

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-20319

(P2005-20319A)

(43) 公開日 平成17年1月20日(2005.1.20)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
HO4B 10/02	HO4B 9/00	5K022
HO4B 10/04	HO4J 1/00	5K028
HO4B 10/06	HO4J 3/00	5K102
HO4B 10/142	HO4B 9/00	
HO4B 10/152	HO4B 9/00	

審査請求 未請求 請求項の数 17 O L (全 22 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2003-181964 (P2003-181964)	(71) 出願人	503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(22) 出願日	平成15年6月26日 (2003.6.26)	(74) 代理人	100107010 弁理士 橋爪 健
		(72) 発明者	廣岡 俊彦 宮城県仙台市若林区連坊小路2-3-501
		(72) 発明者	中沢 正隆 宮城県仙台市青葉区国見ヶ丘3-2-13
		Fターム(参考)	5K022 AA16 AA26 FF01 5K028 AA14 BB08 KK03 KK05 KK33 5K102 AA01 AA49 AA61 AA63 AD12 AH31 KA02 KA03 KA05 KA42 PC12 PH01 PH41 PH50 RB00 RB01 RB05 RD23

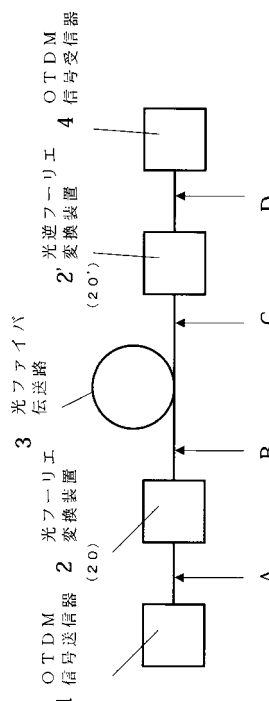
(54) 【発明の名称】 OTDM伝送方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 実質的に分散に依存しないOTDM無歪み伝送を実現するOTDM伝送方法及び装置を提供する。

【解決手段】 OTDM信号送信器1からの時分割多重されたOTDM信号は、光フーリエ変換装置2中へ入射する。ここで光パルスがチャープのないフーリエ変換限界パルスであれば光フーリエ変換を最も正確に実行できる。光フーリエ変換装置2は、パルスの時間波形を周波数軸上の信号へ変換し、一方、光逆フーリエ変換装置2'は、周波数軸上のスペクトル形状を時間波形(パルス)に変換するものである。光ファイバ伝送路3は、任意の分散および偏波モード分散を有する伝送線路である。これらの分散量は時間的な変動を伴ってもよい。OTDM信号受信器4は、伝送信号を光領域で低速光信号に多重分離した後、チャンネルごとに光パルスを受光し、これを電気信号に変換する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

時間軸上の光パルス波形をそのパルスのもつ周波数スペクトルの形状に変換するための光フーリエ変換装置を用いて、光時分割多重 (OTDM) 信号パルス列を波長分割多重 (WDM) 信号スペクトル列に変換し、
変換された光パルス列を光ファイバ伝送路に入射し、
光ファイバ伝送路に入射され光ファイバ伝送路を伝搬した後の光パルス列を受信し、周波数スペクトル形状をそのパルスのもつ時間軸上の光パルス波形に変換するための光逆フーリエ変換装置を用いて、光ファイバ伝送路を伝送後の WDM 信号スペクトル列を OTDM 信号パルス列に変換することにより、伝送前の OTDM 信号パルス列の時間波形を再生し
、
伝送された光パルスが光ファイバ伝送路中でいかなる線形時間歪みを受けても周波数スペクトルの形状が保存されることから、無歪み伝送を実現するための OTDM 伝送方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
前記光フーリエ変換装置は、OTDM 信号パルス列の伝送速度の $1/N$ 倍 (ただし、 N は任意の整数) の繰り返し周波数によって駆動する位相変調器と、群速度分散を与えるための分散要素とを備え、
 N チャンネルの OTDM 信号パルス列を N チャンネルの WDM 信号スペクトル列に変換することを特徴とする OTDM 伝送方法。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載の OTDM 伝送方法において、
OTDM 信号パルス列への多重化前の光パルス列の繰り返し周波数 R に対して、 n 倍の多重化により繰り返し周波数 nR の OTDM 信号パルス列を用いる場合、光フーリエ変換のための駆動周波数として多重化前の光パルス列の繰り返し周波数 R を用いることを特徴とする OTDM 伝送方法。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
光フーリエ変換の有効時間幅を入力光パルス列の時間幅に比べて十分大きくすることによって、伝送光信号の分散及び / 又は偏波モード分散に対する許容度を大きくすることを特徴とする OTDM 伝送方法。

【請求項 5】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
受信側における光逆フーリエ変換装置の分散要素および位相変調器の符号は、送信側の光フーリエ変換装置のそれらと完全に反転したものをを用いることを特徴とする OTDM 伝送方法。

【請求項 6】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
前記光逆フーリエ変換装置は、光パルス列に同期して各光パルスに位相変調を印加するための位相変調器と、群速度分散を与えるための分散要素とを備え、
受信した WDM 信号パルス列のチャンネル間隔に基づいてクロック信号を抽出し、得られたクロック信号により位相変調器を駆動する OTDM 伝送方法。

【請求項 7】

請求項 7 に記載の OTDM 伝送方法において、
前記光逆フーリエ変換装置は、隣接する周波数チャンネルの周波数差に相当するビート信号に基づき、クロック信号を再生し、クロック信号の周波数の $1/N$ の繰り返し周波数で前記位相変調器を駆動する OTDM 伝送方法。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
OTDM 信号パルス列としてフーリエ変換限界のパルスを用いることを特徴とする OTDM

10

20

30

40

50

M 伝送方法。

【請求項 9】

請求項 1 に記載の OTDM 伝送方法において、
前記光フーリエ変換装置は、位相変調器と分散要素とを備え、
前記位相変調器の位相変調のチャープ率 K と分散要素の群速度分散 D とが $K = 1 / D$ の関係を満たすことを特徴とする OTDM 伝送方法。

【請求項 10】

光時分割多重化された光パルスを送信する光時分割多重 (OTDM) 信号送信器と、
前記 OTDM 信号送信器から出力された OTDM 信号パルス列に対して、時間軸上の光パルス波形をそのパルスのもつ周波数スペクトルの形状に変換するための光フーリエ変換装置と、
前記光フーリエ変換装置から光ファイバ伝送路に入射され光ファイバ伝送路を伝搬した後の光パルス列に対して、光パルスのもつ周波数スペクトルの形状を時間軸上の光パルス波形に変換するための光逆フーリエ変換装置と、
前記光逆フーリエ変換装置から出力された光パルス列を低速光信号に多重分離しチャンネルごとに受光する OTDM 信号受信器と
を備え、
前記光フーリエ変換装置を用いて、OTDM 信号パルス列を WDM 信号スペクトル列に変換し、
変換された光パルス列を光ファイバ伝送路に入射し、
光ファイバ伝送路に入射され光ファイバ伝送路を伝送後の WDM 信号スペクトル列を前記光逆フーリエ変換装置を用いて OTDM 信号パルス列に変換することにより、伝送前の OTDM 信号パルス列の時間波形を再生し、
伝送された光パルスが光ファイバ伝送路中でいかなる線形時間歪みを受けても周波数スペクトルの形状が保存されることから、無歪み伝送を実現するための OTDM 伝送装置。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の OTDM 伝送装置において、
前記光フーリエ変換装置は、
前記分散要素が、OTDM 信号パルス列に群速度分散を与え、
前記位相変調器が、OTDM 信号パルス列の伝送速度の $1 / N$ 倍 (ただし、 N は任意の整数) の繰り返し周波数によって駆動し、前記分散要素から出力された光パルスに線形チャープを与え、
前記分散要素が、前記位相変調器から出力された光パルスを入力して再度群速度分散を与え、残留チャープを補償することを特徴とする OTDM 伝送装置。

【請求項 12】

請求項 10 に記載の OTDM 伝送装置において、
前記光フーリエ変換装置は、
前記位相変調器が、OTDM 信号パルス列の伝送速度の $1 / N$ 倍 (ただし、 N は任意の整数) の繰り返し周波数によって駆動し、OTDM 信号パルス列に線形チャープを与え、
前記分散要素が、前記位相変調器から出力された光パルスに群速度分散を与え、
前記位相変調器が、前記分散要素から出力された光パルスを入力して再度線形チャープを与え、残留チャープを補償することを特徴とする OTDM 伝送装置。

【請求項 13】

請求項 10 に記載の OTDM 伝送装置において、
前記光逆フーリエ変換装置は、
前記分散要素が、受信した光パルス列に群速度分散を与え、
前記位相変調器が、受信した光パルス列から再生されたクロック周波数の $1 / N$ (ただし、 N は任意の整数) で駆動され、前記分散要素から出力された光パルスに線形チャープを与え、
前記分散要素が、前記位相変調器から出力された光パルスを入力して再度群速度分散を与

え、残留チャープを補償することを特徴とするOTDM伝送装置。

【請求項14】

請求項10に記載のOTDM伝送装置において、

前記光逆フーリエ変換装置は、

前記位相変調器が、受信した光パルス列から再生されたクロック周波数 $1/N$ （ただし、 N は任意の整数）で駆動され、受信した光パルスに線形チャープを与え、

前記分散要素が、前記位相変調器から出力された光パルスに群速度分散を与え、

前記位相変調器が、前記分散要素から出力された光パルスを入力して再度線形チャープを与え、残留チャープを補償することを特徴とするOTDM伝送装置。

【請求項15】

請求項10に記載のOTDM伝送装置において、

前記OTDM信号送信器は

繰り返し周波数 R を発生する信号源と、

前記信号源の出力で駆動され、繰り返し周波数 R の光パルスを送信データに従い伝送速度 R の光パルス信号列に変調する光変調器と、

前記光変調器からの伝送速度 R の光パルス列を伝送速度 nR に多重化する多重化部と

を備え、前記光フーリエ変換装置の位相変調器の駆動周波数として前記信号源からの繰り返し周波数 R を用いるOTDM伝送装置。

【請求項16】

請求項10に記載のOTDM伝送装置において、

前記光フーリエ変換装置は、OTDM信号パルス列の伝送速度の $1/N$ 倍の繰り返し周波数を得るための、OTDM信号パルス列のクロック信号周波数を $1/N$ 倍に分周する回路をさらに備えたOTDM伝送装置。

【請求項17】

請求項10に記載のOTDM伝送装置において、

受信側における光逆フーリエ変換装置の分散要素および位相変調器の符号は、送信側の光フーリエ変換装置のそれらと完全に反転したものをを用いることを特徴とするOTDM伝送装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光時分割多重（OTDM、optical time division multiplexing）伝送方法及び装置に係り、特に、OTDM伝送において、伝送速度を高速化したときに問題となり得る光ファイバ伝送路の分散および偏波モード分散による信号の時間波形歪みを完全に（又はほとんど完全に）除去することを可能にする新たなOTDM伝送方法及び装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

光ファイバ通信において、1本の伝送ファイバに収容する信号チャンネル数を増やし回線の有効利用を図る多重化技術として、時分割多重（TDM）と波長分割多重（WDM）とが用いられている。電気の処理速度を超えた光伝送を実現するために、光パルスを各チャンネルに分けてその多重化される前のパルス列の基本繰り返し周波数においてあらかじめデータ変調を行ない、再び各チャンネルを光領域で時間多重する方法は、特に光時分割多重（OTDM）と呼ばれている。

【0003】

伝送速度が、例えば、40 Gbit/s以上の超高速OTDM伝送においては、従来の伝送方式に比べてパルス間隔が大幅に狭くなるため、信号光としてパルス幅が数ピコ秒からサブピコ秒の超短パルスを用いる必要がある。このような超短パルスを用いたOTDM伝送の実現にあたっては、波長分散や偏波分散をはじめとする光ファイバの線形効果による信号波形歪みの低減が重要な課題となる。

10

20

30

40

50

【0004】

超高速OTDM伝送としては、これまでに160 Gbit/s - 480 km、640 Gbit/s - 100 km、1.28 Tbit/s - 70 kmといった実験結果が報告されている（非特許文献1～3参照）。これらの実験では、分散補償ファイバや分散スロープ補償ファイバを用い伝送ファイバ全体の分散値および分散スロープを極めて正確に制御することによって伝送信号の時間波形歪みを抑えている。

【0005】

また、本発明者は、任意の分散ならびに偏波モード分散、タイミングジッタを有する光ファイバに伝送される信号の波形歪みをフーリエ変換により同時にかつ完全に補償する新たな光伝送方法および光伝送装置（特許文献1）、及び、超高速光通信ならびに光計測などに用いられる超短パルス技術において、パルス光源から出力された光パルスの時間幅を任意の比率で圧縮するとともに、さらには任意のパルス波形を得ることができる光パルス圧縮器および光関数発生器（特許文献2）について出願している。

【0006】

【非特許文献1】

J. L. Auge, M. Cavallari, M. Jones, P. Kean, D. Watley, and A. Hadjifotiou, "Single channel 160 Gb/s OTDM propagation over 480 km of standard fiber using a 40 GHz semiconductor mode-locked laser pulse source," Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2002, Paper TuA3.

【非特許文献2】

山本貴司、吉田英二、田村公一、中沢正隆、「フェムト秒パルスを用いた640 Gbit/s OTDM信号の100 km伝送」、信学論(C)、Vol. J83-B, pp. 625-633, 2000.

【非特許文献3】

山本貴司、田村公一、中沢正隆、「位相変調器による3次、4次分散同時補償を用いた1.28 Tbit/s - 70 kmフェムト秒パルスOTDM伝送」、信学論(B)、Vol. J84-B, pp. 1587-1597, 2001.

【特許文献1】

特願2003-23973

【特許文献2】

特願2003-109708

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

しかしこのような超高速OTDM伝送においては超短パルスが用いられるため、伝送ファイバの分散に対する伝送システムの許容度がもともと小さく、分散値のわずかな変動によってパルスの伝送特性に大きな影響が出てくる。さらに超短パルス伝送においては、振動や温度変化などの外乱によって誘起される伝送信号の偏波状態のランダムな変化から生じるパルス広がり（偏波モード分散）の影響を考慮に入れなければならない。したがって分散値の変動や偏波モード分散に対するトレランスを十分確保するためには、分散の適応等化技術や偏波モード分散補償技術が必要とされている。このような分散補償技術は未だ実用化されるまでに至っていない。

【0008】

そこで本発明では、上述の課題を解決するために、光ファイバ中の線形効果によって時間波形歪みが発生してもスペクトル形状は完全に保存されるという性質、ならびに光フーリエ変換によってOTDM信号とWDM信号を相互に一括変換できるという性質を、OTDM信号伝送技術に積極的に応用する。すなわち、光ファイバ伝送路の送信側でOTDM信号のNビットを一括して光フーリエ変換することによってN個のWDM信号スペクトル列

10

20

30

40

50

に変換しておき、受信側で伝送信号のスペクトル形状を光逆フーリエ変換によって時間波形に変換することで線形歪みのないもとの信号波形を完全に再生することができる。

本発明は、以上の点に鑑み、実質的に分散に依存しないOTDM無歪み伝送を実現するOTDM伝送方法及び装置を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】

本発明の第1の解決手段によると

時間軸上の光パルス波形をそのパルスのもつ周波数スペクトル波形又は包絡線に変換するための光フーリエ変換装置を用いて、光時分割多重(OTDM)信号パルス列を波長分割多重(WDM)信号スペクトル列に変換し、

10

変換された光パルス列を光ファイバ中に伝搬し、

光ファイバ中に伝搬された光パルス列を受信し、周波数スペクトル波形又は包絡線をそのパルスのもつ時間軸上の光パルス波形に変換するための光逆フーリエ変換装置を用いて、光ファイバを伝送後のWDM信号スペクトル列をOTDM信号パルス列に変換することにより、伝送前のOTDM信号パルス列の時間波形を再生し、

伝送された光パルスが光ファイバ中でいかなる線形時間歪みを受けても周波数スペクトルの形状が保存されることから、無歪み伝送を実現するためのOTDM伝送方法が提供される。

【0010】

本発明の第2の解決手段によると、

20

送信光パルスを多重化する光時分割多重(OTDM)信号送信器と、

前記OTDM信号送信器から出力されたOTDM信号パルス列に対して、時間軸上の光パルス波形をそのパルスのもつ周波数スペクトルの形状に変換するための光フーリエ変換装置と

光ファイバ伝送路を伝搬した光パルス列に対して、光パルスのもつ周波数スペクトルの形状を時間軸上の光パルス波形に変換するための光逆フーリエ変換装置と、

前記光逆フーリエ変換装置から出力された光パルス列を低速光信号に多重分離しチャンネルごとに受光するOTDM信号受信器と

を備え、

前記光フーリエ変換装置を用いて、OTDM信号パルス列を波長分割多重(WDM)信号スペクトル列に変換し、

30

変換された光パルス列を光ファイバ中に伝搬し、

光ファイバ伝送路に入射され光ファイバ伝送路を伝送後のWDM信号スペクトル列を前記光逆フーリエ変換装置を用いてOTDM信号パルス列に変換することにより、伝送前のOTDM信号パルス列の時間波形を再生し、

伝送された光パルスが光ファイバ伝送路中でいかなる線形時間歪みを受けても周波数スペクトルの形状が保存されることから、無歪み伝送を実現するためのOTDM伝送装置が提供される。

【0011】

【発明の実施の形態】

40

以下本発明の実施の形態を図面を用いて詳細に説明する。

【0012】

1. OTDM伝送システム

図1は、本実施の形態のOTDM伝送システムの構成図である。OTDM伝送システムは、OTDM信号送信器1、光フーリエ変換装置2(20)、光逆フーリエ変換装置2'(20')、光ファイバ伝送路3、OTDM信号受信器4を備える。

まず、OTDM信号送信器1からの時分割多重されたOTDM信号は、光フーリエ変換装置2中へ入射する。ここで光パルスがチャープのないフーリエ変換限界パルスであれば後述する光フーリエ変換を最も正確に実行できる。ここで、フーリエ変換限界パルスとは、トランスフォームリミットなパルスとも呼ばれ、時間波形に対して一切過不足のないスペ

50

クトル幅を有するパルスであり、例えばガウス型パルスの場合には、時間パルス幅とそのスペクトル幅の積は 0.441 を満たしている。光フーリエ変換装置 2 は、パルスの時間波形を周波数軸上の信号へ変換し、一方、光逆フーリエ変換装置 2' は、周波数軸上のスペクトル形状を時間波形（パルス）に変換するものである。光ファイバ伝送路 3 は、任意の分散および偏波モード分散を有する伝送線路である。これらの分散量は時間的な変動を伴ってもよい。OTDM 信号受信器 4 は、伝送信号を光領域で低速光信号に多重分離した後、チャンネルごとに光パルスを受光し、これを電気信号に変換する。OTDM 信号受信器 4 において多重分離に用いるクロックは、例えば、光逆フーリエ変換装置 2' (20') が伝送信号から抽出したものを利用したり、独立にクロック信号源を設けること等、適宜の手段を用いることができる。

10

【0013】

なお、以下に光フーリエ変換装置と光逆フーリエ変換装置の第 1 及び第 2 の実施の形態を説明するが、両装置を第 1 の実施の形態又は第 2 の実施の形態を用いてもよいし、一方に第 1 の実施の形態、他方に第 2 の実施の形態を用いるようにしてもよい。

【0014】

2. OTDM 伝送装置の第 1 の実施の形態

ここで、図 2 に、OTDM 信号送信器 1 および光フーリエ変換装置 2 の第 1 実施の形態の構成図を示す。

図 2 の OTDM 信号送信器 1 は、光パルス光源 11、クロック信号源 12、光変調器 13、OTDM 多重化装置 14、データ入力端子 15 を備える。光パルス光源 11 は、クロック信号源 12 から供給される周波数 R [Hz] で動作する。光変調器 13 は、クロック信号源 12 から供給されるクロックで駆動され、基本繰り返し周波数 R [Hz] の光パルス列をデータ入力端子 15 から入力される送信データに従い伝送速度 R [bit/s] の光パルス信号列にデータ変調する。OTDM 多重化装置 14 は、クロック信号源 12 から供給されるクロックで駆動され、基本繰り返し周波数 R で n チャンネルの光パルス信号列を時分割多重化し伝送速度を n 倍にし、OTDM 信号パルス列の繰り返し周波数（伝送速度 nR [bit/s]）で出力する。なお同図で、実線および破線はそれぞれ光パルスおよび電気信号の経路を表している。

20

【0015】

図 2 の光フーリエ変換装置 2 は、入力端子 21、光サーキュレータ 23 および 23'、電気増幅器 25、分散要素 26、位相変調器 27、出力端子 28、通倍器もしくは分周器 29 を備える。

30

位相変調器 27 としては、例えば、 LiNbO_3 などの電気光学効果を用いた位相変調器が好適に用いられる。位相変調器 27 は、あるいは EA (Electro-Absorption) や SOA (Semiconductor Optical Amplifier) などにおける位相変調効果を用いてもよい。位相変調器 27 には一般に偏波依存性のあるものが多いが、無偏波形の光デバイスあるいは偏波ダイバーシティーによる方法を採用して無偏波化を図ってもよい。なお、位相シフト及び光遅延ファイバを設けて、その際位相変調が光パルスに最適に同期して印加されるように機能するようにしてもよい。もし変調のタイミングが温度などによりずれる場合には、位相シフトが自動的に位相シフト量を調整し、最適な変調を印加する技術を用いることができる。また、電気増幅器を設けて、位相シフトの出力により位相変調器 27 を駆動するための駆動信号を出力するようにしてもよい。分散要素 26 としては、例えば、 $1.3 \mu\text{m}$ の波長帯域付近に零分散領域が存在する群速度分散特性を有するような単一モード光ファイバあるいは回折格子対、ファイバブラッググレーティング等を用いることができる。

40

【0016】

入力端子 21 には光サーキュレータ 23 のポート 23a が接続される。光サーキュレータ 23 のポート 23a には、ポート 23b、分散要素 26 および光サーキュレータ 23' のポート 23'b を介してポート 23'a が接続される。光サーキュレータ 23' のポート 23'a とポート 23'c とは位相変調器 27 を介してループ状に接続される。光サーキ

50

ューレータ 23 のポート 23 b はポート 23 c を介して出力端子 28 に接続される。位相変調器 27 は、OTDM 信号パルス列に同期した位相変調をパルスに印加するために、OTDM 信号送信器 1 中のクロック信号源 12 から供給されるクロックを駆動周波数として用いる。すなわちクロック信号源 12 を電気増幅器 25 を介して位相変調器 27 の駆動回路に接続する（特許文献 1 及び 2 参照）。後述するように、本実施の形態では位相変調器 27 の駆動周波数を、一般に OTDM 信号パルス列の繰り返し周波数の $1/N$ 倍（ N ：整数）に選ぶ。 $N = n$ （時間多重数）でもよい。このためには、必要に応じて、適切な逡倍器もしくは分周器 29 を電気増幅器 25 と位相変調器 27 との間に挿入したり省略したりすればよい。

【0017】

図 4 に、光逆フーリエ変換を実行する光逆フーリエ変換装置 2' の第 1 の実施の形態の構成図を示す。図 4 は、入力端子 21、光カップラ 22、光サーキュレータ 23 および 23'、クロック信号再生器 24、電気増幅器 25、分散要素 26、位相変調器 27、出力端子 28、逡倍器もしくは分周器 29 を備える。図 2 と同符号の構成要素はそれぞれ、同様の構成・機能を有する。これは図 2 の光フーリエ変換装置 2 において、入力端子 21 に光カップラ 22 を接続し、一方の出力を光サーキュレータ 23 のポート 23 a に、もう一方の出力をクロック信号再生回路 24 および電気増幅器 25 を介して位相変調器 27 の駆動回路に接続したものである。なお同図で、実線および破線はそれぞれ光パルスおよび電気信号の経路を表している。

【0018】

送信側で用いた光フーリエ変換に対応する光逆フーリエ変換は、光逆フーリエ変換装置 2' の分散要素 D' の符号が、光フーリエ変換装置 2 に用いた分散要素 D と逆符号となるように（ $D' = -D$ に）分散量を選ぶことで実現できる。このとき光逆フーリエ変換装置 2' における位相変調器のチャープ K' の符号も、光フーリエ変換装置 2 に用いた位相変調器のチャープ K と逆符号となるように（すなわち $K' = -K$ に）選ぶ。位相変調器のチャープは位相変調器に印加する電圧の位相を反転することによって逆符号にすることができる。

【0019】

また、光逆フーリエ変換装置 2' の位相変調器 27 において、信号パルス列に同期した位相変調をパルスに印加するために、光カップラ 22、クロック信号再生回路 24、及び電気増幅器 25 により、この信号パルス列からクロック信号を抽出し、得られたクロック周波数で位相変調器 27 を駆動する必要がある。もとの OTDM 信号パルス列は送信端で WDM 信号に変換されているので、WDM 信号からは直接クロック信号を抽出することはできない。しかし WDM 信号のチャンネル間隔 Δf ともとの OTDM 信号のビット間隔 T は $\Delta f = K T$ の関係にあるので、 Δf からクロック信号を再生することができる。

【0020】

図 5 に、クロック信号再生回路 24 の構成図を示す。同図で、実線および破線はそれぞれ光パルスおよび電気信号の経路を表している。クロック信号再生回路 24 は、波長フィルタ 31、光検出器 32、および分周器 33 を備える。まず 2 つの隣接する周波数チャンネルを波長フィルタ 31 によって切り出し、2 つのチャンネルの周波数差 Δf に相当するビート信号を光検出器 32 に入射し電気信号に変換する。これを $1/K$ 倍の分周器 23 に通すことによって、ビット間隔 T に相当するクロック信号を再生することができる。

【0021】

次に、この OTDM 伝送方式の動作の概要を図 1、図 2 および図 4 を用いて説明する。まず、光フーリエ変換装置 2 の動作について説明する。

OTDM 信号送信器 1 によって生成された OTDM 信号を $u(t)$ 、その周波数スペクトルを $U(f)$ とする。時間信号 $u(t)$ とその周波数スペクトル $U(f)$ は

【0022】

【数 1】

10

20

30

40

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(i\omega t) dt \quad (1)$$

で関係づけられている。

【0023】

まず、このようなOTDM信号を図2の光フーリエ変換装置2の入力端子21に入射する。光サーキュレータ23のポート23a、23bを介して分散要素26を通過した後の信号の時間波形 $u_-(t)$ は

10

【数2】

$$u_-(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \quad (2)$$

となる。ここでDは分散要素26の分散量であり、分散要素26が、二次分散 k'' 、長さLの光ファイバで構成されているとすると $D = k'' L$ である。すなわちこの作用により、次の光フーリエ変換によって生じる位相の時間的变化(チャープ)をあらかじめ補償しておく。

20

【0024】

次に光サーキュレータ23'のポート23'b、23'aを介して位相変調器27を通過した後の信号の時間波形 $u_+(t)$ は

【数3】

$$\begin{aligned} u_+(t) &= u_-(t) \exp(iKt^2/2) \\ &= \frac{\exp(iKt^2/2)}{\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。ここでKは位相変調器27のチャープ率である。さらに光サーキュレータ23'のポート23'c、23'bを介して再び分散要素26を通過し光サーキュレータ23のポート23b、23cを介して出力端子28で得られる信号の時間波形 $v(t)$ は次式で与えられる。

30

【0025】

【数4】

$$\begin{aligned} v(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} u_+(t') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \\ &= \frac{1}{2\pi i D} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} u(t'') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t'-t'')^2\right) dt'' \right] \exp\left(\frac{iKt'^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \end{aligned} \quad (4)$$

40

ここで位相変調器27のチャープ率を $K = 1/D$ に選ぶと次式を得る。

【0026】

【数5】

$$\begin{aligned}
 v(t) &= \frac{1}{2\pi i D} \int_{-\infty}^{\infty} u(t'') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t''^2 + t^2)\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{i}{2D}[t'^2 - 2(t''+t)t']\right) dt' dt'' \\
 &= \frac{1}{i\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t'') \exp\left(\frac{it''}{D}\right) dt'' \\
 &= \frac{1}{i\sqrt{2\pi i D}} U(t/D)
 \end{aligned}$$

(5)

10

したがって、光フーリエ変換装置 2 を通った後の出力端子 28 における信号の時間波形 $v(t)$ は、式 (5) からわかるように入力端子 21 におけるもとの OTDM 信号のスペクトル形状 $U(t/D)$ に対応している。このとき出力端子 28 における信号の周波数スペクトル $V(\omega)$ は式 (5) より

【0027】

【数6】

$$\begin{aligned}
 V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \exp(i\omega t) dt \\
 &= \frac{1}{i\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(t'') \exp\left(\frac{it''}{D}\right) dt'' \exp(i\omega t) dt \\
 &= \frac{1}{i} \sqrt{\frac{2\pi}{iD}} u(-D\omega)
 \end{aligned}$$

20

(6)

と表される。ここで

【0028】

【数7】

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\Omega t) dt = \delta(\Omega)$$

を用いた。ただし、 $\delta(\Omega)$ はデルタ関数で、 $\Omega = 0$ のときに 1、それ以外のときに 0 の値をとる関数である。

【0029】

したがって、出力端子 28 における信号の周波数スペクトル $V(\omega)$ は、入力端子 21 におけるもとの OTDM 信号の時間波形 $u(t/D)$ に対応している。このようにして光フーリエ変換された信号 $v(t)$ を光ファイバ伝送路 3 に入射し伝搬させる。なおここで光ファイバ伝送路 3 への入力信号 $v(t) = U(t/D)$ の時間幅が分散量 D の大きさを変えることによって制御できることに注意する。例えば D を 2 倍にすることで $v(t)$ の時間幅を 2 倍にすることができる。

【0030】

ここで、図 11 に、光フーリエ変換装置の入出力における時間波形とその周波数スペクトルの説明図を示す。本発明及び本実施の形態の重要なポイントのひとつは、位相変調器 27 の駆動周波数を OTDM 信号パルス列の繰り返し周波数の $1/N$ 倍 (N : 整数) に選び

50

、光フーリエ変換装置 2 によって N 個のパルス時間波形を一括してフーリエ変換すると、出力端子 28 では中心周波数の異なる N 個のスペクトルが得られる点である。すなわち、もとの OTDM 信号 $u(t)$ のパルス間隔を T (伝送速度 $B = 1/T$) とすると、N 個のパルス列の光フーリエ変換に必要な位相変調器 27 の駆動周波数は $f_m = 1/(NT)$ で与えられ、光フーリエ変換された信号のスペクトル $V(\omega)$ は、 $V(\omega) = U(\omega - D)$ (式 (6)) より周波数間隔 $D = T/D$ の N 個のスペクトル列となる。このようにして光フーリエ変換によって N 個の OTDM 信号系列は N チャンネルの WDM スペクトル系列に変換される。このとき出力端子 28 における時間信号波形 $v(t)$ は、式 (5) よりもとの OTDM 信号のスペクトル形状 $U(\omega/D)$ で与えられる。N 個のパルス列 (パルス間隔 T) の周波数スペクトルは $f_0 = 1/T$ とその整数倍の周波数にピークをもつ形状であるので、 $v(t)$ は $t_0 = D(2f_0) = 2D/T$ とその整数倍の時間位置にピークをもつ波形で与えられる。このように OTDM 信号パルス列の繰り返し周波数の $1/N$ 倍の低速な位相変調器によって光フーリエ変換を実現できるということは、本伝送方式の実現を容易にするうえで極めて有用な特徴である。

【0031】

光ファイバ伝送路 3 中を伝搬する光パルスは、該光ファイバ伝送路の有する分散ならびに偏波モード分散によって複雑な線形波形歪みを受ける。特に超高速 OTDM 伝送においては超短パルスが光信号に用いられるため、分散や偏波モード分散といった線形効果による信号波形の歪みが伝送性能を決定する。しかし光ファイバの線形効果は周波数軸上では伝送信号のスペクトルの位相変化を生じるだけであり、スペクトルの包絡線形状 (スペクトル波形) は一切変形されない。したがって該光ファイバ伝送路に入射する前に OTDM 信号の時間波形を光フーリエ変換装置 2 によって、この光フーリエ変換装置 2 の出力信号の周波数スペクトル形状に変換しておき、その出力信号を伝送信号として光ファイバ伝送路 3 中を伝搬させることで、光ファイバ伝送路 3 の任意の地点で周波数スペクトルから光逆フーリエ変換装置 2' による光逆フーリエ変換によってもとの信号時間波形を正確に再現することができる。OTDM 信号受信器 4 に含まれる光検出器ではパルスの包絡線のみを検出するので、線形効果による位相変化は一切問題とならない。

【0032】

つぎに、光逆フーリエ変換装置 2' の動作について説明する。

光ファイバ伝送路 3 から伝送された WDM 信号のスペクトルを $Q(\omega)$ 、光逆フーリエ変換装置 2' の出力の時間波形を $r(t)$ 、周波数スペクトルを $R(\omega)$ とする。 $Q(\omega)$ は光ファイバ伝送路 3 を伝送前の信号スペクトル $V(\omega)$ () と

【0033】

【数 8】

$$Q(\omega) = V(\omega) \exp[i\phi(\omega)]$$

で関係づけられる。ここで $\phi(\omega)$ は光ファイバ伝送路 3 の線形効果によって伝送信号のスペクトルに生じる位相変化である。

分散要素 $D' = -D$ 、チャープ率 $K' = -K$ として、式 (5) から、

【0034】

【数 9】

$$r(t) = \frac{1}{i\sqrt{-2\pi iD}} Q(-t/D) = \frac{1}{i\sqrt{-2\pi iD}} V(-t/D) \exp[i\phi(-t/D)]$$

と表される。さらに、式 (6) を代入して、

【0035】

10

20

30

40

50

【数 10】

$$w(t) = \frac{1}{i\sqrt{-2\pi iD}} \cdot \frac{1}{i\sqrt{iD}} u(-D \cdot (-t/D)) \exp[i\phi(-t/D)]$$

$$= -\frac{1}{D} u(t) \exp[i\phi(-t/D)]$$

を得る。したがって光逆フーリエ変換された信号の時間波形 $w(t)$ は、 $w(t) = u(t)$ となり、位相変化 $(-t/D)$ を除いて光ファイバ伝送路 3 による時間歪みを完全に除去することができる。 10

【0036】

図 6 に、光パルスの時間波形及び周波数スペクトルの説明図を示す。この図はこれまでに説明した OTDM 伝送方式の原理をまとめたものである。図中 (a)、(b)、(c)、(d) はそれぞれ図 1 中の点 A、B、C、D における信号の時間波形と周波数スペクトルに対応している。OTDM 信号送信器 1 によって発生した OTDM 信号パルス列 (図 6 (a)) は光フーリエ変換装置 2 によって WDM 信号 (図 6 (b)) に変換され、光ファイバ伝送路 3 に入射する。光ファイバ伝送路 3 で線形歪みを受けた伝送信号 (図 6 (c)) が受信側で光フーリエ変換装置 2' を通過すると、光ファイバ伝送路 3 中の伝搬で位相変化を除いてスペクトル形状が保存されている (図 6 (b) および (c)) ことから、もとの OTDM 信号パルス列 (包絡線) が完全に再現される (図 6 (d))。 20

【0037】

なお、N 個のパルス列の光フーリエ変換を行なっている場合、光ファイバ伝送路 3 中のパルス伝搬において時間波形の歪みあるいは広がり時間が時間ブロック $N \cdot t$ を超えると、隣接する時間ブロックの信号と重なってしまい逆フーリエ変換によってもとの信号を再現できない。このような問題を解決するにはブロック長 N を大きくするか、上で述べたように光フーリエ変換に用いる分散量 D を大きくすることで光フーリエ変換後の信号波形 $v(t)$ の時間幅を大きくし線形効果による波形歪みをできるだけ小さく抑える必要がある。光フーリエ変換後の全スペクトル帯域幅はブロック数を N とすると $\sim N \cdot t / 2 \cdot D$ で与えられるので、N の最大値は光増幅器の利得平坦帯域幅によって決まる。ここで、光増幅器は 30、光ファイバ伝送路 3 中のものを含め、本方式で用いられる光増幅器全てについてのものである。

【0038】

図 7 は、光フーリエ変換をより正確に実行するために OTDM 信号系列の各時間ブロックの両端に設ける空白ビット (ガード) の設定例を示す図である。以上の説明では、光フーリエ変換に用いる位相変調器の変調特性は、式 (3) のように放物型であると仮定した。しかし通常の正弦波変調特性を有する位相変調器を用いるときには、位相変調特性が放物型から外れる領域に位置するビットの光パルスに対して光フーリエ変換を正確に実行することができない可能性がある。その場合は、図 7 に示すように、各ブロックの両端に空白のビットを加え黒く示したガードを設けておくことにより、光フーリエ変換を正確に実行 40 することができる。

【0039】

3. OTDM 伝送装置の第 2 の実施の形態

図 2 中の光フーリエ変換装置 2 において、分散要素 26 と位相変調器 27 を入れ替えることによって同様の光フーリエ変換を実現することができる (特許文献 2 参照)。

図 3 に、OTDM 信号送信器 1 及び光フーリエ変換装置 20 の第 2 の実施の形態の構成図を示す。OTDM 信号送信器 1 は、前述の第 1 の実施の形態と同様である。

【0040】

光フーリエ変換装置 20 は、入力端子 21、光サーキュレータ 23 および 23'、電気増幅器 25、分散要素 26、位相変調器 27、出力端子 28、逓倍器もしくは分周器 29 及 50

び光遅延素子 30 を備える。この場合には、ポート 23 b から位相変調器 27 に入射するパルス列に対しては、クロック信号源 12 から電気増幅器 25 および逡倍器もしくは分周器 29 を介して供給されるクロック信号に従って位相変調器 27 を駆動し、OTDM 信号系列のパルスのピークが位相変調特性のタイミングに同期するよう位相変調を該パルスに印加する。それと同時に、ポート 23' b から位相変調器 27 に入射するパルス列に対してもパルスのピークが位相変調特性のタイミングに同期するよう、分散要素 26 の後に光遅延素子 30 を挿入し適切な時間遅延を与えておく。

【0041】

入力された光パルスは光サーキュレータ 23 のポート 23 a からポート 23 b を介して位相変調器 27 に入力され、光パルス列から再生されたクロック信号に従ったタイミングで駆動する位相変調器 27 によって光パルスに線形チャープが与えられる。すなわち該光パルスの各時間位置に異なる周波数シフトが割り当てられる。チャープを受けた該光パルスは光サーキュレータ 23 のポート 23' b および 23' a を介して分散要素 26 を通過する。このとき該光パルスの時間波形には上記周波数シフトに応じた時間遅延が与えられ、時間軸上で異なる周波数成分が分別される。第 1 の実施の形態と同様に、位相変調器 27 のチャープ率 K に対して分散要素 26 の分散量 D を $D = 1/K$ に選ぶことによって、時間波形 $u(t)$ のフーリエ変換像 $U(\)$ が時間軸上で生成される。

【0042】

図 12 は、光逆フーリエ変換装置の第 2 実施の形態の構成図である。この光逆フーリエ変換装置 20' は、図 1 中の光フーリエ変換装置 F において分散要素 26 と位相変調器 27 を入れ替え、さらに光サーキュレータ 23' のポート 23' a とポート 23' c を結ぶループにおいて分散要素 26 のあとに光遅延素子 30 を挿入したものである。位相変調器 27 には図 4 と同様、光カップラ 22 からクロック信号抽出回路 24 および電気増幅器 25 を介して再生されたクロック信号が駆動回路に供給されている。なお、図 4 と同符号の構成要素は、それぞれ同様の構成・機能を有する。

送信側で用いた光フーリエ変換に対応する光逆フーリエ変換は、光逆フーリエ変換装置 20' の分散要素 D' の符号を、光フーリエ変換装置 20 に用いた分散要素 D と逆符号となるように ($D' = -D$ に) 選ぶことで実現できる。このとき光逆フーリエ変換装置 20' における位相変調器のチャープ K' の符号も、光フーリエ変換装置 20 に用いた位相変調器のチャープ K と逆符号となるように (すなわち $K' = -K$ に) 選ぶ。

【0043】

つぎに、この OTDM 伝送方式の動作の概要を、図 1、図 3 及び図 12 を用いて説明する。

まず、光フーリエ変換装置 20 の動作について説明する。

OTDM 信号送信器 1 によって生成された OTDM 信号 $u(t)$ と出力パルス波形 $v(t)$ の関係は以下のようにして求められる。 $u(t)$ が位相変調器 27 によって位相変調を受けた後の時間信号 $u_-(t)$ は式 (2) と同様

【0044】

【数 11】

$$u_-(t) = u(t) \exp(iKt^2/2) \quad (25)$$

で与えられる。このパルスが位相変調器 27 の後に置かれた分散要素 26 を通過した後のパルス波形 $u_+(t)$ は $u_-(t)$ を用いて、

【0045】

【数 12】

$$u_+(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi iD}} \int_{-\infty}^{\infty} u_-(t') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \quad (26)$$

10

20

30

40

50

と表される。式(25)より式(26)は入力パルス波形 $u(t)$ を用いて

【0046】

【数13】

$$u_+(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \exp\left(\frac{i K t'^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \quad (27)$$

と表される。ここで分散要素26の分散量 D を $D = 1/K$ に選ぶと、式(27)は

【0047】

【数14】

$$\begin{aligned} u_+(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \exp\left(-\frac{i K t^2}{2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} u(t') \exp\left(\frac{i t}{D} t'\right) dt' \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} \exp\left(-\frac{i K t^2}{2}\right) U(t/D) \end{aligned} \quad (28)$$

と書くことができる。ただし $U(\quad)$ [$\quad = t/D$] は $u(t)$ のフーリエ変換(式(1))である。上式における残留チャープ $\exp(-i K t^2/2)$ は、位相変調器27によって上と同じ大きさの位相変調 $\exp(i K t^2/2)$ を再度印加することで取り除くことができる。パルス列は再び位相変調器27に入射するため予め光遅延素子30によって適当な時間遅延を与えられる。遅延量はパルスのピークが位相変調器27の位相変調特性のタイミングと同期するように設定する。このようにして残留チャープが完全に補償された光パルス

【0048】

【数15】

$$v(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi i D}} U(t/D) \quad (29)$$

は、光サーキュレータ23のポート23b、23cおよび光出力端子10を介して外部に出力される。

このとき出力端子28における信号の周波数スペクトル $V(\quad)$ は上式より、

【0049】

【数16】

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \exp(i\omega t) dt \\ &= \sqrt{\frac{2\pi}{i D}} u(-D\omega) \end{aligned}$$

となる。

【0050】

つぎに、光逆フーリエ変換装置20'の動作について説明する。

光ファイバ伝送路3から伝送されたWDM信号のスペクトルを $Q(\quad)$ 、光逆フーリエ変換装置20'の出力の時間波形を $r(t)$ 、周波数スペクトルを $R(\quad)$ とする。 $Q(\quad)$ は光ファイバ伝送路3を伝送前の信号スペクトル $V(\quad)$ と

【0051】

【数17】

$$Q(\omega) = V(\omega) \exp[i\phi(\omega)]$$

で関係づけられる。ここで () は光ファイバ伝送路 3 の線形効果によって伝送信号のスペクトルに生じる位相変化である。

分散要素 $D' = -D$ 、チャープ率 $K' = -K$ として、式 (5) から、

【0052】

【数18】

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{-2\pi iD}} Q(-t/D) = \frac{1}{\sqrt{-2\pi iD}} V(-t/D) \exp[i\phi(-t/D)]$$

10

と表される。さらに、式 (6) を代入して、

【0053】

【数19】

$$\begin{aligned} r(t) &= \frac{1}{\sqrt{-2\pi iD}} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{iD}} u(-D \cdot (-t/D)) \exp[i\phi(-t/D)] \\ &= \frac{1}{D} u(t) \exp[i\phi(-t/D)] \end{aligned}$$

20

を得る。したがって光逆フーリエ変換された信号の時間波形 $w(t)$ は、 $w(t) = u(t)$ となり、位相変化 $(-t/D)$ を除いて光ファイバ伝送路 3 による時間歪みを完全に除去することができる。

【0054】

4. 有効性

図 8 ~ 10 に、本発明の実施の形態に基づく OTDM 伝送方式の有効性を確認するために 30
行なった数値計算の結果の説明図を示す。

ここでは、一例として、光ファイバ伝送路 3 には二次分散 $-1.2 \text{ ps}^2 / \text{nm} / \text{km}$ ($D_2 = 1.53 \text{ ps}^2 / \text{km}$)、三次分散 $0.07 \text{ ps}^3 / \text{nm}^2 / \text{km}$ 、非線形係数 $n_2 = 2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$ 、実効コア断面積 $A_{\text{eff}} = 50 \text{ } \mu\text{m}^2$ 、損失 $0.2 \text{ dB} / \text{km}$ を有する光ファイバを用いている。また該伝送路において光増幅器を 50 km 間隔に挿入している。伝送前の入力信号はガウス型パルス $u(t) = A \exp(-t^2 / 2T_0^2)$ 、 $T_0 = T_{\text{FWHM}} / 1.665$ で構成される、伝送速度 $40 \text{ Gbit} / \text{s}$ の 128 ビット擬似ランダム系列の OTDM 信号である。各ビットの信号ピークパワーは 0.4 mW 、パルス幅は $T_{\text{FWHM}} = 12.5 \text{ ps}$ である。光フーリエ変換装置 2 および光逆フーリエ変換装置 2' における位相変調器 17 は理想的な二乗位相変調特性を有するとし、駆動周波数は OTDM のクロック周波数 40 GHz の $1/64$ 倍 (すなわち 625 MHz) としている。すなわち 64 ビットを一ブロックとして一括して光フーリエ変換している。また光フーリエ変換装置 2 における分散要素 17 の分散量は $D = 395 \text{ ps}^2$ としている。このときビット間隔 $t = 25 \text{ ps}$ の 64 ビットパルス列はチャンネル間隔 $f = 10 \text{ GHz}$ 、帯域幅 640 GHz (5.1 nm) のスペクトル列に変換されている。このように時間ブロック長 N を大きくとり変調幅を広げ、また光フーリエ変換に用いる分散量 D を大きくすることで、波形歪みをできるだけ小さく抑えることができる。なおこのとき光逆フーリエ変換装置 2' における分散要素の分散量は $D' = -D = -395 \text{ ps}^2$ である。さらに、各時間ブロックの両端にはガードとしてそれぞれ 4 ビット分の空白ビットを設けている。 40

50

【0055】

図8は、光フーリエ変換装置2の入出力におけるOTDM信号の時間波形とその周波数スペクトルを示している。図8(a)および(b)はそれぞれOTDM信号送信器1から発生しフーリエ変換装置2に入力されるOTDM信号の時間波形 $u(t)$ ならびに周波数スペクトル $U(\)$ を、図8(c)および(d)はそれぞれフーリエ変換装置2によって光フーリエ変換されたOTDM信号の時間波形 $v(t)$ ならびに周波数スペクトル $V(\)$ を示している。図8(a)および(c)において点線は位相変調器27の位相変調の周期を表している。

【0056】

例えば、図8(a)において $-1600 \sim 0$ psの領域にあるパルス列、ならびに $0 \sim 1600$ psの領域にあるパルス列がそれぞれ64ビットのブロックに対応している。これらの図から、OTDM信号が光フーリエ変換装置2によって64ビットを時間ブロック単位として64チャンネルのWDM信号に変換され、同時にもとのOTDM信号のスペクトルが光フーリエ変換後時間軸上に再生されていることがわかる。なお、図8(a)における各パルスの振幅のわずかな揺らぎは、デューティ比が50%と高いため隣接ビットのパルスの裾野がオーバーラップしていることによるものである。また、図8(c)の2つの時間波形は図8(a)における各ブロックの時間波形のスペクトル形状に対応しているので、図8(c)において見られる2つの波形の差異は、図8(a)における各ブロックのビットパターンの依存性を反映している。図8(d)における周波数スペクトル $V(\)$ のパターンは2つの振幅の集まりであるが、これらは同図(a)における2つのブロックの時間波形をそのまま重畳して得られたものである。この周波数スペクトルは実際には時間的に変動する周波数スペクトルとして観測される。

【0057】

図9(a)および(b)はそれぞれ250 kmの光ファイバ伝送路3を伝搬した後の伝送信号の時間波形ならびに周波数スペクトルを、図9(c)および(d)はそれぞれ光逆フーリエ変換された伝送信号の時間波形ならびに周波数スペクトルを示している。WDM信号に変換され異なったスペクトルを有する1つの時間波形がファイバ中を伝搬することによりパルス内群遅延が生じるために、時間軸上で分離される。これが図9(a)に見られる信号波形歪みとして現れる。伝送前の2つの時間波形(図8(c))は光ファイバ伝送路3の分散による波形歪みの結果250 km伝搬後互いに干渉し始めるのに対し、伝送前のスペクトル形状(図8(d))は250 km伝搬後も保存されている。その結果、光逆フーリエ変換装置2'によって伝送信号をOTDM信号に逆変換することで、入力におけるOTDM信号パルス列が時間軸上で正確に再生できていることがわかる。その様子を図9(c)に示す。なお図9(c)において、再生されたパルス列がもとの入力パルス列(図8(a))よりも大きな振幅揺らぎを有しているのは、例えば、光ファイバ伝送路3のもつ非線形性(四光波混合)によってWDMスペクトル形状が変化することに起因する。実際に、伝送前のWDMスペクトル(図8(d))と伝送後のWDMスペクトル(図9(b))を比較すると、例えば、光ファイバ伝送路3において発生するWDMチャンネル間の非線形クロストークにより、スペクトル形状がわずかに変化していることがわかる。

【0058】

図10は、図1中の光ファイバ伝送路3を伝搬する伝送信号のQ値を計算した結果ならびに該光ファイバ伝送路を500 km伝搬し光フーリエ変換装置2'を通過した後の信号波形のアイパターンを示す図である。図10(a)は光ファイバ伝送路3中を伝搬した伝送信号に受信端で1回だけ光逆フーリエ変換を施した後の信号波形に対するQ値を計算したものである。ただし、受信距離は50 kmごとに増やしている。Q値とは受信信号のアイパターンの信号対雑音(S/N)比を表し、伝送システムのビット誤り率と一対一の関係にあるためシステムの性能評価の指標として用いられる。一方同図(b)は該光ファイバ伝送路を500 km伝送後、1回だけ光逆フーリエ変換を施した信号の時間波形に対するアイパターンを示している。同図(a)で実線は該光ファイバ伝送路中に挿入された光増

幅器から発生する自然放出雑音を考慮し計算を行なった結果を、破線は自然放出雑音を加えずに計算を行なった結果をそれぞれ表している。前者で光増幅器の雑音指数は $N F = 5$ dB としている。両者を比較して、500 km までの距離では Q 値の劣化は光増幅器の自然放出雑音のみによるものであり、該伝送路の線形効果は Q 値の劣化要因とはなっていないことがわかる。これは本伝送方式によって実質的に分散フリーな無歪み伝送が実現できていることを明確に示している。なお図 9 (a) の結果では既に 250 km 伝搬後の時点で波形歪みが隣りの時間ブロックに及んでいたが、図 10 で 500 km 伝搬後も高い Q 値が維持されているのは、異なる WDM チャンルどうしの干渉が光逆フーリエ変換に実質的に影響を及ぼさないからである。550 km 以降伝送品質が急激に劣化するの、群速度が最も大きい両端の WDM チャンルが時間軸上でフーリエ変換の有効時間幅に相当する時間だけ移動し、その結果隣りのブロックの時間スロットに誤って光逆フーリエ変換されてしまうことによる。

10

【0059】

以上の結果から、本実施形態では分散補償ファイバによる伝送ファイバの線形効果の補償を介さずに 40 Gbit/s OTDM 信号パルス列を 500 km にわたって伝搬できている。光フーリエ変換を用いないときの伝送距離は 50 km に制限される (該伝送ファイバの分散距離すなわちパルス幅が 2 倍となる距離 $z_d = T_0^2 / \beta_2$ は 37 km である) 。本実施例では伝送距離は二次分散の累積による波形歪みで制限されていたので、受信端で分散補償ファイバにより伝送ファイバの累積二次分散を補償することで伝送距離を大幅に伸ばすことができる。ただしこの場合、増幅器雑音による S/N の劣化と非線形効果によるスペクトルの形状歪みによって伝送距離が制限される。

20

【0060】

【発明の効果】

以上詳細に説明したように、本発明によれば、光フーリエ変換によって OTDM 信号パルス列の時間波形を WDM 信号の周波数スペクトル形状に変換しておくことで、伝送ファイバの線形効果により伝送信号に波形歪みが生じても光逆フーリエ変換によって伝送信号の周波数スペクトルからもとの OTDM 信号を常に再生することができる。したがって本 OTDM 伝送方式を用いることで、光ファイバ伝送路の伝搬特性に依存せず信号の正確な伝送が可能となり、超高速 OTDM 伝送の実現にあたって大きな障害となっていた線形波形歪みによる信号劣化を完全に克服することができる。また、本発明の OTDM 伝送方式を用いることで、光伝送システムのさらなる高速化、長距離化、低価格化を同時に実現することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【図 1】 OTDM 伝送方式の実施の形態を示す模式図である。

【図 2】 図 1 中の OTDM 信号送信器 1 および光フーリエ変換装置 2 の構成の一例を示す模式図である。

【図 3】 図 1 中の OTDM 信号送信器 1 および光フーリエ変換装置 2 の構成の他の一例を示す模式図である。

【図 4】 図 1 中の光逆フーリエ変換装置 2 ' の第 1 の実施の形態の構成を示す模式図である。

40

【図 5】 図 4 中のクロック信号再生回路の構成を示す模式図である。

【図 6】 図 1 中の光伝送路の A ~ D の各部分における光パルスの時間波形および周波数スペクトルの概略を示す図である。

【図 7】 光フーリエ変換をより正確に実行するために OTDM 信号系列の各時間ブロックの両端に設ける空白ビット (ガード) の設定例を示す図である。

【図 8】 図 1 中の光フーリエ変換装置 2 の入出力における OTDM 信号の時間波形とその周波数スペクトルを示す図である。

【図 9】 図 1 中の光ファイバ伝送路 3 を 250 km 伝搬した後の伝送信号波形および光フーリエ変換装置 2 ' を通過後の信号波形を示す図である。

【図 10】 図 1 中の光ファイバ伝送路 3 を伝搬する伝送信号の Q 値を計算した結果ならび

50

に該光ファイバ伝送路を500km伝搬し光フーリエ変換装置2'を通過した後の信号波形のアイパターンを示す図である。

【図11】光フーリエ変換装置の入出力における時間波形とその周波数スペクトルの説明図である。

【図12】図1中の光逆フーリエ変換装置の第2の実施の形態の構成図である。

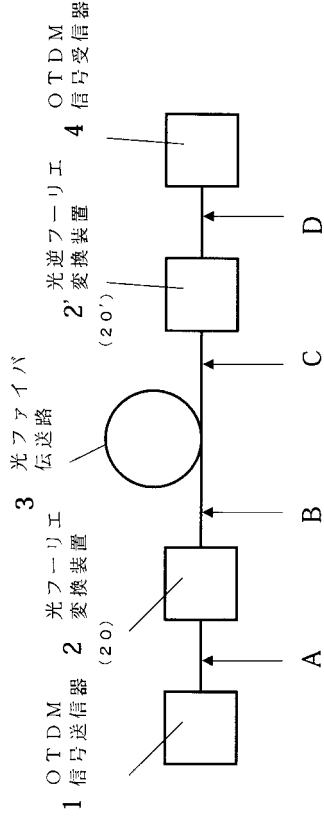
【符号の説明】

- 1 OTDM信号送信器
- 2、20 光フーリエ変換装置
- 2'、20' 光逆フーリエ変換装置
- 3 光ファイバ伝送路
- 4 OTDM信号受信器
- 11 光パルス光源
- 12 クロック信号源
- 13 光変調器
- 14 OTDM多重化装置
- 21 入力端子
- 22 光カップラ
- 23、23' 光サーキュレータ
- 24 クロック信号再生回路
- 25 電気増幅器
- 26 分散要素
- 27 位相変調器
- 28 出力端子
- 29 逡倍器もしくは分周器
- 30 光遅延素子
- 31 波長フィルタ
- 32 光検出器
- 33 分周器

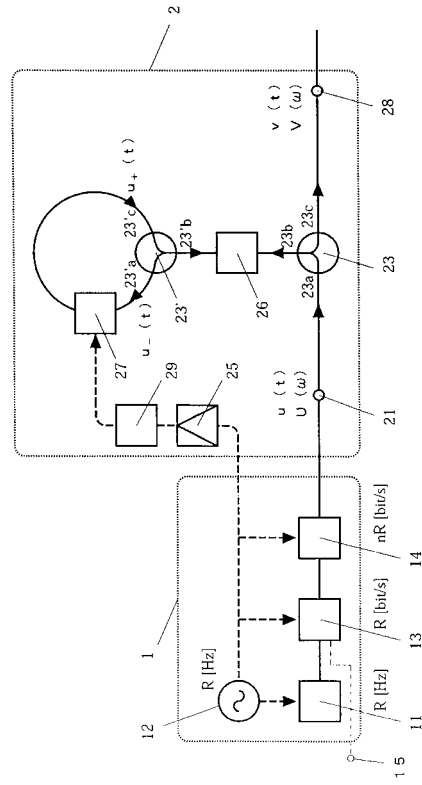
10

20

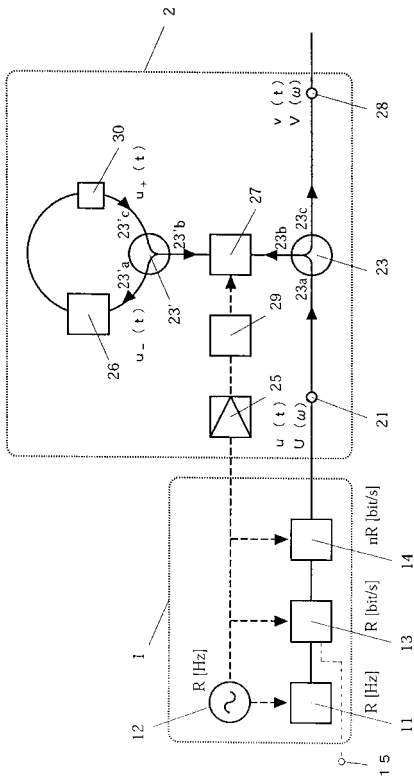
【 図 1 】



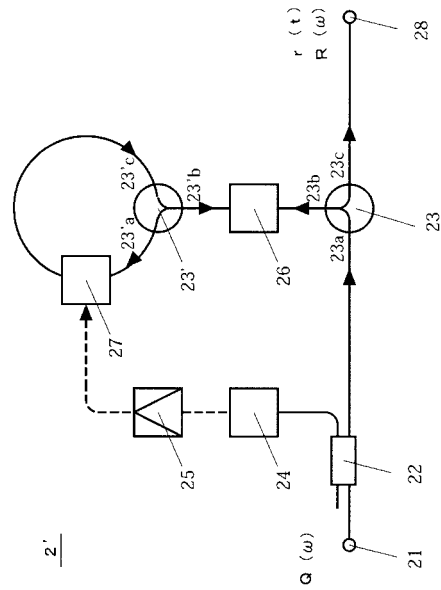
【 図 2 】



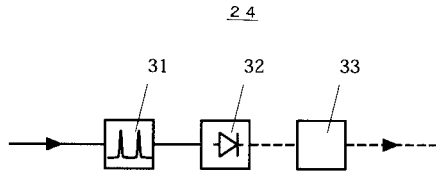
【 図 3 】



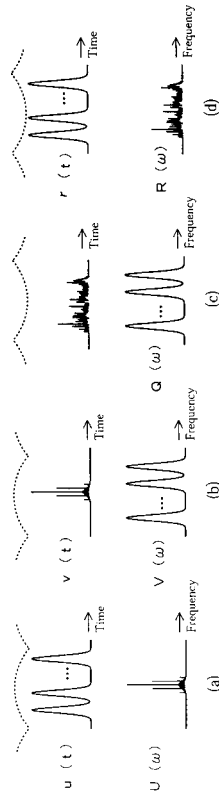
【 図 4 】



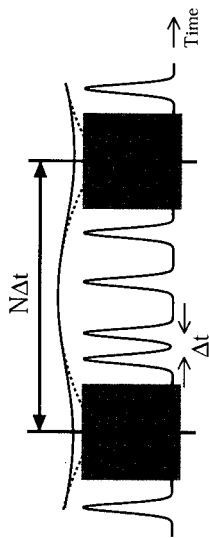
【 図 5 】



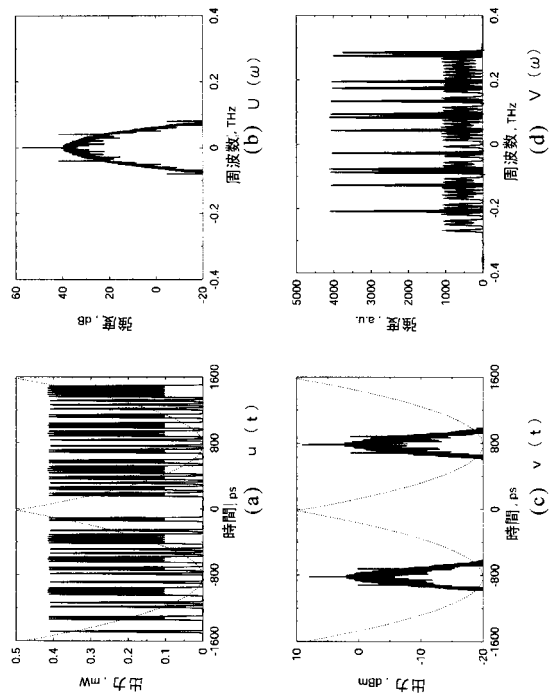
【 図 6 】



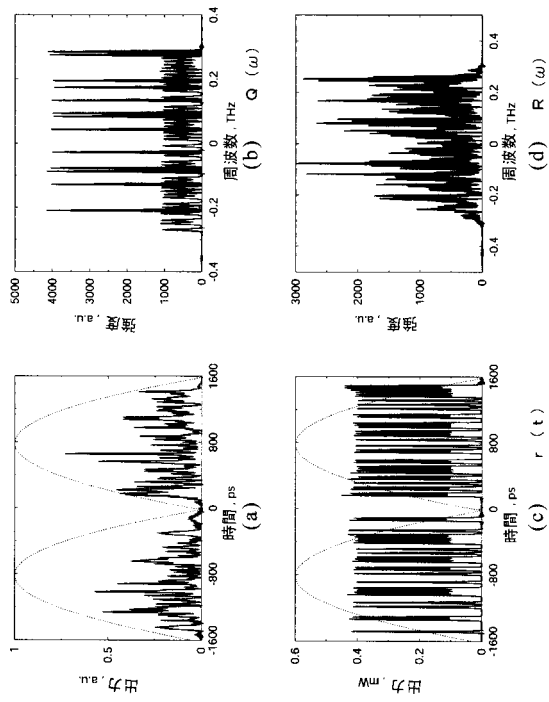
【 図 7 】



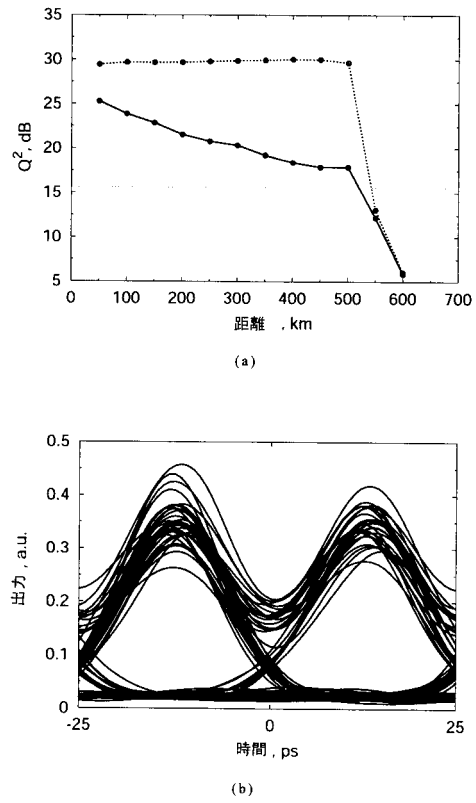
【 図 8 】



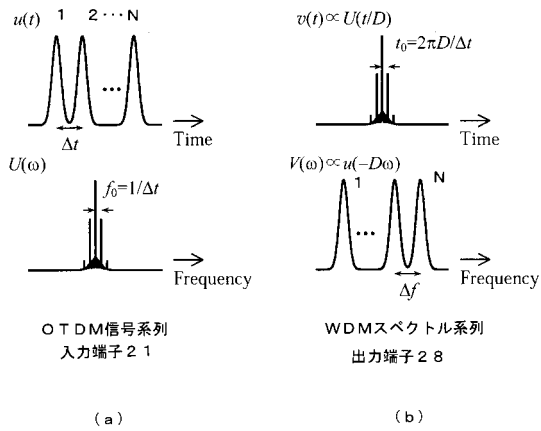
【 図 9 】



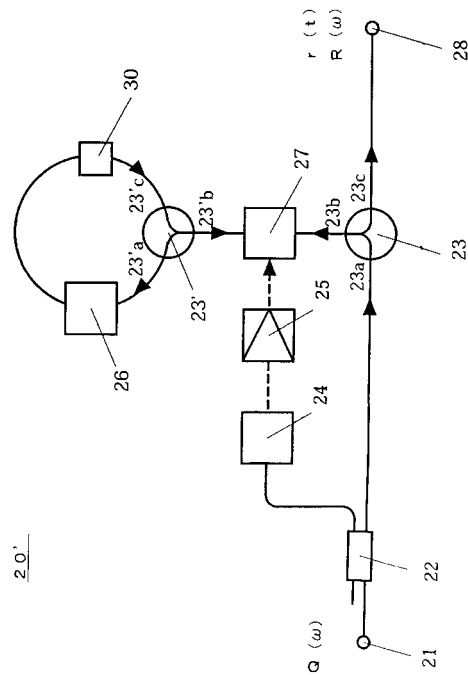
【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.⁷

F I

テーマコード(参考)

H 0 4 B 10/18

H 0 4 J 1/00

H 0 4 J 3/00

H 0 4 J 14/08