を行うデジタル I/F（インタフェース）80 で接続されている。デジタル I/F 80 には、例えば、シリアル通信を行うためのシリアルバスである I²C（Inter-Integrated Circuit）が用いられる。

40

【0039】

送信信号処理部 40 は、図 2 に示すように、入力 I/F 41 と、制御信号多重部 42 と、制御信号生成部 43 と、送信側予等化部 44 と、出力 I/F 45 とを備えて構成されている。なお、制御信号多重部 42 を多重部 42、制御信号生成部 43 を生成部 43、送信側予等化部 44 を予等化部 44 とも称す。なお、入力 I/F 41 及び出力 I/F 45 は、信号又はデータの入出力処理を行う。

【0040】

受信信号処理部 60 は、入力 I/F 61 と、制御信号分離部 62 と、制御信号復号部 63 と、受信側等化部 64 と、線形・非線形伝達関数推定部 65 と、出力 I/F 66 とを備えて

50

構成されている。なお、制御信号分離部 6 2 は分離部 6 2、制御信号復号部 6 3 は復号部 6 3、受信側等化部 6 4 は等化部 6 4、線形・非線形伝達関数推定部 6 5 は推定部 6 5 とも称す。また、線形・非線形伝達関数推定部 6 5 は、線形伝達関数推定部と、非線形伝達関数推定部とに分けて設けてもよい。入力 I F 6 1 及び出力 I F 6 6 は、信号又はデータの入出力処理を行う。

【 0 0 4 1 】

受信信号処理部 6 0 において、分離部 6 2 は、他方側の光トランシーバ 1 5 (図 1) から送信されて一方側で受信された光信号が、O / E 変換部 7 0 で光電気変換された電気信号である主信号を、制御信号と主信号とに分離し、制御信号を復号部 6 3 へ出力すると共に、主信号を等化部 6 4 及び推定部 6 5 へ出力する。

10

【 0 0 4 2 】

等化部 6 4 は、主信号の等化処理を行って送信側の送信情報を復元し、これを出力 I F 6 6 を介して出力する。

【 0 0 4 3 】

推定部 6 5 は、主信号から後述のように他方側の波形歪情報としての線形伝達関数と非線形伝達関数を推定 (第 1 推定) する。主信号には、他方側の光トランシーバ 1 5 のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する波形歪が含まれており、この波形歪は、線形歪と非線形歪とから成る。そこで、推定部 6 5 は、受信信号の線形歪を測定し、この測定された線形歪データから、信号波形に線形歪を与えた線形伝達関数を推定 (第 1 推定) すると共に、受信信号の非線形歪を測定し、この測定された非線形歪データから、非線形歪を与えた非線形伝達関数を推定 (第 1 推定) する。この推定された他方側の線形伝達関数と非線形伝達関数は、生成部 4 3 へ出力される。

20

【 0 0 4 4 】

復号部 6 3 は、分離部 6 2 で分離された他方側から送信されてきた制御信号を復号して、一方側の光トランシーバ 1 4 の線形伝達関数と非線形伝達関数を取得し、これら伝達関数を予等化部 4 4 へ出力する。これら伝達関数は、一方側から他方側へ光信号を送信した際に他方側の光トランシーバ 1 5 がその主信号を受信し、この主信号に含まれる波形歪から、他方側の推定部 6 5 が上述同様に推定 (第 1 推定) した一方側の線形伝達関数と非線形伝達関数である。つまり、これら伝達関数は、一方側の光トランシーバ 1 5 のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する波形歪に係るものである。

30

【 0 0 4 5 】

送信信号処理部 4 0 において、生成部 4 3 は、推定部 6 5 で推定された他方側の線形伝達関数及び非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、制御信号を多重部 4 2 へ出力する。その制御信号は、一方側から他方側の光トランシーバ 1 5 に通知され、他方側の光送信装置 2 0 (図 1) での予等化処理に用いられる。

【 0 0 4 6 】

多重部 4 2 は、生成部 4 3 で生成された制御信号と、入力 I F 4 1 から入力された主信号とを多重化し、この多重化信号を予等化部 4 4 へ出力する。

【 0 0 4 7 】

予等化部 4 4 は、多重部 4 2 からの多重化信号を出力 I F 4 5 を介して E / O 変換部 5 0 へ出力すると共に、復号部 6 3 で復号された一方側の線形伝達関数と非線形伝達関数を用いて後述の予等化の処理を行う。即ち、予等化部 4 4 は、一方側の光トランシーバ 1 4 から送信する多重化信号に含まれる主信号に対して、一方側の線形伝達関数で線形予等化を行うと共に、一方側の非線形伝達関数で非線形予等化を行う。これら予等化は、一方側の光トランシーバ 1 4 から他方側の光トランシーバ 1 5 へ届いた光信号 (主信号) の波形歪を打ち消すように、送信対象の主信号の振幅と位相を制御して行なわれる。言い換えれば、予等化は、一方側の光トランシーバ 1 4 から他方側の光トランシーバ 1 5 へ届いた光信号の波形歪を打ち消す波形歪 (例えば、逆の波形歪) で主信号に対して行なわれる。

40

【 0 0 4 8 】

つまり、予等化部 4 4 によって主信号には、他方側の光トランシーバ 1 5 で受信された

50

際に、本来発生する波形歪が打ち消されるように予等化処理が施されているので、他方側で受信された光信号では波形歪が低減又は無い状態となる。

【 0 0 4 9 】

< 光トランシーバの具体構成及び動作 >

上述した予等化処理を行う光トランシーバ 1 4 , 1 5 を、デバイスにより具体的に構成した例を図 3 に示す。なお、光トランシーバ 1 4 を第 1 光トランシーバ 1 4、光トランシーバ 1 5 を第 2 光トランシーバ 1 5 とも称す。

図 3 の光送信装置 2 0 に示すように、送信信号処理部 4 0 は、DSP (Digital Signal Processor) 4 0 a により構成され、E/O 変換部 5 0 は、DAC (Digital to Analog Converter) 4 7 a ~ 4 7 d と、偏波多重 QPSK 変調器モジュール 5 0 a (モジュール 5 0 a ともいう) と、送信用 LD (Laser Diode) 5 0 b とを備えて構成されている。

10

【 0 0 5 0 】

モジュール 5 0 a は、光変調器 5 2 x , 5 2 y と、ドライバ 5 3 a ~ 5 3 d と、偏波合成器 5 4 とを備えて構成されている。

光変調器 5 2 x , 5 2 y は、図 4 に光変調器 5 2 x を代表して示すように、LiNbO₃ (ニオブ酸リチウム) 等の光学材料基板 K の上に光導波路 5 5 が形成され、1 本の光導波路 5 5 を 2 分岐した分岐光導波路 5 5 a , 5 5 b の上に電極 E a , E b が載置固定されている。更に、分岐光導波路 5 5 a , 5 5 b が、光送信信号の出力側で 1 本の光導波路 5 5 に結合されて光変調器 5 2 x , 5 2 y が構成されている。

【 0 0 5 1 】

20

図 4 に示すように、DSP 4 0 a で構成される予等化部 4 4 (図 2 参照) は、送信側予等化部 4 4 c と、送信側予等化部 4 4 s とから構成されている。予等化部 4 4 c は、X 偏波における cos 成分 (直交位相成分) を与えるためのデジタル予等化信号を出力する。予等化部 4 4 s は、sin 成分 (同相位相成分) を与えるためのデジタル予等化信号を出力する。

【 0 0 5 2 】

予等化部 4 4 c の出力側は、出力 IF 4 5 c、DAC 4 7 a 及びドライバ 5 3 a を介して、分岐光導波路 5 5 a 上の電極 E a に接続されている。

予等化部 4 4 s の出力側は、出力 IF 4 5 s、DAC 4 7 b 及びドライバ 5 3 b を介して、分岐光導波路 5 5 b 上の電極 E b に接続されている。

30

【 0 0 5 3 】

光変調器 5 2 x の入力側の光導波路 5 5 には、送信用 LD 5 0 b (図 3) のレーザ光出力側が接続されている。出力側の光導波路 5 5 には、偏波合成器 5 4 (図 3) が接続されている。偏波合成器 5 4 の出力側は光ファイバ 1 1 (図 3) に接続されている。

この X 偏波の光変調器 5 2 x と同様に、Y 偏波の光変調器 5 2 y も構成されている。

【 0 0 5 4 】

次に、図 3 に戻って、光トランシーバ 1 5 の光受信装置 3 0 に示すように、O/E 変換部 7 0 は、光受信フロントエンドモジュール 7 0 a (モジュール 7 0 a ともいう) 及び局部発振 LD (Laser Diode) 7 0 b を備えて構成され、受信信号処理部 6 0 は、DSP 6 0 a により構成されている。

40

【 0 0 5 5 】

モジュール 7 0 a は、偏波分離器 7 1 と、90 度ハイブリッド PD (Photo Diode) 7 2 x , 7 2 y と、ADC (Analog to Digital Converter) 7 3 a ~ 7 3 d とを備えて構成されている。

偏波分離器 7 1 の入力側は、光ファイバ 1 1 に接続されている。偏波分離器 7 1 の X 偏波側と Y 偏波側に分岐した出力側は、X 偏波の出力側が局部発振 LD 7 0 b のレーザ光出力側と一対に、90 度ハイブリッド PD 7 2 x の入力側に接続され、Y 偏波の出力側が局部発振 LD 7 0 b のレーザ光出力側と一対に、90 度ハイブリッド PD 7 2 y の入力側に接続されている。

90 度ハイブリッド PD 7 2 x , 7 2 y の出力側は、ADC 7 3 a ~ 7 3 d を介して D

50

S P 6 0 a に接続されている。

【 0 0 5 6 】

このような構成の光送信装置 2 0 及び光受信装置 3 0 を備える光トランシーバ 1 4 , 1 5 の動作を説明する。

第 1 光トランシーバ 1 4 の光送信装置 2 0 において、D S P 4 0 a では前述の送信信号処理部 4 0 での処理と同様な処理が行なわれる。即ち、D S P 4 0 a の処理によりデジタル主信号とデジタルの制御信号との多重化信号中の主信号が予等化され、この予等化後のデジタルの多重化信号が D A C 4 7 a ~ 4 7 d でアナログ信号に変換される。この変換されたアナログの多重化信号は、ドライバ 5 3 a ~ 5 3 d で増幅された後、光変調器 5 2 x , 5 2 y の電極 E a , E b に印加される。

10

【 0 0 5 7 】

X 偏波側の光変調器 5 2 x の各光導波路 5 5 には、送信用 L D 5 0 b のレーザ光が入射されているので、このレーザ光が、電極 E a , E b に印加された多重化信号に応じて振幅及び位相が変調された X 偏波の光信号（変調光ともいう）となる。X 偏波の変調光は各々が、c o s 成分及び s i n 成分を有する。

Y 偏波側も同様に変調される。また、X 偏波と Y 偏波とは、平行又は直交状態となる。

【 0 0 5 8 】

上記の変調では、多重化信号中の主信号が予等化されているので、X 偏波と Y 偏波の変調光における主信号成分が予等化された状態となっている。X 偏波と Y 偏波の変調された光信号は、偏波合成器 5 4 で偏波合成され、光ファイバ 1 1 へ送信される。

20

【 0 0 5 9 】

光ファイバ 1 1 を伝送した光信号は、第 2 光トランシーバ 1 5 の光受信装置 3 0 で受信され、偏波分離器 7 1 により、その受信した光信号に対して光領域で偏波分離が行なわれ、2 つの直交する偏波（X 偏波、Y 偏波）に分離されて各 9 0 度ハイブリッド P D 7 2 x , 7 2 y へ入射される。この際、9 0 度ハイブリッド P D 7 2 x , 7 2 y には、局部発振 L D 7 0 b からのレーザ光も入射されている。

【 0 0 6 0 】

9 0 度ハイブリッド P D 7 2 x , 7 2 y は、光電気変換を行うものであり、局部発振 L D 7 0 b からのレーザ光を用いてコヒーレント受信した X 偏波及び Y 偏波の信号光の、光電界を直交する成分に分離し、アナログの電気信号に変換する。この変換された X 偏波の c o s 成分と s i n 成分の信号は、A D C 7 3 a , 7 3 b でデジタル信号に変換され、Y 偏波の c o s 成分と s i n 成分の信号は、A D C 7 3 c , 7 3 d でデジタル信号に変換されて D S P 6 0 a に入力される。

30

【 0 0 6 1 】

D S P 6 0 a は、入力されるデジタル信号から、前述した受信信号処理部 6 0 と同様の処理を行い、第 1 光トランシーバ 1 4 側（第 1 側）の線形伝達関数と非線形伝達関数を推定すると共に、第 1 光トランシーバ 1 4 が送信した制御信号を復号して、第 2 光トランシーバ 1 5 側（第 2 側）の線形伝達関数と非線形伝達関数を求める。第 1 側の線形伝達関数及び非線形伝達関数と、第 2 側の線形伝達関数及び非線形伝達関数とは、第 2 側の光送信装置 2 0 へ出力される。

40

【 0 0 6 2 】

第 2 側の光送信装置 2 0 では、図示せぬ D S P により構成される送信信号処理部 4 0 が前述と同様に、第 1 側の線形伝達関数及び非線形伝達関数から第 1 側の制御信号を生成し、この制御信号を主信号に多重化する。また、第 2 側の線形伝達関数及び非線形伝達関数により第 2 側から第 1 側へ送信する主信号に対して前述した予等化処理を行う。この光信号として送信される主信号には、第 1 光トランシーバ 1 4 で受信された際に、本来発生する波形歪が打ち消されるように予等化処理が施されているので、第 1 光トランシーバ 1 4 で受信された光信号では波形歪が低減又は無い状態となる。

【 0 0 6 3 】

< 実施形態の効果 >

50

以上説明したように、本実施形態の光データ伝送システム10は、伝送データとしての主信号で偏波を変調した光信号を光ファイバ11又は12へ送信する光送信装置20と、当該送信された光信号を受信して主信号を復調する光受信装置30とを備える光トランシーバを、光ファイバ11、12の両端に備えて光伝送を行うシステムである。

【0064】

本実施形態の特徴は、光受信装置30を、一方側の光トランシーバ14で光信号を受信後に復調された主信号の波形歪を測定し、この波形歪に係る波形歪情報を推定する推定部65と、他方側の光トランシーバ15において上記推定と同様に推定された波形歪情報を、当該他方側の光トランシーバ15からの光信号の受信後に復号する復号部63とを備える構成とした。

10

【0065】

また、光送信装置20を、推定部65で推定された波形歪情報と、他方側の光トランシーバ15へ送信する主信号とを多重化する多重部42と、復号部63で復号された波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、多重化された主信号の予等化を行う予等化部44と、予等化された主信号及び前記推定された波形歪情報を含む多重化信号で偏波を変調して光信号に変換するE/O変換部50とを備える構成とした。

【0066】

この構成によれば、一方側の光トランシーバ14（一方側ともいう）が光ファイバ11を介して他方側の光トランシーバ15（他方側ともいう）に光信号を送信する際に、一方側から光送信する多重化信号に含まれる主信号に対して、他方側から光ファイバ12を介して受信した波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、これから送信される多重化信号中の主信号の予等化を行う。上記の波形歪情報は、一方側が送信した光信号を他方側が受信して推定した波形歪情報なので、一方側のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する信号の波形歪を示している。

20

【0067】

このことから、上述したように一方側において、他方側へ送信する主信号に対して予等化を行えば次のような作用効果が得られる。即ち、一方側から送信された光信号が他方側で受信された際に、光信号には本来発生する波形歪が打ち消されるように予等化処理が施されているので、他方側で受信された光信号において波形歪を低減又は無くすることができる。このように、本発明によれば、送信側（一方側の光トランシーバ14）において、受信側（他方側の光トランシーバ15）で受信される信号の波形歪を相殺可能な予等化を適正に行うことができる。

30

【0068】

また、推定部65は、一方側で光信号を受信後に復調された主信号の線形歪及び非線形歪を測定し、この測定された線形歪及び非線形歪から、上記の波形歪情報としての線形伝達関数及び非線形伝達関数を推定（第1推定）する。復号部63は、他方側の光トランシーバ15において上記推定（第1推定）と同様に推定された波形歪情報としての線形伝達関数及び非線形伝達関数を、当該他方側の光トランシーバからの光信号の受信後に復号する。

【0069】

更に、光送信装置20は、推定部65で第1推定された線形伝達関数及び非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成する生成部43を備える。

40

多重部42は、その生成された制御信号と、他方側の光トランシーバ15へ送信する主信号とを多重化し、予等化部44は、復号部63で復号された線形伝達関数及び非線形伝達関数を用いて、他方側の光トランシーバ15で受信される光信号の波形歪を打ち消すように、多重化された主信号の予等化を行うようにした。

【0070】

このように、予等化を行う波形歪情報として、他方側からの光信号を復調した主信号の線形歪及び非線形歪を測定し推定した線形伝達関数及び非線形伝達関数を用いるようにした。これらの伝達関数は、一方側から光信号を光ファイバを介して他方側へ送信した際に

50

、他方側へどのように伝達されるかの信号状態を関数で表している。このため、それらの伝達関数を予等化に用いれば、一方側から他方側へ送信する主信号の予等化を、より精度良く行うことができる。

【 0 0 7 1 】

< 実施形態の変形例 1 >

次に、本実施形態の変形例 1 について説明する。但し、変形例 1 では、推定部 6 5 は前述した実施形態のように、線形歪の測定は行なわない。これは後述の変形例 2 ~ 4 においても同様である。

【 0 0 7 2 】

変形例 1 の特徴は、まず、図 2 に示す予等化部 4 4 を、図 5 に示す F I R (Finite Impulse Response : 有限インパルス応答) フィルタ 9 0 を備えて構成した。

更に、図 2 に示す推定部 6 5 は、仮判定処理により他方側の光トランシーバ 1 5 (図 1) から受信した主信号を、図示せぬ記憶部に記憶された基準主信号と比較して波形歪を求め、更に、推定部 6 5 は、適応等化アルゴリズムとしての判定指向 L M S (Least Mean Square) アルゴリズムによって、その求めた波形歪の線形歪成分が最小となるように、F I R フィルタ 9 0 で用いられるタップ係数ベクトル (タップ係数ともいう) を推定 (第 2 推定) する。このタップ係数は、前述した線形伝達関数として扱われる。

【 0 0 7 3 】

そして、生成部 4 3 が、推定 (第 2 推定) されたタップ係数をコード化して制御信号を生成し、多重部 4 2 へ出力する。多重部 4 2 が、主信号と制御信号とを多重化し、この多重化信号が光信号に変換されて他方側の光トランシーバ 1 5 へ送信されるようにした。

【 0 0 7 4 】

また、他方側の光トランシーバ 1 5 (図 1) において上記と同様に推定 (第 2 推定) された線形伝達関数に対応するタップ係数が、主信号に多重化されて光変換された光信号を一方側の光トランシーバ 1 4 で受信する。更に、復号部 6 3 で、その受信信号からタップ係数を復号する。この復号されたタップ係数を F I R フィルタ 9 0 に重み付け係数として付与し、予等化を行うようにした。

【 0 0 7 5 】

ここで、図 5 に示す F I R フィルタ 9 0 について説明する。F I R フィルタ 9 0 は、直列に多段接続された複数の遅延回路 9 1 a ~ 9 1 c と、複数の乗算器 9 2 a ~ 9 2 d と、加算器 9 3 とを備えて構成されている。遅延回路 9 1 a の信号入力側には乗算器 9 2 a が接続され、遅延回路 9 1 a , 9 1 b 間には乗算器 9 2 b、遅延回路 9 1 b , 9 1 c 間には乗算器 9 2 c、遅延回路 9 1 c の信号出力側には乗算器 9 2 d が接続されている。各乗算器 9 2 a ~ 9 2 d の出力側は、加算器 9 3 に接続されている。

【 0 0 7 6 】

各遅延回路 9 1 a ~ 9 1 c で、入力信号系列 x_k を一定時間遅延させて行くことで、過去の信号を遡って検出可能となっている。次に、各乗算器 9 2 a ~ 9 2 d で個々の重み付け係数 $* a_0$, $* a_1$, $* a_2$, $* a_2$ を、入力信号系列 x_k 及び各遅延回路 9 1 a ~ 9 1 c の遅延信号の個々に乗算して重み付けを行い、これら結果を加算器 9 3 で加算して出力信号系列 y_k として出力する。出力信号系列 y_k は、入力信号系列 x_k が 1 つ入力される毎に 1 つ出力される。

【 0 0 7 7 】

この F I R フィルタ 9 0 は、入力信号系列 x_k と出力信号系列 y_k との入出力関係が下式 (1) で表される。

【 数 1 】

$$y_k = \sum_{m=0}^l a_m x_{k-m}$$

... 式 (1)

10

20

30

40

50

但し、 a_m はタップ係数（重み付け係数）に対応している。

【0078】

このFIRフィルタ90では、推定されるタップ係数が、各重み付け係数 $*a_0 \sim *a_2$ として各乗算器92a~92dに用いられるようになっている。

ここで、FIRフィルタ90においては、送信側光トランシーバの波形歪を補償するために、信号の歪が最適に除去できる丁度良い重み付け係数がある。この係数について説明する。

【0079】

例えば、受信信号の波形が歪んでいる場合は、時間軸上において前後の主信号シンボルの成分が少し混ざった状態となっている。この例として、主信号系列において、現信号よりも1つ前の信号（シンボル）が現信号に混ざっているのであれば、FIRフィルタ90において、1つ前の信号を線形伝達関数に対応するタップ係数（重み付け係数）でマイナスとし、これを現信号に加算すれば、その混ざりを無くして波形歪における線形歪成分をキャンセルできる。このように、FIRフィルタ90のタップ係数を推定して重み付けを行えば、他方側の光トランシーバ15へ送信する主信号の線形歪の線形歪成分を打ち消すように、主信号の予等化を行うことができる。

【0080】

<実施形態の変形例2>

次に、本実施形態の変形例2について説明する。変形例2の特徴は、まず、予等化部44を、図6に示す非線形FIRフィルタ100を備えて構成した。

更に、図2に示す推定部65が、他方側の光トランシーバ15（図1）から受信した主信号と、図示せぬ記憶部に記憶された基準主信号との差分を取って波形歪を求める。更に、推定部65が、判定指向LMSアルゴリズムによって、その求めた波形歪の非線形歪成分が最小となるように、非線形FIRフィルタ100で用いられるタップ係数を推定（第3推定）する。このタップ係数は、前述した非線形伝達関数として扱われる。

【0081】

そして、生成部43が、推定（第3推定）されたタップ係数をコード化して制御信号を生成し、多重部42へ出力する。多重部42が、主信号と制御信号とを多重化し、この多重化信号が光信号に変換されて他方側の光トランシーバ15へ送信されるようにした。

【0082】

また、他方側の光トランシーバ15（図1）において、上記と同様に推定（第3推定）された非線形伝達関数に対応するタップ係数が、主信号に多重化されて光変換された光信号を一方側の光トランシーバ14で受信する。更に、復号部63で、その受信信号からタップ係数を復号する。この復号されたタップ係数を非線形FIRフィルタ100に重み付け係数として付与し、予等化を行うようにした。

【0083】

ここで、図6に示す非線形FIRフィルタ100について説明する。非線形FIRフィルタ100は、複数の累乗回路101a~101bと、複数の乗算器102a~102cと、加算器103とを備えて構成されている。但し、累乗回路101aは2乗回路101aであり、累乗回路101bは3乗回路101bであるとする。

【0084】

乗算器102a、2乗回路101a及び3乗回路101bには、入力信号系列 x_k が並列入力される構成となっている。2乗回路101aの出力側には乗算器102bが接続され、3乗回路101bの出力側には乗算器102cが接続されている。各乗算器102a~102cの出力側は、加算器103に接続されている。

【0085】

乗算器102aには、入力信号系列 x_k がそのまま入力される。2乗回路101aは入力信号系列 x_k を2乗し、この非線形信号を乗算器102bへ入力し、3乗回路101bは入力信号系列 x_k を3乗し、この非線形信号を乗算器102cへ入力する。次に、各乗算器102a~102cで個々の重み付け係数 $*b_0$ 、 $*b_1$ 、 $*b_2$ を、入力信号系列

10

20

30

40

50

x_k 及び各非線形信号の個々に乗算して重み付けを行い、これら結果を加算器 103 で加算して出力信号系列 y_z として出力する。出力信号系列 y_z は、入力信号系列 x_k が 1 つ入力される毎に 1 つ出力される。

【0086】

この非線形 FIR フィルタ 100 では、推定されるタップ係数が、各重み付け係数 $*b_0 \sim *b_2$ として各乗算器 102 a ~ 102 d に用いられるようになっている。

ここで、非線形 FIR フィルタ 100 においては、送信側光トランシーバの波形歪を補償するために、信号の歪が最適に除去できる丁度良い重み付け係数がある。この係数について説明する。

【0087】

例えば、受信信号の波形が歪んでいる場合は、時間軸上において前後の主信号シンボルの成分が少し混ざった状態となっている。この例として、主信号系列において、現信号よりも 1 つ前の信号（シンボル）が現信号に混ざっているのであれば、非線形 FIR フィルタ 100 において、1 つ前の信号を非線形伝達関数に対応するタップ係数（重み付け係数）でマイナスとする。これを現信号に加算すれば、その混ざりを無くして波形歪の非線形歪成分をキャンセルできる。このように、非線形 FIR フィルタ 100 のタップ係数を推定して重み付けを行えば、他方側の光トランシーバ 15 へ送信する主信号の非線形歪を打ち消すように、主信号の予等化を行うことができる。

【0088】

<実施形態の変形例 3 >

次に、本実施形態の変形例 3 について説明する。変形例 3 では、図 7 に示すように、送信信号処理部 40 に、トレーニング信号系列多重部（系列多重部ともいう）46 を備え、受信信号処理部 60 の推定部 65 に、ルックアップテーブル（記憶テーブルともいう）65t を備えた。

【0089】

系列多重部 46 は、主信号に、後述する特定の周波数帯域にエネルギーが集中した既知のトレーニング信号系列を多重化して、多重部 42 へ出力する。

記憶テーブル 65t は、推定部 65 で後述のように測定される特定周波数帯域のエネルギー量に、前述した線形伝達関数が予め対応付けられて格納されている。つまり、測定される大小のエネルギー量に、当該エネルギー量に応じた大小の線形伝達関数が予め対応付けられている。

【0090】

但し、上述の特定の周波数帯域にエネルギーが集中する、言い換えれば、複数の特定周波数にエネルギーが集中するとは、図 8 (a) に示すように、横軸に周波数 f 、縦軸にパワー P_w を取った際に、 f 軸上の特定周波数 f_1 、 f_2 に棒グラフで示すパワー成分が突出することをいう。パワー成分は、ピーク周波数である。

【0091】

更に説明すると、例えば BPSK (Binary Phase Shift Keying) 信号の $-S$ 、 S 、 $-S$ 、 S 、... を、図 8 (b) に示すように、 I 、 Q の時間軸上に時間波形 (= 信号系列) S 、 $-S$ で表し、この時間波形 S 、 $-S$ を FFT (高速フーリエ変換) して周波数領域で見ると、上記パワー成分となる。このパワー成分（ピーク周波数）を、「特定周波数帯域にエネルギーが集中する」と表現している。

【0092】

変形例 3 の特徴は、図 7 に示す一方側の光トランシーバ 14 の推定部 65 が、他方側の光トランシーバ 15 (図 1) から受信した主信号に多重化されたトレーニング信号系列を分離し、この分離したトレーニング信号系列の特定周波数帯域のエネルギーを測定 (第 4 推定) する。更に、推定部 65 は、その測定された特定周波数帯域のエネルギー量に対応付けられた線形伝達関数を、記憶テーブル 65t から検索して推定し、生成部 43 へ出力する。

【0093】

10

20

30

40

50

そして、生成部 4 3 は、その推定（第 4 推定）された線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、多重部 4 2 へ出力する。多重部 4 2 は、系列多重部 4 6 にてトレーニング信号系列が多重された主信号と、制御信号とを多重化し、この多重化信号が光信号に変換されて他方側の光トランシーバ 1 5 へ送信されるようにした。

【 0 0 9 4 】

また、他方側の光トランシーバ 1 5 において、上記と同様に推定（第 4 推定）された線形伝達関数が、主信号に多重化されて光変換された光信号を一方側の光トランシーバ 1 4 で受信する。更に、復号部 6 3 で、その受信信号から線形伝達関数を復号する。予等化部 4 4 で、その復号された線形伝達関数で予等化を行うようにした。

【 0 0 9 5 】

このように、特定周波数のエネルギーを測定すると、エネルギーが低下していれば、その周波数の信号波形が歪んでいることが分かる。この歪んだ信号は、他方側の光トランシーバ 1 5 から送信されてきたものなので、他方側のアナログ電子回路の非線形性や周波数特性に起因する波形歪が生じたものである。そこで、前記の低下したエネルギー量に対応付けられた線形伝達関数を他方側へ送信し、他方側の予等化部 4 4 で、その線形伝達関数を前述したように用いて予等化を行う。この予等化により、他方側から主信号を光信号として送信し、一方側の光トランシーバ 1 4 で受信すれば、受信された主信号には線形歪成分が低減又は無い状態となる。

【 0 0 9 6 】

< 実施形態の変形例 4 >

次に、本実施形態の変形例 4 について説明する。

変形例 4 の特徴は、図 2 に示す推定部 6 5 が、まず、仮判定処理により他方側の光トランシーバ 1 5（図 1）から受信した主信号のシンボルのエラーベクトル（後述）の平均値を算出する。

【 0 0 9 7 】

ここで、図 9 に示す I Q 平面上の例えば第 1 象限において、上記のように受信したシンボルの信号点 g 2 が、本来の信号点 g 1 からずれていた場合において、g 1 から g 2 に向かう矢印 V 1 をエラーベクトルという。このエラーベクトル V 1 が、例えば第 1 象限の破線楕円 1 1 0 で示すように、ある範囲に集中して分布している（分布が偏っている）場合、破線楕円 1 1 0 の部分で、受信された主信号に波形歪が生じていることが分かる。そこで、推定部 6 5 は、受信信号シンボルの分布が偏ったエラーベクトル V 1 群の平均値（エラーベクトル平均値という）を算出する。

【 0 0 9 8 】

更に、図 2 に示す推定部 6 5 は、その算出される大小のエラーベクトル平均値に、当該エラーベクトル平均値に応じた非線形伝達関数が予め対応付けられた図示せぬ記憶テーブル（上述の記憶テーブル 6 5 t 参照）を有している。推定部 6 5 は、上記の算出されたエラーベクトル平均値に対応付けられた非線形伝達関数を、記憶テーブルから検索して推定（第 5 推定）し、生成部 4 3 へ出力する。

【 0 0 9 9 】

生成部 4 3 は、推定（第 5 推定）された非線形伝達関数をコード化して制御信号を生成し、多重部 4 2 へ出力する。多重部 4 2 は、主信号と制御信号とを多重化し、この多重化信号が光信号に変換されて他方側の光トランシーバ 1 5 へ送信されるようにした。

【 0 1 0 0 】

また、他方側の光トランシーバ 1 5 において、上記と同様に推定（第 5 推定）された非線形伝達関数が、主信号に多重化されて光変換された光信号を一方側の光トランシーバ 1 4 で受信する。更に、復号部 6 3 で、その受信信号から非線形伝達関数を復号する。予等化部 4 4 で、その復号された線形伝達関数で、他方側へ送信する主信号に対して予等化を行うようにした。

【 0 1 0 1 】

つまり、その予等化は、波形歪が生じていることを示すエラーベクトル平均値に対応す

10

20

30

40

50

る非線形伝達関数で行なわれるが、言い換えれば、エラーベクトル平均値を打ち消す逆ベクトルを発生し、この逆ベクトルで送信主信号に対して予等化が行なわれることになる。

【0102】

このように、一方側の光トランシーバ14が、他方側の光トランシーバ15から受信した主信号から、波形歪を示すエラーベクトル平均値に対応する非線形伝達関数を復号する。この復号された非線形伝達関数は、一方側のアナログ電子回路の非線形性に起因する非線形歪に対応している。従って、一方側において、その復号された非線形伝達関数で、他方側へ光送信する主信号に対して予等化を行えば、他方側で受信された主信号には非線形歪成分が低減又は無い状態となる。

【0103】

以上説明した本実施形態及び変形例1～4によって、光ファイバ11, 12を介した両側の光トランシーバ14, 15で光信号を送受信する際に、その信号品質が改善され、ビットエラーレートの改善を図ることができる。

【0104】

一般的に、光信号の送信レートが高くなる程に信号品質が低下するので、高速化すると1シンボル当たりで使用できるエネルギーが低下する。このため、光送信装置の周波数特性が32Gbaudまでであれば信号品質を保持可能であるが、64Gbaudになると信号が歪んで信号品質が保持できない。

【0105】

しかし、本発明では、上述したように信号品質を改善することができるので、光トランシーバ14, 15のアナログ電子回路の帯域や線形性等の性能により制約されていた光データ伝送のスループットを大幅に向上することが可能である。例えば、従来32Gbaud程度であったボーレートを例えば64Gbaudに向上させることができる。これにより、従来の倍の254Gbit/sの通信容量を確保することができる。更には、従来のQPSK方式に対し、16QAM方式を使うことが可能になり、光データ伝送のスループットを大幅に向上させることが可能になる。

【符号の説明】

【0106】

- 10 光データ伝送システム
- 11, 12 光ファイバ
- 14, 15 光トランシーバ
- 20 光送信装置
- 30 光受信装置
- 40 送信信号処理部
- 42 制御信号多重部(多重部)
- 43 制御信号生成部(生成部)
- 44 送信側予等化部(予等化部)
- 46 トレーニング信号系列多重部(系列多重部)
- 60 受信信号処理部
- 62 制御信号分離部
- 63 制御信号復号部(復号部)
- 64 受信側等化部
- 65 線形・非線形伝達関数推定部(推定部)
- 65t ルックアップテーブル
- 50 E/O(電気/光)変換部
- 70 O/E(光/電気)変換部

【要約】

【課題】送信側において、受信側で受信される信号の波形歪を相殺可能な予等化を適正に行う。

【解決手段】光データ伝送システムは、光ファイバの両端に光トランシーバを備える。各

10

20

30

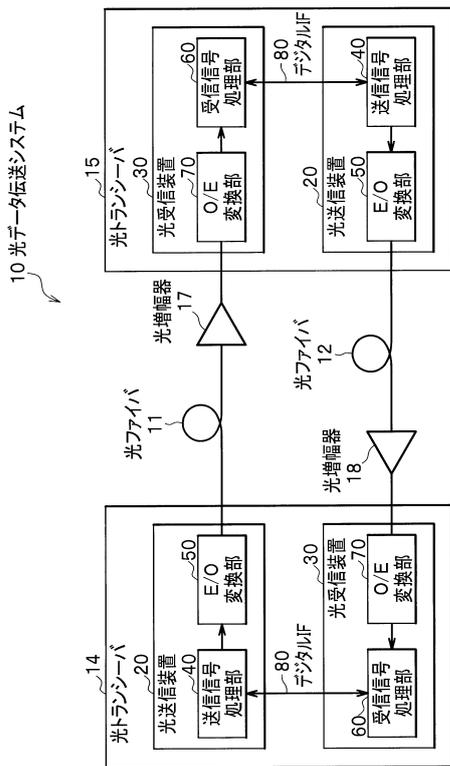
40

50

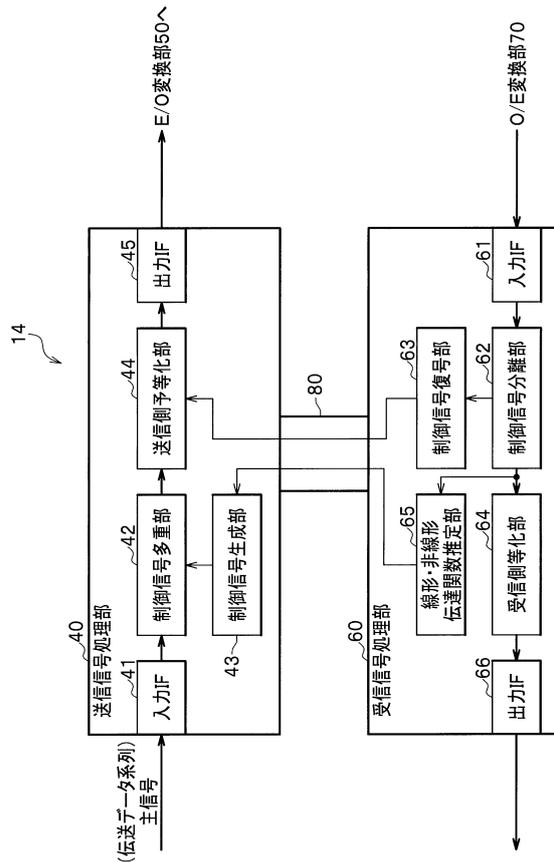
光トランシーバは光受信装置及び光送信装置を有する。光受信装置は、光信号を受信後に復調された主信号の波形歪を測定し、波形歪情報を推定する推定部65と、他方側の光トランシーバにおいて上記推定と同様に推定された波形歪情報を、当該他方側からの光信号の受信後に復号する復号部63とを備える。光送信装置は、推定部65で推定された波形歪情報と、他方側へ送信する主信号とを多重化する多重部42と、復号部63で復号された波形歪情報で示される波形歪を打ち消すように、多重化された主信号の予等化を行う予等化部44と、予等化された主信号及び前記推定された波形歪情報を含む多重化信号で偏波を変調して光信号に変換するE/O変換部とを備える。

【選択図】 図2

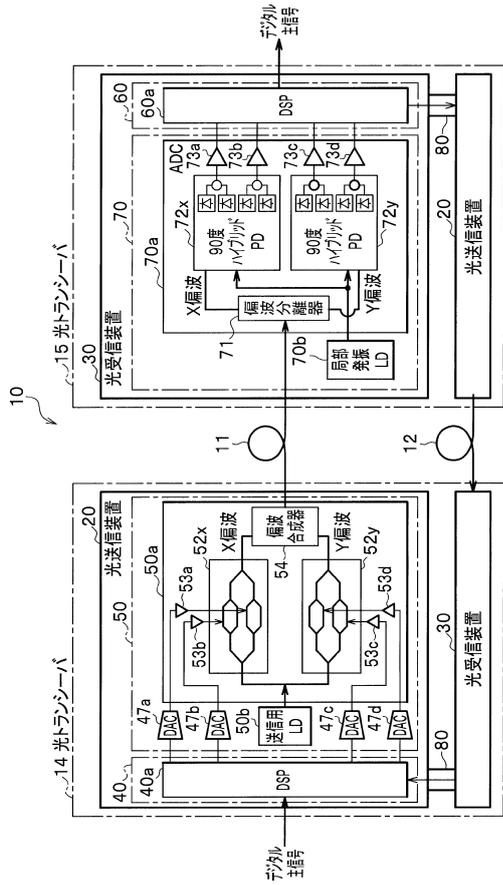
【図1】



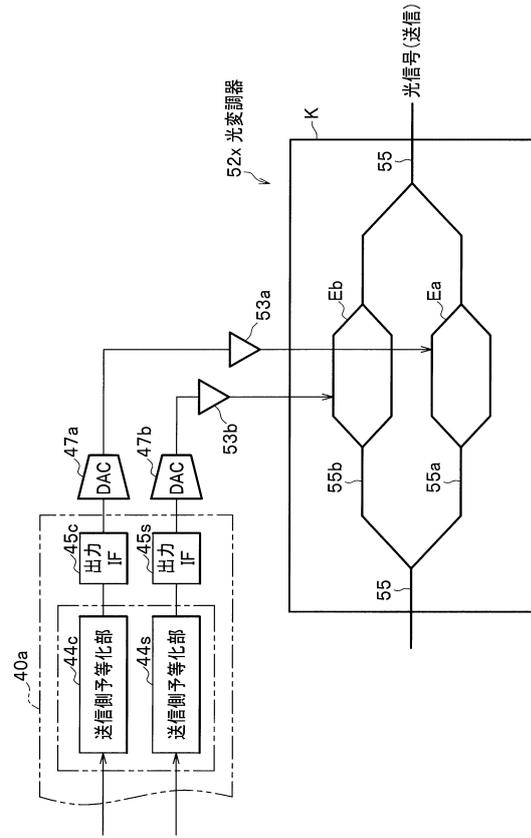
【図2】



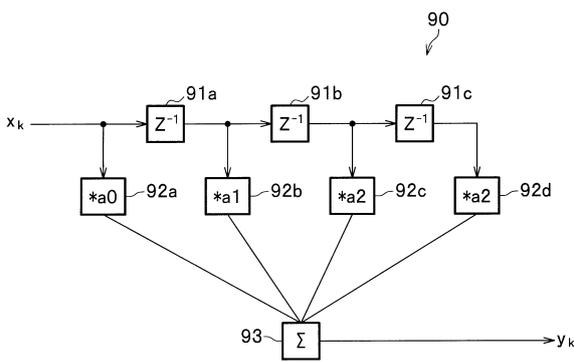
【図3】



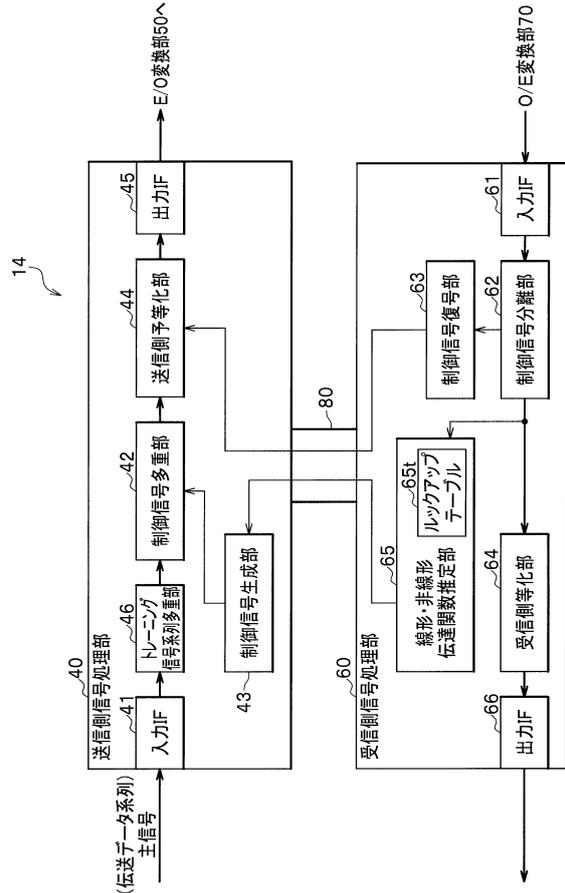
【図4】



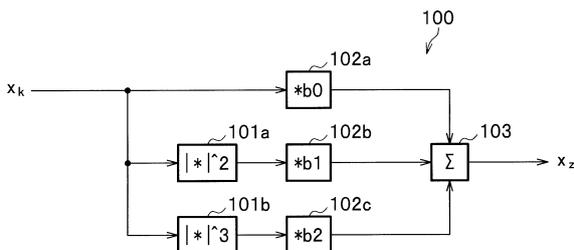
【図5】



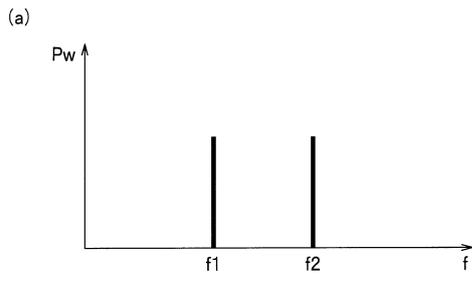
【図7】



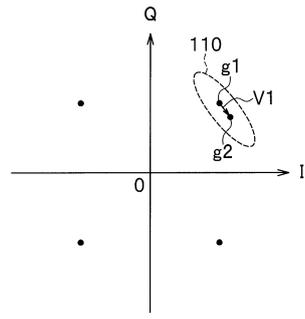
【図6】



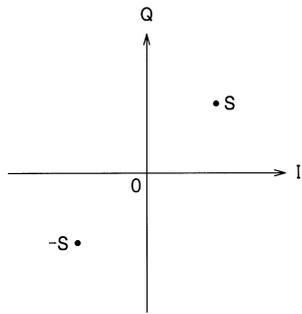
【 8 】



【 9 】



(b)



フロントページの続き

- (72)発明者 岡本 聖司
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 吉田 光輝
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 角田 慎治

- (56)参考文献 特開2009-188788(JP,A)
特開2012-222733(JP,A)
国際公開第2010/137113(WO,A1)
特開2002-057624(JP,A)
国際公開第2011/007803(WO,A1)
特開2014-042229(JP,A)
国際公開第2012/006777(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04B 10/00 - 10/90
H04J 14/00 - 14/08