

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4008484号

(P4008484)

(45) 発行日 平成19年11月14日(2007.11.14)

(24) 登録日 平成19年9月7日(2007.9.7)

(51) Int. Cl.	F I		
HO4J 14/00 (2006.01)	HO4B 9/00	E	
HO4J 14/02 (2006.01)	HO4B 9/00	M	
HO4B 10/02 (2006.01)	HO4B 9/00	Q	
HO4B 10/18 (2006.01)	GO2F 1/365		
HO4B 10/12 (2006.01)			

請求項の数 5 (全 60 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2006-231072 (P2006-231072)	(73) 特許権者	000005223
(22) 出願日	平成18年8月28日(2006.8.28)		富士通株式会社
(62) 分割の表示	特願平8-128730の分割		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
原出願日	平成8年5月23日(1996.5.23)	(74) 代理人	100075384
(65) 公開番号	特開2006-340403 (P2006-340403A)		弁理士 松本 昂
(43) 公開日	平成18年12月14日(2006.12.14)	(72) 発明者	渡辺 茂樹
審査請求日	平成18年8月28日(2006.8.28)		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平7-304229		
(32) 優先日	平成7年11月22日(1995.11.22)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
		審査官	工藤 一光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光位相共役を用いた光ファイバ通信システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

波長多重信号光を伝送する第1の光ファイバと、

該第1の光ファイバから供給された上記波長多重信号光を受け、該波長多重信号光に対応する波長多重位相共役光を発生する位相共役光発生器と、

該位相共役光発生器から供給された上記波長多重位相共役光を受け、該波長多重位相共役光を伝送する第2の光ファイバと、

上記第2の光ファイバから出力された波長多重位相共役光を複数の波長多重位相共役光に分岐する分岐手段と、

上記分岐手段により分岐された上記各波長多重位相共役光から各チャンネルに該当する波長の信号光を選択する複数の光学フィルタと、

上記複数の光学フィルタにより選択された各チャンネルの残留分散補償量に見合った分散補償量で個別に分散補償する複数の分散補償器とを備え、

上記第1及び第2の光ファイバがそれぞれ同数に分割されたときに、各分割区間のうち上記位相共役光発生器から順に数えたときに対応する区間の波長分散の平均値は同符号で且つ各分割区間の長さにはほぼ反比例する値に設定されると共に、各分割区間における光周波数、信号光強度及び非線形屈折率の積の平均値は各分割区間の長さにはほぼ反比例するように設定される光ファイバ通信システム。

【請求項2】

上記複数の分散補償器はそれぞれ分散補償ファイバである請求項1に記載の光ファイバ

10

20

通信システム。

【請求項3】

上記第1の光ファイバに動作的に接続され伝送情報に基づいて上記信号光の変調を行う光送信機と、

上記第2の光ファイバに動作的に接続され上記伝送情報を再生する光受信機とを更に備え、

上記各分散補償器の分散値は上記光受信機における上記伝送情報の再生品質が最良になるように設定される請求項1に記載の光ファイバ通信システム。

【請求項4】

上記第1の光ファイバ、上記位相共役光発生器及び上記第2の光ファイバを含む光路上に設けられる光増幅器を更に備えた請求項1に記載の光ファイバ通信システム。

【請求項5】

上記光増幅器は複数あり、これらの間隔は上記第1及び第2の光ファイバの非線形長よりも短い請求項4に記載の光ファイバ通信システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光位相共役を用いた光ファイバ通信システムに関する。

【0002】

非線形光学を適用することにより、従来の光技術では得られなかった新しい機能の達成や特性の改善が可能となる。特に、光位相共役を用いると、伝送路内での位相ゆらぎや波長分散の補償が可能となる。

【背景技術】

【0003】

従来の光通信システムは、線型の光学特性を有する光コンポーネントを用いて構築されており、シンプルではあるが、特性や機能に制限がある。最近の光通信システム分野においては、数百kmから数千kmにも及ぶ無中継システム或いは光増幅中継システムが実現されつつあり、しかもその伝送速度は数Gb/sから10Gb/s以上にも及ぶ高速なものである。

【0004】

こうしたシステムにおいては、多くの解決すべき問題があるが、その中でもファイバの波長分散の影響は最も重大で且つ深刻な問題の1つである。上述のシステムでは、波長分散等による影響を受け伝送特性が劣化し、ひいては伝送速度や伝送距離に制限を受ける。

【0005】

波長分散に対する従来の対策は、第1にファイバの分散自体をできるだけ小さくすることに中心があった。その結果、伝送用中心波長である $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ で分散が0になるファイバが実現されている。

【0006】

また、波長分散の影響を受けにくい光変調器の検討も進んでおり、 LiNbO_3 を用いた変調器等が開発されている。

【0007】

更に、送信信号光に予め逆のチャープングを与えておき、伝送路の波長分散により補償する方法や、受信機において光学的或いは電気的に分散補償を行う研究が進んでいる。

【0008】

このように、波長分散に対する対策については、問題の深刻さを反映してか、送信機、伝送路、受信機のすべてにおいて研究が進められている。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

信号光が強度変調或いは振幅変調されてなる光パルス（複数の光パルスからなるパルス

10

20

30

40

50

列を含む)である場合、波長分散以外の原因によってパルス波形が歪むことがある。このような例としては、

(1) 波長分散と光カー効果の相乗効果による波形歪み、

(2) 光増幅多中継伝送における光アンプのASE (Amplified Spontaneous Emission) 雑音の累積によるランダムな位相揺らぎによる波形歪み、

等が顕著なものとして考えられる。本発明は、これらのうち特に(1)の波形歪みに対処するためのものである。

【0010】

今、光パルスが分散媒質中を伝搬する場合を考える。チャープしていないパルスが分散媒質を透過する際、正常分散媒質 ($\frac{d^2 n}{d\lambda^2} > 0$) の場合には、パルスの立ち上がりにおいて低周波側にシフトし、立ち下がりにおいて高周波側にシフトする。

10

【0011】

一方、異常分散媒質 ($\frac{d^2 n}{d\lambda^2} < 0$) の場合には、パルスの立ち上がりにおいて高周波側にシフトし、立ち下がりにおいて低周波側にシフトする。ここで、 β_2 は伝搬定数、 k は光の角周波数を表す。

【0012】

そして、正常分散媒質においては波長が長いほど群速度が速く、異常分散媒質においては波長が短いほど群速度が速いため、いずれの場合にもパルス幅は広がることになる。

【0013】

一方、光の強度が大きい場合には、光カー効果によって屈折率が

20

【0014】

【数1】

$$\Delta n(t) = n_2 |E(t)|^2 \dots (1)$$

【0015】

だけ変化する。ここに、 n_2 は非線形屈折率と呼ばれる量であり、シリカファイバの場合にはその値は約 $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$ である。光パルスが非線形媒質中で光カー効果を受けると、

【0016】

30

【数2】

$$\Delta \omega(t) = - \frac{\partial \Delta \phi(t)}{\partial t} = - \frac{2\pi n_2}{\lambda} \frac{\partial |E(t)|^2}{\partial t} \Delta z \dots (2)$$

【0017】

だけスペクトルが拡散(チャープ)する。ここに z は相互作用長である。この現象は、一般に自己位相変調 (Self-phase modulation: SPM) と称される。

このSPMにより光パルスの立ち上がりにおいては低周波側にシフトし、立ち下がりにおいては高周波側にシフトする。このSPMによるチャープのために分散の影響がより顕著になり、その結果、パルスの歪みがより著しくなる。そのため、光パルスが分散媒質中で光カー効果を受けると、正常分散媒質の場合には、パルスが分散だけの場合よりもさらに拡散するが、異常分散媒質の場合にはパルス圧縮が起きる。

40

【0018】

従って、上記の波長分散の効果を考え合わせると、正常分散媒質の場合には大きなパルス拡散が発生し、異常分散媒質の場合には波長分散によるパルス拡散とSPMによるパルス圧縮のうち大きいほうの効果が表れる。これら2つの効果をバランスさせたものが光ソリトンである。

【0019】

一般に異常分散媒質においてSPMによるパルス圧縮を加えたほうが高い信号SNを保

50

持できて都合がよいように考えがちであるが、最近光アンプを用いて高いレベルの光パワーで伝送できるようになったことと、分散シフトファイバの開発により比較的小さな波長分散値が実現できるようになったことにより、一概にパルス圧縮を加えた方がよいともいえなくなってきた。

【 0 0 2 0 】

つまり、パルス圧縮効果が大きくなりすぎて大きな波形歪みが発生するのである。特に、NRZパルスの場合には、パルスの立ち上がり、立ち下がり部分において集中的にパルス圧縮が起こるため、急激な波形変化や、極端な場合には、立ち下がり部分が立ち上がり部分を追い抜き、パルスが3つに分裂するようなことも起こる。また、長距離光増幅多中継伝送の場合には、信号光を励起光として光アンプの自然放出光との間で4光波混合が生じ、その影響が甚大になるという問題もある。

10

【 0 0 2 1 】

よって、本発明の目的は、波長分散と光カー効果の相乗効果による波形歪みを抑えた光ファイバ通信システムを提供することにある。

【 0 0 2 2 】

本発明の他の目的は、本発明システムにおいて偏波変動にかかわらず最適な受信状態を維持することにある。

【 0 0 2 3 】

本発明の更に他の目的は、本発明システムにおける監視制御を最適化することにある。

【 0 0 2 4 】

本発明の別の目的は、本発明システムを波長分割多重(WDM)に適合させることにある。

20

【課題を解決するための手段】

【 0 0 2 5 】

本発明によれば、波長多重信号光を伝送する第1の光ファイバと、該第1の光ファイバから供給された上記波長多重信号光を受け、該波長多重信号光に対応する波長多重位相共役光を発生する位相共役光発生器と、該位相共役光発生器から供給された上記波長多重位相共役光を受け、該波長多重位相共役光を伝送する第2の光ファイバと、上記第2の光ファイバから出力された波長多重位相共役光を複数の波長多重位相共役光に分岐する分岐手段と、上記分岐手段により分岐された上記各波長多重位相共役光から各チャンネルに該当する波長の信号光を選択する複数の光学フィルタと、前記複数の光学フィルタにより選択されたチャンネル毎の残留分散補償量に見合った分散補償量で個別に分散補償する複数の分散補償器とを備え、上記第1及び第2の光ファイバがそれぞれ同数に分割されたときに、各分割区間のうち上記位相共役光発生器から順に数えたときに対応する区間の波長分散の平均値は同符号で且つ各分割区間の長さにはほぼ反比例する値に設定されると共に、各分割区間における光周波数、信号光強度及び非線形屈折率の積の平均値は各分割区間の長さにはほぼ反比例するように設定される光ファイバ通信システムが提供される。

30

【発明の効果】

【 0 0 2 6 】

本発明によると、光ファイバ通信システムを上述のように構成したので、波長分散と光カー効果の相乗効果による波形歪みを補償することができるようになるという作用が生じる。尚、高速システムに適用するために、以下の説明では光ファイバがシングルモードファイバであるとする。

40

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 2 7 】

以下、本発明の実施形態を添付図面に沿って詳細に説明する。

【 0 0 2 8 】

図1は本発明の光ファイバ通信システムの基本構成を示す図である。送信機2は、伝送データに基づく変調を行って信号光を生成し、この信号光 E_s は、プローブ光として第1の光ファイバSMF1(長さ L_1 , 分散 D_1 , 非線形屈折率 $n_{2,1}$)で伝送された後、全伝

50

送路の途中にある位相共役光発生器 (Phase conjugator : PC) 6 に入力する。

【 0 0 2 9 】

位相共役光発生器 6 でポンプ光 E_0 を用いて信号光 E_s は位相共役光 E_c に変換され、これを第 2 の光ファイバ S M F 2 (長さ L_2 , 分散 D_2 , 非線形屈折率 n_{22}) で受信機 4 まで伝送する。

【 0 0 3 0 】

受信機 4 では、位相共役光を受光器で受け、信号検出がなされる。信号検出は、例えば、位相共役光を帯域フィルタで抽出した後の光直接検波や光ヘテロダイン検波によってなされる。これにより、伝送データが再生される。

【 0 0 3 1 】

尚、ここで用いられる光ファイバは例えばシリカファイバであり、光通信において一般的に用いられている $1.3 \mu\text{m}$ 零分散ファイバや $1.55 \mu\text{m}$ 分散シフトファイバ等がその代表例である。また、信号光は周波数の異なる複数の光源からの出力信号光の周波数多重信号光でもよい。

【 0 0 3 2 】

位相共役光発生器 6 は、2 次又は 3 次の非線形光学媒質と、この媒質に信号光及びポンプ光を供給する手段とを有する。2 次の非線形光学媒質が用いられている場合は、パラメトリック効果により、また、3 次の非線形光学媒質が用いられている場合には、縮退型あるいは非縮退型の四光波混合により位相共役光が発生する。

【 0 0 3 3 】

3 次の非線形光学媒質としては例えばシリカ光ファイバを用いることができ、この場合、4 光波混合におけるポンプ光の波長を上記ファイバの零分散波長にほぼ一致させておくことにより、良好な位相共役光の発生が可能になる。

【 0 0 3 4 】

図 2 は位相共役光発生器の例を示すブロック図である。この位相共役光発生器は、非線形光学媒質としての光ファイバ 1 2 1 と、ポンプ光源としてのレーザダイオード 1 2 2 と、信号光及びポンプ光を加え合わせて光ファイバ 1 2 1 に供給する光学手段としての光カプラ 1 2 3 とを備えている。

【 0 0 3 5 】

光ファイバ 1 2 1 は望ましくはシングルモードファイバである。この場合において、信号光の波長と励起光の波長をわずかに異ならせて非縮退型の四光波混合を生じさせるときには、光ファイバ 1 2 1 の零分散を与える波長がポンプ光の波長 (レーザダイオード 1 2 2 の発振波長) に一致するようにしておく。

【 0 0 3 6 】

光カプラ 1 2 3 は、4 つのポート 1 2 3 A , 1 2 3 B , 1 2 3 C 及び 1 2 3 D を有している。ポート 1 2 3 A には図 1 の第 1 の光ファイバ S M F 1 が接続され、ポート 1 2 3 B にはレーザダイオード 1 2 2 が接続され、ポート 1 2 3 C には光ファイバ 1 2 1 の第 1 端が接続され、ポート 1 2 3 D はデッドエンドにされている。光ファイバ 1 2 1 の第 2 端は、図 1 の第 2 の光ファイバ S M F に接続される。

【 0 0 3 7 】

尚、本願明細書において「接続」という語は、動作的な接続を意味し、光学的に直接接続される場合を含み、更に、光フィルタや光アイソレータ等の光学要素を介して接続される場合や偏光状態を適当に調整した上で接続される場合を含む。

【 0 0 3 8 】

光カプラ 1 2 3 は、ポート 1 2 3 A 及び 1 2 3 B に供給された光をポート 1 2 3 C から出力するように機能し、この光カプラ 1 2 3 としては、例えば、ファイバ融着型のもの、ハーフミラー、光合波器、偏光ビームスプリッタ等が使用される。

【 0 0 3 9 】

この構成によると、光カプラ 1 2 3 のポート 1 2 3 A に供給された信号光とポート 1 2 3 B に供給されたポンプ光とを加え合わせて非線形光学媒質である光ファイバ 1 2 1 に供

10

20

30

40

50

給することができるので、四光波混合により信号光を位相共役光で変換することができる。

【 0 0 4 0 】

図 3 は位相共役光発生器の他の例を示すブロック図である。この位相共役光発生器は、図 2 の例と対比して、レーザダイオード 1 2 2 と光カプラ 1 2 3 のポート 1 2 3 B との間

【 0 0 4 1 】

に偏光スクランブラ（偏波スクランブラ）1 2 4 を設けている点で特徴付けられる。一般に、シングルモードファイバの偏波モードには、偏波面が互いに直交する 2 つの偏波モードが存在し、各種の外乱の影響によりこれら 2 つの偏波モードが結合して、結果として、ファイバの第 1 端に供給される光の偏波状態はこのファイバの第 2 端から出力される光の偏波状態に一致しない。従って、伝送路としてシングルモードファイバが用いられている場合には、位相共役光発生器に供給される信号光の偏波状態は、環境変化等によ

10

【 0 0 4 2 】

って時間と共に変動する。一方、位相共役光発生器における信号光から位相共役光への変換効率は、位相共役光発生器に供給される信号光の偏波状態とポンプ光の偏波状態との関係に依存する。

【 0 0 4 3 】

図 3 の例によると、レーザダイオード 1 2 2 からのポンプ光を偏光スクランブラ 1 2 4 を介して信号光と合流させるようにしているので、供給される信号光の偏波状態が時間と共に変動する場合であっても、各種光デバイスの安定動作を実現することができる。

20

【 0 0 4 4 】

偏光スクランブラ 1 2 4 は、1 / 2 波長板及び 1 / 4 波長板の組み合わせや L i N b O₃。位相変調器等を用いて通常通り構成され、例えば、レーザダイオード 1 2 2 から出力されるポンプ光がほぼ直線偏光である場合には、その偏波面を回転するように機能する。

【 0 0 4 5 】

図 3 に図示された例では、レーザダイオード 1 2 2 から出力されるポンプ光に対して偏光スクランブラ 1 2 4 を作用させているが、光カプラ 1 2 3 のポート 1 2 3 A と図 1 の第 1 の光ファイバ S M F 1 との間あるいは送信機に偏光スクランブラを配置して信号光に対して偏光スクランブラが作用するようにしてもよい。

【 0 0 4 6 】

次に、本発明の原理を説明する。光ファイバ伝送における信号光 $E(x, y, z, t) = F(x, y)(z, t) \exp[i(\omega t - kz)]$ の伝搬は、一般に以下の非線形波動方程式によって記述可能である。ここに、 $F(x, y)$ は横方向のモード分布、 (z, t) は光の複素包絡線を表し、この (z, t) は光の周波数 ω に比べて十分にゆっくり変化すると仮定する。

30

【 0 0 4 7 】

【 数 3 】

$$i \frac{\partial \phi}{\partial z} - (\frac{1}{2}) \beta_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial T^2} + \gamma |\phi|^2 \phi = - (i/2) \alpha \phi \quad \dots (3)$$

40

【 0 0 4 8 】

ここに、 $T = t - \frac{1}{v} z$ (v は伝搬定数)、 α はファイバの損失、 β_2 はファイバの波長分散を表し、

【 0 0 4 9 】

【数4】

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c A_{\text{eff}}} \quad \dots (4)$$

【0050】

は、ファイバ内の光カー効果の係数を表す。ここに、 n_2 と A_{eff} はそれぞれファイバの非線形屈折率と有効コア断面積を表す。 c は真空中の光速である。ここでは1次分散までを考慮し、それより高次の分散は省略した。また、 $\beta_1(z)$, $\beta_2(z)$, $\beta_3(z)$ は z の関数であるとし、それぞれ $\beta_1(z)$, $\beta_2(z)$, $\beta_3(z)$ と表されるものとする。さらに、位相共役光発生器の位置を原点 ($z = 0$) とする。ここで、以下の規格化関数を導入する。

10

【0051】

【数5】

$$\phi(z, T) = A(z) u(z, T) \quad \dots (5)$$

【0052】

ここに、

【0053】

【数6】

$$A(z) \equiv A(0) \exp \left[-\left(\frac{1}{2}\right) \int_0^z \alpha(z) dz \right] \quad \dots (6)$$

20

【0054】

は、振幅を表し、 $\alpha(z) > 0$ の場合は伝送路が損失を持ち、 $\alpha(z) < 0$ の場合は利得を持つことをそれぞれ表す。 $A(z) = A(0)$ は損失無しの場合を表す。また、 $A(z)^2 = P(z)$ は光パワーに相当する。(5), (6) 式を(3)式に代入すると、次の発展方程式が得られる。

【0055】

【数7】

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \left(\frac{1}{2}\right) \beta_2(z) \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \gamma(z) A(z)^2 |u|^2 u \quad \dots (7)$$

30

【0056】

ここで以下の変換を行う。

【0057】

【数8】

$$\zeta = \int_0^z |\beta_2(z)| dz \quad \dots (8)$$

40

【0058】

その結果、(7)式は以下のように変換できる。

【0059】

【数 9】

$$i \frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{\text{sgn}[\beta_2]}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \frac{r(\zeta) A(\zeta)^2}{|\beta_2(\zeta)|} |u|^2 u \dots (9)$$

【0060】

ここで、 $\text{sgn}[\beta_2] = \pm 1$ は、 $\beta_2 > 0$ 、即ち正常分散の場合には +1 を、 $\beta_2 < 0$ 、即ち異常分散の場合には -1 をそれぞれとる。(9)式が成り立てばその複素共役も成り立ち、次の式が得られる。

【0061】

【数 10】

$$-i \frac{\partial u^*}{\partial \zeta} = \frac{\text{sgn}[\beta_2]}{2} \frac{\partial^2 u^*}{\partial T^2} - \frac{r(\zeta) A(\zeta)^2}{|\beta_2(\zeta)|} |u^*|^2 u^* \dots (10)$$

【0062】

複素共役光 u^* は u に対する発展方程式と同じ発展方程式に従う。ただし、その際の伝搬方向は反転する。この動作はまさしく位相共役光発生器の動作である。透過型の位相共役光発生器においては上記のことは GVD (群速度分散) と SPM による位相シフトを反転させることと等価である。

【0063】

ここで図 4 のシステムを考える。長距離伝送においては伝送路損失を光増幅中継して補償する。図 1 の光ファイバ SMF 1 及び SMF 2 にそれぞれ対応する伝送路 I (長さ L_1) と伝送路 II (長さ L_2) の間に位相共役光発生器を配置する。

【0064】

規格化座標 (ζ 軸) において、位相共役光発生器は中点 $\zeta = 0$ に置き、受信機は $\zeta = -L_1$ に置く。伝送路 I 内 ($-L_1 < \zeta < 0$) においては、 $u(\zeta)$ は発展方程式 (9) に従う。位相共役光発生器により $u(0)$ は位相共役光 $u^*(0)$ に変換される。 $u^*(\zeta)$ は伝送路 II 内 ($0 < \zeta < L_2$) を発展方程式 (10) に従って伝搬する。

【0065】

このとき ζ 軸上の位相共役光発生器の位置 ($\zeta = 0$) に関して対称な位置にある任意の 2 点 $-\zeta_1$ 、 ζ_1 における規格化距離 d 内において、(9)式の右辺第一、二項の係数が等しくなるように各パラメータの値を設定すれば、 $-\zeta_1$ における u^* は ζ_1 における u の位相共役光となる。即ち、次の 2 式が条件となる。

【0066】

【数 11】

$$\text{sgn}[\beta_2(-\zeta)] = \text{sgn}[\beta_2(\zeta)] \dots (11)$$

$$\frac{r(-\zeta) A(-\zeta)^2}{|\beta_2(-\zeta)|} = \frac{r(\zeta) A(\zeta)^2}{|\beta_2(\zeta)|} \dots (12)$$

【0067】

(11)式は伝送路 I、II の分散の符号が等しい必要性を示しており、これは分散補償の条件と一致する。ファイバ内では、 $\beta_2 > 0$ 、 $A(z)^2 > 0$ であることを考慮すると、上記条件は次のようにまとめることができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 8 】

【 数 1 2 】

$$\frac{\gamma(-\zeta) A(-\zeta)^2}{\beta_2(-\zeta)} = \frac{\gamma(\zeta) A(\zeta)^2}{\beta_2(\zeta)} \quad \dots (13)$$

【 0 0 6 9 】

伝送路 I 内の () における GVD と SPM による位相シフトは位相共役光発生器により符号が反転する。従って、この位相シフトによる波形歪みは伝送路 II 内の () における位相シフトによる歪みにより補償される。このように小区間毎に上記のような設定による補償を繰り返していけば、全長に渡る補償が可能となる。

10

【 0 0 7 0 】

次に、上記の補償条件を z 座標で記述する。(13) 式より、

【 0 0 7 1 】

【 数 1 3 】

$$\frac{\gamma(-z_1) A(-z_1)^2}{\beta_2(-z_1)} = \frac{\gamma(z_2) A(z_2)^2}{\beta_2(z_2)} \quad \dots (14)$$

20

【 0 0 7 2 】

を得る。即ち、各区内での非線形定数と光パワーの積に対する波長分散の比を等しくすることが条件となる。ここで、 $-z_1, z_2$ は次の式を満足させる 2 点である。

【 0 0 7 3 】

【 数 1 4 】

$$\int_0^{-z_1} |\beta_2(z)| dz = -\int_0^{z_2} |\beta_2(z)| dz \quad \dots (15)$$

30

【 0 0 7 4 】

(14), (15) 式より (16), (17) 式が得られる。

【 0 0 7 5 】

【 数 1 5 】

$$\beta_2(-z_1) dz_1 = \beta_2(z_2) dz_2 \quad \dots (16)$$

$$\gamma(-z_1) A(-z_1)^2 dz_1 = \gamma(z_2) A(z_2)^2 dz_2 \quad \dots (17)$$

40

【 0 0 7 6 】

dz_1, dz_2 はそれぞれ $-z_1, z_2$ における小区間の長さであり、各区間長は当該区間内の分散に反比例するかあるいは非線形定数と光パワーの積に反比例する。ここで、分散 β_2 と分散パラメータ D の関係、 $D = - (2c / \beta_2)$ を考慮すれば、(16), (17) 式より以下の関係が得られる。 D は z の関数であり、 $D(z)$ と表される。

【 0 0 7 7 】

【数16】

$$D(-z_1) dz_1 = D(z_2) dz_2 \quad \dots (18)$$

$$\gamma(-z_1) P(-z_1) dz_1 = \gamma(z_2) P(z_2) dz_2 \quad \dots (19)$$

【0078】

分散及び非線形効果についていずれも位相共役光発生器に関して対称な二つの位置の一方における増加分と他方の減少分とが等しいことが補償の条件であることがわかる。

10

【0079】

(18), (19)式は、補償のための必要条件であり、対応する各小区間での総分散量と光カー効果の総量が等しくなることを示している。ここで(4)式と $I = P / A_{eff}$ が光強度を表すことを考慮すると、伝送路 I と伝送路 II の各小区間の分散値、非線形屈折率及び光強度の積を区間の長さに反比例するように設定し、且つその比が等しくなるように設定すれば補償可能であることを示している。

【0080】

特に、D及び γ が一定であり且つパワーの変動が小さい場合には(18), (19)式を積分すれば、

【0081】

【数17】

$$D_1 L_1 = D_2 L_2 \quad \dots (20)$$

$$\gamma_1 \bar{P}_1 L_1 = \gamma_2 \bar{P}_2 L_2 \quad \dots (21)$$

を得る。ここで、 \bar{P}_1 , \bar{P}_2 はそれぞれ伝送路 I, II における平均パワーである。また、 D_1 ,

γ_1 はそれぞれ伝送路 I の分散パラメータ及び分散、 D_2 , γ_2 はそれぞれ伝送路 II の分散パラ

メータ及び分散である。(20), (21)式は分散補償及び平均値近似によるSPMの補償法

30

における条件と一致する。

【0082】

ここで、損失を補償するための利得を与える方法について考えてみる。第1には、伝送路として分布定数的な利得媒質を用いることが挙げられる。例えば、ラマン増幅器や $E r^{3+}$ イオンを希薄にドープしたドープファイバ増幅器等が考えられる。

【0083】

本発明では、光カー効果と分散値の比を制御するようにしている。位相共役光発生器に関して等価的に対称の位置において同じ値の光カー効果と分散の比を与えることにより、完全な補償を実現することができる。

40

【0084】

伝送路に沿ってこの比を大きくするためには、分散を徐々に小さくしていくか、光カー効果を徐々に大きくしていけばよい。分散の値を変化させることは、ファイバの設計により可能である。例えば、分散シフトファイバ(DSF)の零分散波長を変化させることや、ファイバのコアとクラッドの比屈折率差やコア径を変えることにより上述の比を変化させることができる。

【0085】

一方、光カー効果を変化させることは、非線形屈折率を変化させたり光強度を変化させることにより可能となる。即ち、損失、非線形屈折率、モードフィールド径及び分散から

50

選択される少なくとも一つのファイバパラメータを連続的に変化させることにより、本発明に適用可能な光ファイバを製造することができる。ここでは、光強度を変化させる方法について考える。

【0086】

例えば、損失のある伝送路に沿って光強度を大きくするためには、損失がさほど変化しない範囲で有効コア断面積 A_{eff} を次第に小さくしていけばよい。例えば、モードフィールド径 (MFD) が半分になれば光強度は約4倍になる。

【0087】

もっと大きな損失に対しては更にMFDを小さくしなければならないが、あまりMFDを小さくすると損失が増えてしまい効果が出ない。現実的なMFDの最小値はせいぜい2

10

~3 μm というところである。

【0088】

1.3 μm 零分散SMFのMFDが約10 μm 、1.55 μm DSFのMFDが約8 μm であることを考慮すると、MFDだけで対応可能な損失はSMFで約7 dB、DSFでは約6 dBということになる。

【0089】

更に大きな損失がある場合でも、コア径を小さくすることの効果と、分散の値を小さくすることの効果とを組み合わせると本発明を実施すればよい。例えば、分散の値を半分にすることができれば更に3 dBの損失がある場合でも(14)式を満足する分布を実現することができる。

20

【0090】

図5は本発明の第1実施形態を示す図である。ここでは、位相共役光発生器6を挟んで各伝送路の対称な位置 z_{1j} 、 z_{2j} ((15)式で定義されている)にある微小区間 $1j$ (長さ z_{1j})、 $2j$ (長さ z_{2j}) の各パラメータを、

【0091】

【数18】

$$D_{1j} \Delta z_{1j} = D_{2j} \Delta z_{2j} \quad \dots (22)$$

$$\frac{\omega_1 n_{21j} \langle I_{1j} \rangle}{D_{1j}} = \frac{\omega_2 n_{22j} \langle I_{2j} \rangle}{D_{2j}} \quad \dots (23)$$

30

【0092】

となるように設定する。 D_{1j} 、 ω_1 、 n_{21j} 、 $\langle I_{1j} \rangle$ はそれぞれ区間 $1j$ における分散パラメータ、光周波数、非線形屈折率、平均強度であり、 D_{2j} 、 ω_2 、 n_{22j} 、 $\langle I_{2j} \rangle$ はそれぞれ区間 $2j$ における分散パラメータ、光周波数、非線形屈折率、平均強度である。

【0093】

具体的な例を説明する。今、光ファイバSMF1の分散が $D_1 = -30 \text{ ps}^2 / \text{nm} / \text{km}$ で一定であり、光ファイバSMF2の分散が $D_2 = -0.3 \text{ ps}^2 / \text{nm} / \text{km}$ で一定であるとすると、このとき、(20)式より、 $L_1 / L_2 = D_2 / D_1 = 1 / 100$ となる。

40

【0094】

従って、例えば光ファイバSMF2の全長を $L_2 = 50 \text{ km}$ とすると、 $L_1 = 500 \text{ m}$ となる。このことは、500 mのファイバにより予め波形を歪ませておくことにより、50 kmの歪みのない伝送が可能になることを示している。

【0095】

或いは、ファイバパラメータの異なる複数のファイバを、(22)、(23)式を満足するように縦列に配置し、各ファイバをスプライスして接続してもよい。

【0096】

50

図6は本発明の第2実施形態を示す図である。ここでは、光アンプを使った多中継伝送に本発明を適用した場合を示している。今、光ファイバSMF2が伝送路であるとして、その途中に $(N - 1)$ 個の光アンプ $A - 1, \dots, A - (N - 1)$ を間隔 l_2 で中継して全長 $L_2 = N l_2$ の光増幅中継伝送を行う。このとき、図6に示されるように、光ファイバSMF1についても中継数と同じように N 等分し、各区間の距離を l_1 、全長を L_1 とする。

【0097】

このとき、 L_1 と L_2 の比(l_1 と l_2 の比)は、各ファイバの分散の逆数に比例するから、 $L_1 = (D_2 / D_1) L_2$ ($l_1 = (D_2 / D_1) l_2$)とする。また、光カー効果については、位相共役光発生器6に関して対応する区間内の対応する各微小区間において(23)式が成り立つようにしておく。

10

【0098】

例えば、上述の分散値の場合には、中継区間50kmの伝送において、光ファイバSMF1を500m毎に区切って上記設定を行うことになる。従って、例えば光ファイバSMF1として500m毎に40分割した全長20kmのファイバを用いれば、位相共役光発生器6の後50km毎の39中継による全長2000kmの伝送が可能となる。

【0099】

この場合、光ファイバSMF1の長さ500mの各区間に対応する光ファイバSMF2の各区間の長さが異なることは言うまでもない。対応する区間は(15)式で定義されており、光ファイバSMF1の区間のうち大きな分散の区間は光ファイバSMF2におけるより長い区間をカバーする。

20

【0100】

ここでは分割を等間隔に行っているが、対応する区間毎に(22)、(23)式が成り立てばよいから、特に等間隔である必要はない。特に、光ファイバSMF1については損失を補償する光増幅器が設けられていないので、現実的な分散やパワーでは条件を満たすことが困難になることもある。こうした場合には、 L_1 を等間隔に分割せずに、損失によって強度が小さくなるにつれ L_1 を大きくしていくことなどにより、分散やパワーについての要求を緩和することができる。

【0101】

また、光ファイバSMF2についても分散を一定にせず、例えば各中継区間を分割してパワーの高い部分では比較的分散を大きくし、パワーが小さい部分では比較的分散を小さくすることにより、等価的に損失の効果を小さくすることができる。こうした方法により、光ファイバSMF1における分散やパワーについての要求を緩和することが可能である。

30

【0102】

こうした方法における分割は細かければ細かいほど有効であることはいうまでもないが、実際には数分割程度でも十分有効である。必要な分割数は伝送速度と伝送距離によって決まる。

【0103】

又、図6の実施形態では、光ファイバSMF2を光増幅中継伝送しているが、光ファイバSMF1を光増幅中継伝送した後同様の方法により光ファイバSMF2にて補償してもよい。その例を図7に示す。

40

【0104】

図7は本発明の第3実施形態を示す図である。ここでは、位相共役光発生器6の前後で中継数を同じにしておき、位相共役光発生器6に関して対称な区間において(22)、(23)式が成り立つように設定する。具体的には、第1の光ファイバSMF1の途中には N 個の光増幅器 $A1 - 1, \dots, A1 - N$ が設けられており、第2の光ファイバSMF2の途中には同じく N 個の光増幅器 $A2 - 1, \dots, A2 - N$ が設けられている。

【0105】

この実施形態では L_1 を長くすることができるので、これに対応して L_2 も長くなり、

50

長距離伝送が可能になる。

【0106】

その際、前述のように光ファイバSMF2における分散を一定にせず、例えば各中継区間を分割してパワーの高い部分では比較的分散を大きくし、パワーの小さい部分では比較的分散を小さくすることにより、等価的に損失の効果を小さくすることができる。

【0107】

図8は本発明の第4実施形態を示す図である。ここでは、平均強度近似を用いた伝送において、分散と光カー効果も伝送路内で一定でない場合についての応用が示されている。まず、分散パラメータの平均値について、

【0108】

【数19】

$$\langle D_1 \rangle L_1 = \langle D_2 \rangle L_2 \quad \dots (24)$$

【0109】

が成り立つようにし、更に非線型屈折率と光強度の積の平均値について、

【0110】

【数20】

$$\langle n_{21} I_1 \rangle L_1 = \langle n_{22} I_2 \rangle L_2 \quad \dots (25)$$

【0111】

が成り立つように設定する。これによりおおよその補償が可能となる。

【0112】

補償の残留分については、図8に示されるように、光ファイバSMF2と受信機4との間に設けられた長さ L_3 の第3の光ファイバSMF3の分散 D_3 とこの中の光カー効果 $n_{23} I_3$ を適当に調節することにより、ほぼ完全な補償が可能になる。

【0113】

図9は本発明の第5実施形態を示す図である。この実施形態は、図8の第4実施形態を光増幅多中継伝送系に適用したものである。この場合、位相共役光発生器6の前後に複数の中継器を設け、位相共役光発生器6に関して対応する区間において(22)、(23)式が成り立つように設定すればよいし、より大雑把には、特願平5-221856号に示されるように、全長における平均値において上式が成り立つように設定してもある程度の補償は可能である。さらに補償の程度をよくするためには、図8の第4実施形態におけるのと同様にして第3の光ファイバSMF3を用い、その分散 D_3 と光カー効果 $n_{23} I_3$ を調節すればよい。

【0114】

ところで、実際の長距離伝送システムにおいては、周囲環境により分散値に揺らぎが生じる。特に、温度変動による分散値の変動の影響は大きく、これは特に零分散付近の小さな分散値に設定したシステムの場合に顕著である。

【0115】

零分散付近の分散値は、信号光の波長を変えることにより2次分散の傾斜(約 $0.08 \text{ ps}^2 / \text{nm}^2 / \text{km}$)に従って変えることが可能である。一方、四光波混合を用いて位相共役光を発生させるシステムにおいては、位相共役光の角周波数を ω_c 、ポンプ光の角周波数を ω_p 、信号光の角周波数を ω_s とすると、 $\omega_c = 2\omega_p - \omega_s$ の関係があるから、 ω_s または ω_p を変えることにより ω_c を変えることが可能である。

【0116】

このように、送信機において ω_s を調整するか、図示しない端局から送られる制御信号により位相共役光発生器6において ω_p を調整することにより、分散の変動に合わせて常時最適な伝送を行うことができる。

10

20

30

40

50

【0117】

図10は光ファイバSMF1及びSMF2のそれぞれの零分散波長 λ_{10} 、 λ_{20} に対する信号光、ポンプ光及び位相共役光の周波数配置を示す図である。

【0118】

もしも、2つのファイバの分散曲線が環境の変化により同じ方向にシフトしたとすると(図の鎖線参照)、 λ_s と λ_c を同じ方向にシフトさせるのがよいが、 λ_s の変化に対して λ_c は反対方向にシフトするので、 λ_s を変化させつつ λ_p を λ_s と同じ方向に同じだけ変化させるのがよい。図10のような最も単純な場合には、 λ_s と λ_p を同じ方向に同じ大きさ()だけシフトすればよい($\lambda_c + \text{シフト} = 2(\lambda_p + \text{シフト}) - (\lambda_s + \text{シフト})$)。現実には、分散の変動は単純なものではないので、状況に合わせて適宜補正することになる。実際には、端局において受信波形をモニターする等しながら λ_s と λ_p の微調整を行って最適状態を得る。

10

【0119】

図11は本発明の第6実施形態を示す図である。この実施形態は基本的には平均強度を用いたものであるが、光アンプ間のパワーの変化(低下)の影響を緩和するために、図7に示した分散の制御を行うものである。

【0120】

具体的には、各中継区間を数分割し、伝送方向に向かって次第に分散値を小さくしていくものである。一例を図12に示す。

【0121】

ここでは、伝送路の平均分散を $D_1 = -30 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$ 、 $D_2 = -0.30 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$ に設定する場合において、各中継区間を3分割し、伝送方向に向かって -0.35 、 -0.30 、 $-0.25 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$ になるように設定した例を示している。

20

【0122】

このとき、中継区間が例えば51kmであれば、17km毎に分割することになり、分散の傾斜は約 $-0.04 \text{ dB} / \text{km}$ 程度になる。従って、例えばファイバの損失が $-0.20 \text{ dB} / \text{km}$ であれば、(23)式で表される比の変化を約 $-0.16 \text{ dB} / \text{km}$ に低下することが可能となる。

【0123】

これにより、より損失の小さな状態と等価な状態を実現することができる。従って、光アンプの中継区間を拡大することが可能である。また、同じ中継間隔でも、歪みの補償効果を向上させることができる。

30

【0124】

図13は本発明の第7実施形態を示す図である。この実施形態は、本発明を光増幅多中継伝送系に適用した場合に、光ファイバSMF1内において非線形効果と分散の比が一定になるようにしたものである。

【0125】

即ち、光ファイバSMF1を複数の区間に分割し、各区間jにおける分散値 D_{1j} 、 z_{1j} の値の総和が光ファイバSMF2の総波長分散に一致するようにし、且つ、各区間jにおける非線形効果と分散の比($n_{21} I_{sj} / D_{1j}$)の値を一定に設定する。一方、光ファイバSMF2では平均値近似を用いた光増幅多中継伝送を行う。光ファイバSMF1内での非線形効果の総量を光ファイバSMF2における非線形効果の平均値の総量に一致させるものである。光ファイバSMF2についても、光ファイバSMF1と同じように設定してもよい。

40

【0126】

損失による I_{sj} の低下を、 D_{1j} を次第に小さくすることで補償することができるので、非線形効果と分散の比を一定にすることができる。また、区間の長さ z_{1j} を損失に反比例する形で長くすることにより、各区間での分散値を一定にすることができる。即ち、 $n_{21} I_{sj} z_{1j}$ が一定になるようにし、且つ、 $D_{1j} z_{1j}$ が一定になるようにするのである

50

【 0 1 2 7 】

この実施形態では、光ファイバ S M F 1 の分割数を光ファイバ S M F 2 における中継数と同じにしているが、このような平均値近似においては、実用上は、光ファイバ S M F 1 の分割数を光ファイバ 2 の中継数よりも少なくしても効果が得られる。即ち、同数の分割におけるいくつかの分割毎の平均値で代用するものである。この際の効果は、伝送速度と伝送距離に依存する。

【 0 1 2 8 】

図 1 4 は本発明の第 8 実施形態を示す図である。この実施形態では、位相共役光発生器 6 から出力された光を光カプラ 8 或いはそれに代わる図示しない光スイッチにより 2 分岐し、一方の分岐光は光ファイバ S M F 2 (長さ L_2) により受信機 4 (# 1) に伝送し、他方の分岐光は光ファイバ S M F 3 (長さ L_3) により受信機 4 (# 2) に伝送する。

【 0 1 2 9 】

光ファイバ S M F 2 には光増幅器 $A_{2-1}, A_{2-2}, \dots, A_{2-N_2}$ が設けられており、光ファイバ S M F 3 には光増幅器 $A_{3-1}, A_{3-2}, \dots, A_{3-N_3}$ が設けられている。

【 0 1 3 0 】

この実施形態のように、本発明を伝送路の分岐について応用した場合にも、非線形光学媒質 6 からの光を分岐して各受信機 4 (# 1 , # 2) までの距離に見合った分散と光強度により伝送可能である。

【 0 1 3 1 】

図 1 5 は本発明の第 9 実施形態を示す図である。この実施形態では、波長多重伝送において複数の第 3 のファイバを用いて追加補償を行っている。図において、 10 (# 1 , # 2 , \dots , # N) は光ファイバ S M F 2 により伝送された位相共役光についてチャンネル選択を行う光学フィルタを示している。各光学フィルタ 10 (# 1 , # 2 , \dots , # N) から出力された光は、それぞれ補償用の光ファイバ S M F 3 - 1 , 2 , \dots , N を介して受信機 4 (# 1 , # 2 , \dots , # N) に伝送される。

【 0 1 3 2 】

N チャンネルの波長多重信号光 $E_{S_1}, E_{S_2}, \dots, E_{S_N}$ (周波数: s_1, s_2, \dots, s_N) を光ファイバ S M F 1 により伝送した後、位相共役光発生器 6 により N チャンネルの波長多重位相共役光 $E_{C_1}, E_{C_2}, \dots, E_{C_N}$ (周波数: c_1, c_2, \dots, c_N) に変換し、光ファイバ S M F 2 により伝送後、各受信機により受信する。

【 0 1 3 3 】

このとき、光ファイバ S M F 1 、 S M F 2 での各チャンネルの分散は図 1 6 のようになっている。

【 0 1 3 4 】

位相共役光発生器を用いた分散補償においては、位相共役光発生器の前後で分散の符号が同一である必要があるから、零分散に対して、図 1 6 のような周波数配置になる。図に示された例では、正常分散から正常分散への変換になっている。この場合、光ファイバ S M F 1 では第 1 チャンネルに対する分散の絶対値が最小値であるのに対して、光ファイバ S M F 2 においては第 N チャンネルに対する分散の絶対値が最小値になっている。

【 0 1 3 5 】

従って原理的には、全チャンネルに対して同時に完全な分散補償を行うことは困難である。図 1 5 の第 9 実施形態は、このような場合に対して、光ファイバ S M F 2 の出力を分岐した後各チャンネルについて周波数選択を行い、その後各チャンネル毎の残留補償量に見合った第 3 のファイバ S M F 3 - 1 , 2 , \dots , N を用いて追加補償を行っているものである。

【 0 1 3 6 】

図 1 7 に示される本発明の第 1 0 実施形態は、全チャンネルを等しく理想的に補償するためのものである。ここでは、各チャンネル毎に信号光を別々のファイバ S M F 1 1 , 1 2 , \dots , 1 N で伝送し、その際、異なる分散に見合う強度 (I_{11}, I_{12}, I_{1N}) で伝送す

10

20

30

40

50

る。光ファイバSMF1の出力光を各チャンネル毎の位相共役光発生器6(#1), (#2)・・・, (#N) 或いは全チャンネルを一括して図示しない1つの位相共役光発生器で位相共役光に変換し、これらを共通の光ファイバSMF2で伝送して図15の第9実施形態におけるのと同じようにして受信する。

【0137】

但し、複数の信号光或いは位相共役光を合波する光マルチプレクサの図示は省略されている。ここでは第3の光ファイバSMF3は不要である。尚、この際の各チャンネルの分散と非線形効果の設定は、これまでに述べたいずれの方法によってもよい。

【0138】

ところで、位相共役光発生器は偏光依存性を持つため、信号光の偏光状態により変換効率が異なり、それによりシステム特性が不安定となる。また、位相共役光発生器や光増幅器に用いられる光部品には偏光依存性のあるものが多く、これらを多段接続したときに信号レベルが不安定となる。

【0139】

これを抑えるためには、偏波ダイバーシティ或いは偏波能動制御を適用するか、信号光或いはポンプ光について偏波スクランブルを行えばよい。特に、送信機において信号光の偏波スクランブルを行う方法は、構成が簡単である上、現在長距離伝送において問題となっている各種の偏波依存性の影響を除去する上からも有望である。

【0140】

図18は本発明の第11実施形態を示す図である。この光ファイバ通信システムは、図6の第2実施形態と対比して、第1の光ファイバSMF1として偏波保持ファイバ(PMF)を用いている点で特徴付けられる。

【0141】

送信機2は実質的に直線偏波である信号光を出力する。一般に偏波保持ファイバは少なくとも1つの主軸を有しており、この主軸に平行な偏波面を有する直線偏光を、その偏波面を維持して伝送可能である。

【0142】

送信機2からの信号光は、その偏波面が第1の光ファイバSMF1の主軸に平行になるように第1の光ファイバSMF1へ供給される。第1の光ファイバSMF1と位相共役光発生器6は、第1の光ファイバSMF1から出力される信号光の偏波面が位相共役光発生器6におけるポンプ光の偏波面に一致するように互いに接続される。

【0143】

波長分散と光カー効果の相乗効果による波形歪みを補償するための条件については、図6の第2実施形態におけるのと同じであるからその説明を省略する。

【0144】

4光波混合(FWM)や光パラメトリック増幅により生成される位相共役光の生成効率は、入力信号光及びポンプ光の偏波状態に依存する。本実施形態においては、位相共役光発生器6へ入力する信号光の偏波状態が定まっているので、位相共役光発生器6において安定且つ高効率で位相共役光を発生させることができる。

【0145】

望ましくは、送信機2、第1の光ファイバSMF1及び位相共役光発生器6は送信局内に配置され、第2の光ファイバSMF2は伝送路として用いられ、受信機4は受信局内に配置される。

【0146】

図19は本発明の第12実施形態を示す図である。この実施形態では、(N-1)個の光増幅器A-1,・・・, A-(N-1)は第1の光ファイバSMF1の途中に設けられ、位相共役光発生器6と受信機4は第2の光ファイバSMF2により接続されている。

【0147】

第1の光ファイバSMF1は偏波保持ファイバからなり、便宜上ここでは各ファイバ区間の主軸方向が一致しているものとする。そして、各光増幅器A-1,・・・, A-(N

10

20

30

40

50

- 1) の信号光出力側には、それぞれ偏光子 $12 - 1$, \dots , $12 - (N - 1)$ が設けられている。各偏光子の偏光主軸は各光増幅器から出力される信号光の偏波面にほぼ平行になるように設定される。即ち、各偏光子の偏光主軸は各ファイバ区間の主軸にほぼ平行になるように配置されている。

【 0 1 4 8 】

望ましくは、送信機 2 は送信局内に配置され、第 1 の光ファイバ S M F 1 は伝送路として用いられ、位相共役光発生器 6、第 2 の光ファイバ S M F 2 及び受信機 4 は受信局内に配置されている。

【 0 1 4 9 】

偏波保持ファイバからなる第 1 の光ファイバ S M F 1 を伝送路として用いる場合、その長さは通常 10 km 以上になるので、第 1 の光ファイバ S M F 1 の入力端に実質直線偏波である信号光を供給したとしても、第 1 の光ファイバ S M F 1 の出力端においては信号光の直線偏波状態が崩れる可能性がある。そこで、この実施形態では、各光増幅器の信号光出力側において信号光の偏波状態を改善しているのである。従って、偏光子 $12 - 1$, \dots , $12 - (N - 1)$ はそれぞれ光増幅器 $A - 1$, \dots , $A - (N - 1)$ の信号光入力側に設けられていてもよい。また、偏光子は全ての光増幅器に付加される必要はない。

【 0 1 5 0 】

この実施形態においても、図 1 8 の第 1 1 実施形態におけるのと同様に、偏波変動に係わらず最適な受信状態を維持することが可能になる。

【 0 1 5 1 】

図 2 0 は位相共役光発生器の更に他の例を示す図である。この位相共役光発生器は、図 2 の位相共役光発生器と対比して、ポンプ光源として 2 つのレーザダイオード $122 A$ 及び $122 B$ を有している点で特徴付けられる。

【 0 1 5 2 】

レーザダイオード $122 A$ 及び $122 B$ はそれぞれ実質的に直線偏波である第 1 及び第 2 のポンプ光を出力する。第 1 及び第 2 のポンプ光はこれらの偏波面が互いに直交するように偏波カプラ 125 により合成され、光カプラ 123 を介して非線形光学媒質である光ファイバ 121 へ供給される。

【 0 1 5 3 】

望ましくは、第 1 及び第 2 のポンプ光は互いに異なる光周波数を有しており、これらの差は信号光の伝送速度に対応する周波数と等しいかそれよりも大きく設定される。また望ましくは、第 1 及び第 2 のポンプ光はほぼ同振幅である。

【 0 1 5 4 】

この位相共役光発生器の構成によると、非線形光学媒質である光ファイバ 121 内において常に位相共役光が発生するので、信号光の偏波変動に係わらず最適な受信状態を維持することができる。

【 0 1 5 5 】

図 2 1 は本発明の第 1 3 実施形態を示す図である。光送信機 2、第 1 の光ファイバ S M F 1 及び位相共役光発生器 6 は、送信局 S T に含まれる。第 2 の光ファイバ S M F 2 は伝送路として用いられ、受信機 4 は受信局 R T に含まれる。

【 0 1 5 6 】

受信局 R T は、光受信機 4 における伝送情報の再生の品質を示すパラメータをモニタリングするモニタ回路 1 4 を更に含む。モニタ回路 1 4 はモニタ信号を出力する。

【 0 1 5 7 】

送信局 S T は制御器 (フィードバック手段) 1 6 を更に含む。制御器 1 6 は、モニタ回路 1 4 からのモニタ信号を受け、モニタ回路 1 4 においてモニタリングされたパラメータが最適な値になるように光送信機 2 における信号光の波長若しくはパワー又は位相共役光発生器 6 におけるポンプ光の波長若しくはパワーをフィードバック制御する。

【 0 1 5 8 】

例えば、信号光及び / 又はポンプ光の波長の制御により、伝送路の分散が最適な値に維

10

20

30

40

50

持され、信号光及び／又はポンプ光のパワーの制御により、分散と光カー効果の相乗効果による波形歪みが適切に補償される。

【 0 1 5 9 】

図 2 2 は本発明の第 1 4 実施形態を示す図である。光送信機 2 は送信局 S T に含まれ、第 1 の光ファイバ S M F 1 が伝送路として用いられる。受信局 R T は、位相共役光発生器 6、第 2 の光ファイバ S M F 2、光受信機 4 及びモニタ回路 1 4 を含む。

【 0 1 6 0 】

制御器 1 6 は、制御対象が位相共役光発生器 6 におけるポンプ光の波長又はパワーである場合には、受信局 R T に含まれ、制御対象が光送信機 2 における信号光の波長又はパワーである場合には、送信局 S T に含まれる。

10

【 0 1 6 1 】

尚、図 2 1 又は図 2 2 のシステムにおいて、モニタ回路 1 4 から制御器 1 6 へ供給するモニタ信号の伝送は、このシステムの伝送路によることができる。例えば双方向伝送を行って、逆方向の信号光に低速の監視信号を重畳等するとよい。

【 0 1 6 2 】

次に、本発明を波長分割多重 (W D M) に適合させる場合において図 1 6 により説明した問題を解決するいくつかの実施形態を説明する。

【 0 1 6 3 】

図 2 3 は本発明の第 1 5 実施形態を示す図である。送信機 2 (# 1 , # 2 , . . . , # N) は互いに異なる波長 (光周波数) の信号光 E_{s1} , E_{s2} , . . . , E_{sN} を出力する。これらの信号光の光周波数は s_1 , s_2 , . . . , s_N である。

20

【 0 1 6 4 】

これらの信号光は複数の第 1 の光ファイバ S M F 1 1 , S M F 1 2 , . . . , S M F 1 N によって伝送され、スターカプラ等からなる光マルチ / デマルチプレクサ 1 8 によって加え合わされると共に分岐される。

【 0 1 6 5 】

分岐された信号光はそれぞれ位相共役光発生器 6 (# 1 , # 2 . . . , # M) へ供給される。位相共役光発生器 6 (# 1 , # 2 . . . , # M) は供給された複数の信号光の少なくとも 1 つに対応する位相共役光を発生する。発生した位相共役光はそれぞれ光フィルタ 2 0 (# 1 , # 2 . . . , # M) を透過した後複数の第 2 の光ファイバ S M F 2 1 , S M F 2 2 , . . . , S M F 2 M によってそれぞれ光受信機 4 (# 1 , # 2 . . . , # M) へ伝送される。

30

【 0 1 6 6 】

複数の第 2 の光ファイバによって伝送される位相共役光は、 E_{c1} , E_{c2} , . . . , E_{cM} で示されている。

【 0 1 6 7 】

第 1 の光ファイバ S M F 1 j (j = 1 , 2 , . . . , N) のそれぞれの長さは L_{1j} 、分散は D_{1j} 、非線形係数は γ_{1j} であり、各信号光のパワーは P_{1j} であるとする。また、第 2 の光ファイバ S M F 2 k (k = 1 , 2 , . . . , M) のそれぞれの長さは L_{2k} 、分散は D_{2k} 、非線形係数は γ_{2k} であり、各位相共役光のパワーは P_{2k} であるとする。

40

【 0 1 6 8 】

このとき、次の 2 つの条件が満足されるように各パラメータが設定される。

【 0 1 6 9 】

$$D_{1j} L_{1j} = D_{2k} L_{2k} = (\text{一定})$$

$$\gamma_{1j} P_{1j} / D_{1j} = \gamma_{2k} P_{2k} / D_{2k} = (\text{一定})$$

尚、ここでの一定という意味には、各ファイバ内の任意の区間における平均値が一定であるということが含まれる。

【 0 1 7 0 】

ここで、各第 2 の光ファイバ S M F 2 k による波形歪みの補償は、光フィルタ 2 0 (# k) の帯域を通過する位相共役光に対して最適化されるように設定されている。また、位

50

相共役光発生器 6 (# k) と光フィルタ 2 0 (# k) の組み合わせによって抽出されるチャンネル E_{c_k} は、信号光の任意の 1 チャンネル又はその近傍の光フィルタの帯域に含まれる複数のチャンネルの位相共役光である。

【 0 1 7 1 】

各光フィルタを透過するチャンネルは、位相共役光発生器におけるポンプ光の波長制御及び / 又は光フィルタの透過波長の制御により任意に設定可能である。

【 0 1 7 2 】

このシステムは、例えば、第 2 の光ファイバが伝送路として用いられている場合には分配システムとして機能し、第 2 の光ファイバが受信局或いは中継器内にある場合にはチャンネル交換 (クロッシング) システムとして機能する。

10

【 0 1 7 3 】

図 2 4 は本発明の第 1 6 実施形態を示す図である。このシステムは、図 2 3 の第 1 5 実施形態と対比して、複数の光送信機 2 (# 1 , # 2 , . . . , # N) に対して共通の第 1 の光ファイバ S M F 1 が用いられている点で特徴付けられる。

【 0 1 7 4 】

この変更に伴い、第 1 の光ファイバ S M F 1 の入力端は光マルチプレクサ 2 2 を介して各光送信機 2 (# j) に接続され、出力端は光デマルチプレクサ 2 4 を介して各位相共役光発生器 6 (# k) に接続される。

【 0 1 7 5 】

この共通の第 1 の光ファイバ S M F 1 における分散は全チャンネルに対してほぼ一定になるようにされている。例えば、第 1 の光ファイバ S M F 1 としては、分散の大きな分散シフトファイバ、1 . 5 5 μ m 帯の信号光に対する 1 . 3 μ m 帯零分散ファイバ、1 . 3 μ m 帯の信号光に対する 1 . 5 5 μ m 帯零分散ファイバを用いることにより、上述の条件を満足することができる。

20

【 0 1 7 6 】

このような共通の第 1 の光ファイバ S M F 1 に対して、各第 2 の光ファイバ S M F 2 k が本発明の条件を満足することにより、各チャンネルについて最適な受信状態を得ることができる。

【 0 1 7 7 】

図 2 5 は本発明の第 1 7 実施形態を示す図である。ここでは、第 1 の光ファイバとして、比較的大きな分散の N 個の光ファイバ S M F 1 1 , S M F 1 2 , . . . , S M F 1 N と比較的小きな分散の共通の光ファイバ S M F 1 とを組み合わせたものが用いられている。

30

【 0 1 7 8 】

光ファイバ S M F 1 1 , S M F 1 2 , . . . , S M F 1 N と光ファイバ S M F 1 とは光マルチプレクサ 2 2 によって接続されており、光ファイバ S M F 1 と各位相共役光発生器 6 (# k) とは光デマルチプレクサによって接続されている。

【 0 1 7 9 】

このシステムにおいても、第 1 の光ファイバと第 2 の光ファイバについて所定の条件を満足させることによって、各チャンネルについて波形歪みを良好に補償することができ、最適な受信状態を得ることができる。

40

【 0 1 8 0 】

図 2 6 はチャンネルセレクタの一例を示す図である。ここでは、チャンネルセレクタ 2 6 は、各光送信機 2 (# j) に付随して設けられている。

【 0 1 8 1 】

チャンネルセレクタ 2 6 は、光送信機 2 (# j) からのデータに基づき制御信号を発生する。チャンネルセレクタ 2 6 からの制御信号はコントローラ 2 8 へ供給される。

【 0 1 8 2 】

コントローラ 2 8 は、供給された制御信号に基づき、所望のチャンネルの信号光を選択するために、位相共役光発生器 6 (# k) におけるポンプ光の波長及び光フィルタ 2 0 (#

50

k)の特性の少なくとも一方を制御する。

【0183】

図27はチャネルセレクタの他の例を示す図である。ここではチャネルセレクタ26は各光受信機4(#k)に付随して設けられており、チャネルセレクタ26は光受信機4(#k)からのデータに基づき制御信号を発生する。

【0184】

コントローラ28は、チャネルセレクタ26から供給された制御信号に基づき、所望チャネルの信号光を選択するために、位相共役光発生器6(#k)におけるポンプ光の波長及び光フィルタ20(#k)の特性の少なくとも一方を制御する。

【0185】

次に、本発明の有効性を確認するために実施した実証実験の結果について説明する。

【0186】

図28を参照すると、実証実験で用いられたシステムのブロック図が示されている。このシステムは実質的に図11の第6実施形態に対応している。

【0187】

送信機(Transmitter)は図11の送信機2に対応し、ファイバ補償器(Fiber compensator)は図11の第1の光ファイバSMF1に対応し、位相共役光発生器(Phase conjugator)は図11の位相共役光発生器6に対応し、分散シフトファイバ(DSF-1, 2, ..., 46)及びエルビウムドープファイバ増幅器(EDFA1, 2, ..., 45)は図11の第2の光ファイバSMF2に対応し、受信機(Receiver)は図11の受信機4に対応している。

【0188】

送信機における光源としては、3電極 / 4シフト型のDFB-LD(分布帰還型レーザダイオード)が二つ用いられた。時分割多重された20Gb/sの信号光 E_s (波長 $\lambda_s = 1551\text{nm}$)が、約40psのパルス幅(FWHM)を有する10Gb/sの2チャンネルのRZ信号を時分割多重することによって生成された。

【0189】

10Gb/sのRZパルスを生成するために、第1のLiNbO₃変調器(LN-1)を用いて10-GHzの正弦波により E_s を強度変調し、次いで第2のLiNbO₃変調器(LN-2)を用いて10Gb/sのNRZデータ信号(PN: 223-1)によって強度変調を行った。

【0190】

変調された E_s はパワーP1で二段のDD-DCF1, 2に入力され、これにより波形が予め補償された。

【0191】

ここで、「DD-DCF」は分散漸減型の分散補償ファイバ(dispersion-decreasing dispersion-compensating fiber: DD-DCF)を表している。

【0192】

DD-DCFの各々は5本のDCFを互いにスプライスして構成される。DD-DCFの各々の損失は0.46dB/kmであり、DCFの各々のモードフィールド径は約4 μm に設定された。

【0193】

(14)式の条件を近似的に満足するために、分散パラメータ D_1 はDCFの各々における平均光パワーの減少に従って減少すべきである。そのために、5本のDCFの各々の長さ及び D_1 は、表に示されるように設定された。

【0194】

10

20

30

40

【表 1】

DCF	長さ (km)	D_1 (ps/nm/km)
a	2.8	-80.6
b	2.7	-57.9
c	2.8	-43.7
d	2.7	-32.1
e	2.7	-27.0

10

【0195】

DD - DCFの各々の長さは13.7 kmであり、各々の総分散は - 662.8 ps/nmであった。

【0196】

なお、DD - DCFの各々に入力する光のパワーを P_1 に設定するために、二つの光増幅器がカスケード接続された。

20

【0197】

次いで、位相共役光発生器が、20 kmのDSFにおける波長 $\lambda_p = 1554$ nmのポンプ光 E_p を用いた非縮退型のフォワードFWMによって、予め補償された(歪を与えられた) E_s をこれと同方向に伝搬する位相共役光 E_c (波長 $\lambda_c = 1557$ nm)に変換した。 E_s から E_c への変換効率は - 12 dBであった。

【0198】

次いで、位相共役光 E_c は、カスケード接続された46本のDSF(0.21 dB/km損失)及びこれらの中に設けられる45個のEDFA(各々の雑音指数は約6 dB)からなる3036 kmの伝送路へ供給された。

30

【0199】

この伝送路の λ_c における平均分散はマイナス0.44 ps/nm/kmであった。従って、二段のDD - DCFにおける総分散と上記伝送路における総分散との間の差は約10 ps/mであった。

【0200】

各DSFの長さは66 kmであり、各DSFへの光入力パワー P_2 は+6 dBmに設定された。

【0201】

P_1 の最適値は上述の条件では+16 dBmであった。DD - DCFの非線形定数は約 $18.0 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ であると見積もられた。

40

【0202】

誘導ブリュアン散乱(SBS)を抑圧するために、 E_s 及び E_p はそれぞれ500 - kHz及び150 - kHzの正弦波信号により周波数変調された。受信機では、第3のLiNbO₃変調器(LN-3)及びフェイズロックループ(PLL)を用いることによって E_c は時分割デマルチプレキシングされ、ビットエラーレート(BER)が測定された。

【0203】

比較のため、一つのDD - DCF及び23本のDSFを用いた1518 kmの伝送実験も行われた。

【0204】

図29に測定されたBERの特性を示す。3036 kmの伝送の後であっても、 10^{-9}

50

より小さいBERで信号の検出を行うことができた。 10^{-9} のBERにおける4.8dBのパワーペナルティは、EDFAの雑音等の理論値からのS/N劣化によるものであった。この実験では λ_c は各EDFAにおけるゲインピークを与える波長 $\lambda_0 = 1558.5$ nmから1.5nmほど離調していた。もし λ_c を λ_0 に一致させることができれば、より高いS/N特性を得ることができる。1518kmの伝送実験では、ペナルティは約1.2dBであった。

【0205】

図30の(a)~(e)に3036km伝送実験における検出された波形の変化の様子を示す。(a)は送信機の出力波形、(b)は位相共役光発生器の出力波形、(c)は1518km伝送後の波形、(d)は2706km伝送後の波形、(e)は3036km伝送後の波形をそれぞれ示している。予めひずめられた波形がECの伝搬に伴って次第に改善されていることが判る。(e)における波形歪みの残留は、不完全な補償条件によるものであった。即ち、この実証実験では、EDFAの間隔(DSFの長さ; 66km)が $(\lambda_2 P_2)^{-1}$ で定義される非線形長よりも十分に短くないことにより、波形の改善が完全でなかったものである。

10

【0206】

従って、本発明では、光増幅器を複数用いる場合には、これらの間隔を非線形長よりも短く設定することが望ましい。

【0207】

また、DD-DCFにおけるDCFの分割数を実験における5よりも大きくすることによって、補償を更に改善することができる。

20

【0208】

図31の(A)、(B)及び(C)を参照すると、図28のシステムにおける光パワーP、分散 β_2 及び非線形効果 P/β_2 のダイアグラムが示されている。位相共役光発生器の位置が原点Oである。

【0209】

図面の明瞭さを確保するために、距離を示す各横軸の尺度が原点の左側と右側とで異なっている点に留意されたい。

【0210】

図31の(C)から、非線形効果 P/β_2 が位相共役光発生器の上流側及び下流側で実質的に一定の同じ値となっており、本発明が限定的に適用されていることがわかる。

30

【0211】

図32を参照すると、図1の基本構成に分散補償器(DC)30が付加された構成が示されている。図示された例では、分散補償器30は第2の光ファイバSMF2の途中に挿入されているが、この例に限定されることなく、分散補償器30は、第1の光ファイバSMF1、位相共役光発生器6及び第2の光ファイバSMF2を含む光路上に設けられていればよい。

【0212】

図33の(A)及び(B)を参照して、分散補償器30を付加したことによる伝送距離の拡大を説明する。図33の(A)及び(B)の各々において、横軸は距離を表し、縦軸は分散パラメータの距離に関する積分 $(-\int D dz)$ を表している。

40

【0213】

本発明が限定的に適用される場合、第1の光ファイバSMF1の総分散と第2の光ファイバSMF2の総分散は、図33の(A)に示されるように実質的に等しい。

【0214】

分散補償器30の分散値の符号は、第1及び第2の光ファイバの分散値の符号と逆に設定される。従って、図32に示されるように分散補償器30が第2の光ファイバSMF2の途中、例えば中点に設けられる場合には、図33の(B)に示されるように、第2の光ファイバSMF2の距離 L_2 は L_2 に拡大される。

【0215】

50

分散補償器 30 としては、分散補償ファイバを用いることができる。第 1 及び第 2 の光ファイバ S M F 1 及び S M F 2 が正常分散値を有しており、信号光の波長が $1.55 \mu\text{m}$ 帯にある場合には、分散補償器 30 としては、波長 $1.3 \mu\text{m}$ の近傍で零分散を与える分散補償ファイバであることが望ましい。

【0216】

今、分散補償ファイバの単位長さ当たりの分散が $-D_3$ 、長さが l_3 であるとし、分散補償の程度を表す値 $m = D_3 l_3 / D_2 L_2$ ($0 < m < 1$) を導入する。この場合、第 2 の光ファイバ S M F 2 の総分散は $D_2 L_2 - D_3 l_3$ である。

【0217】

第 1 の光ファイバ S M F 1 の総分散は $D_1 L_1$ であり、分散補償の条件は $D_1 L_1 = D_2 L_2 - D_3 l_3$ であるから、 L_2 は次式で与えられる。

【0218】

$$L_2 = L_2 (1 + m) = D_1 L_1 (1 + m) / D_2$$

非線形効果についても同時に補償する場合には、第 1 の光ファイバ S M F 1 への光入力パワー P_1 を実質的に $P_1 (1 + m)$ に等しくしておくといよい。

【0219】

分散補償器 30 の分散値の最適化及び第 1 の光ファイバ S M F 1 への入力光パワーの最適化は、例えば、受信機 4 における伝送情報の再生品質が最良になるようにして行うことができる。

【0220】

分散補償器 30 として、図示はしないが複数の分散補償器 30 j を用いることができる。各分散補償器 30 j は伝送路 (S M F 1, 2) の分散値と逆符号の分散値 $-D_{3j}$ (j は自然数) を有している。この場合、 L_2 は次式で与えられる。

【0221】

$$L_2 = L_2 (1 + m_j) = D_1 L_1 (1 + m_j) / D_2$$

ここで、 $m_j = D_{3j} l_{3j} / D_2 L_2$ であり、 l_{3j} は分散補償器 30 j の各々の長さである。

【0222】

前述の実証実験の結果から明らかなように、第 1 の光ファイバ S M F 1 においてのみ補償条件を満足していれば、第 2 の光ファイバ S M F 2 の分散が一定であっても補償が可能である。この場合に第 2 の光ファイバ S M F 2 における光増幅器の中継間隔を非線形長よりも短く設定しておくことによって良好な補償が可能になることは前述した通りである。

【0223】

図 3 2 の構成は、この原理に基づいて分散補償器 30 により補償可能な伝送距離を長くしたものである。

【0224】

図 3 2 の構成による効果は特に海底伝送のような数千キロメートルにも及ぶ長距離伝送において顕著である。その理由を説明する。

【0225】

位相共役光発生器を用いた補償においては、その前後のファイバ内の波形歪みを同じにする必要がある。このため、最も波形がひずんでいるのは、位相共役光発生器の直前及び直後においてである。従って、位相共役光発生器においては最もスペクトルが広がった状態になっている。

【0226】

一方、位相共役光発生器及び光増幅器からは雑音が付加され、この雑音による S / N 劣化はスペクトルが広いほど大きい。従って位相共役光発生器の直前及び直後でのスペクトル広がりが少なくなるようにシステムを設計することは、伝送距離を延ばす上で非常に有効である。

【0227】

この意味において、伝送路の分散値を小さくすることは有効である。例えば、図 3 2 の

10

20

30

40

50

構成において、送信機 2、第 1 の光ファイバ S M F 1 及び位相共役光発生器 6 が送信局に設けられ、第 2 の光ファイバ S M F 2 が伝送路として使用される場合には、 $m = 0.5$ としておく。つまり、分散補償器 30 により伝送路分散の半分を補償するのである。これにより、同じ長さの伝送路を補償するのに要する D D - D C F の分散値、或いは数を削減可能である。

【 0 2 2 8 】

この場合、 $L_2 = 2 \times L_1$ となり、分散補償器 30 を用いない場合におけるものの 2 倍の長さの伝送路を同じ第 1 の光ファイバ S M F 1 で補償することができることになる。逆言すれば、同じ長さの伝送路の補償に要する第 1 の光ファイバ S M F 1 の長さが半分になるので、波形歪みを半減することができる。また、D D - D C F の数も少なくすることができる。

10

【 0 2 2 9 】

図 3 4 を参照すると、ファイバグレーティング F G を用いた分散補償器の構成が示されている。図 3 4 の分散補償器は図 3 2 の分散補償器 30 として用いることができる。

【 0 2 3 0 】

光パルスの両縁の波長がそれぞれ λ_1 及び λ_2 である光パルスが光サーキュレータ O C を通ってファイバグレーティング F G へ供給される。ファイバグレーティング F G のグレーティングピッチは予め定められた分布を有しており、波長 λ_1 の光は光サーキュレータ O C に比較的近い位置でブラッグ反射され、波長 λ_2 の光は比較的遠い位置でブラッグ反射される。これにより光パルスの圧縮が行われ、ファイバグレーティングからのブラッグ反射光を光サーキュレータ O C を介して取り出すことによって、分散補償を行うことができる。

20

【 0 2 3 1 】

図 3 2 の分散補償器 30 を例えば図 6 の第 2 実施形態のように第 2 の光ファイバ S M F 2 の途中に光増幅器 A - j (j は自然数) が設けられているシステムに適用する場合には、分散補償器 30 を光増幅器 A - j の直前に配置するのが望ましい。これは、分散補償器 30 が分散補償ファイバである場合に分散補償ファイバへの入力光パワーが小さいほど分散補償ファイバにおける非線形効果を小さくすることができるからである。

【 0 2 3 2 】

図 1 5 の第 9 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は、光ファイバ S M F 1、光ファイバ S M F 2 又は光ファイバ S M F 3 - 1, 2, ..., N の途中に設けられる。

30

【 0 2 3 3 】

図 1 7 の第 1 0 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は、光ファイバ S M F 1 1, 1 2, ..., 1 N 又は光ファイバ S M F 2 の途中に設けられる。

【 0 2 3 4 】

図 1 8 の第 1 1 実施形態又は図 1 9 の第 1 2 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は偏波保持ファイバ S M F 1 (P M F) 又は光ファイバ S M F 2 の途中に設けられる。

【 0 2 3 5 】

図 2 3 の第 1 5 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は、光ファイバ S M F 1 1, 1 2, ..., 1 N 又は光ファイバ S M F 2 1, 2 2, ..., 2 N の途中に設けられる。

40

【 0 2 3 6 】

図 2 4 の第 1 6 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は、光ファイバ S M F 1 又は光ファイバ S M F 2 1, 2 2, ..., 2 N の途中に設けられる。

【 0 2 3 7 】

図 2 5 の第 1 7 実施形態に分散補償器 30 を適用する場合には、分散補償器 30 は、光ファイバ S M F 1 1, 1 2, ..., 1 N 又は光ファイバ S M F 2 1, 2 2, ..., 2 M の途中に設けられる。

50

【図面の簡単な説明】

【0238】

【図1】本発明の基本構成を示す図である。

【図2】位相共役光発生器の例を示すブロック図である。

【図3】位相共役光発生器の他の例を示すブロック図である。

【図4】本発明の原理説明図である。

【図5】本発明の第1実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図6】本発明の第2実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図7】本発明の第3実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図8】本発明の第4実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

10

【図9】本発明の第5実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図10】2つのファイバの零分散波長に対する各光の周波数配置を示す図である。

【図11】本発明の第6実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図12】平均強度の方法において分散を制御する例を示す図である。

【図13】本発明の第7実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図14】本発明の第8実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図15】本発明の第9実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図16】本発明の第9実施形態における周波数配置を示す図である。

【図17】本発明の第10実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図18】本発明の第11実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

20

【図19】本発明の第12実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図20】位相共役光発生器の更に他の例を示すブロック図である。

【図21】本発明の第13実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図22】本発明の第14実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図23】本発明の第15実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図24】本発明の第16実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図25】本発明の第17実施形態を示す光ファイバ通信システムの構成図である。

【図26】チャンネルセレクタの例を示す図である。

【図27】チャンネルセレクタの他の例を示す図である。

【図28】実証実験で用いたシステムのブロック図である。

30

【図29】図28のシステムにおけるBER（ビットエラーレート）特性を示す図である。

【図30】図28のシステムにおける波形の変化を示す図である。

【図31】図28のシステムにおけるパワー等のダイヤグラムを示す図である。

【図32】分散補償器を付加した構成を示す図である。

【図33】図32における伝送距離の拡大を説明するための図である。

【図34】ファイバグレーティングを用いた分散補償器を示す図である。

【符号の説明】

【0239】

2 送信機

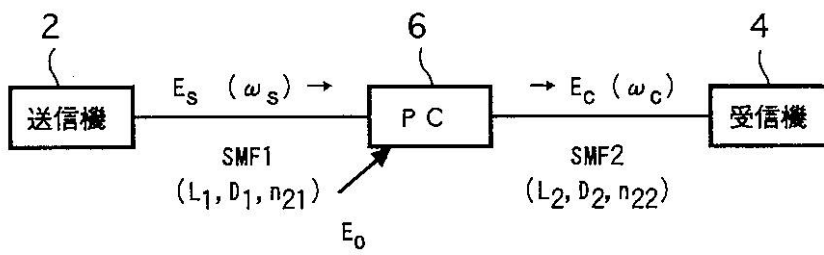
40

4 受信機

6 位相共役光発生器

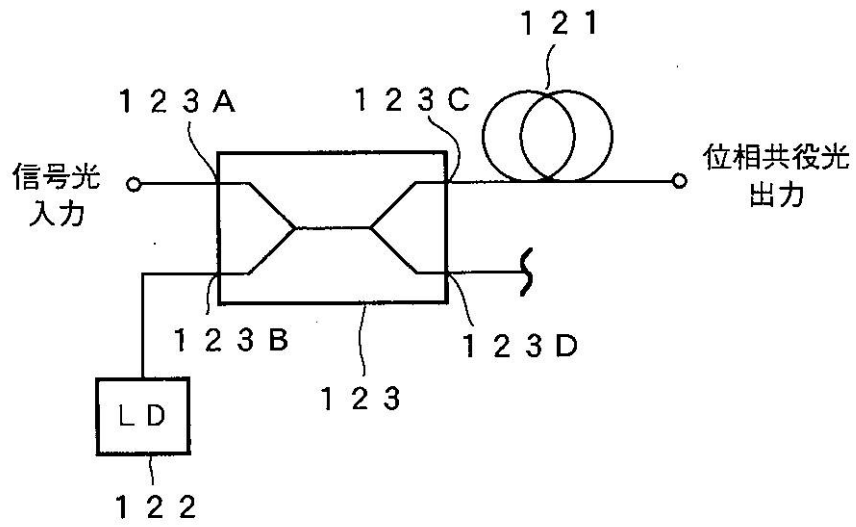
【 図 1 】

本発明の基本構成を示す図



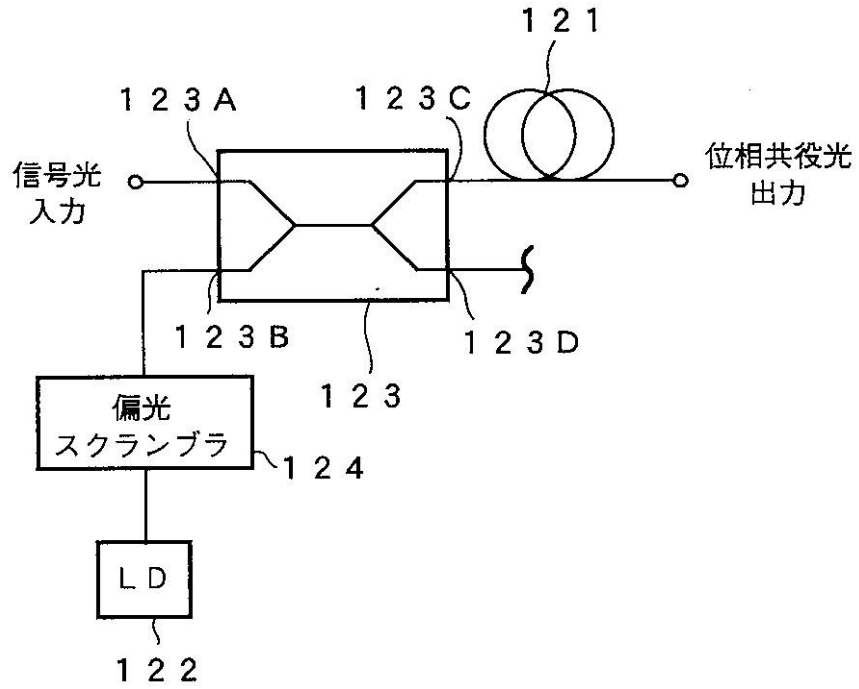
【 図 2 】

位相共役光発生器の例を示すブロック図



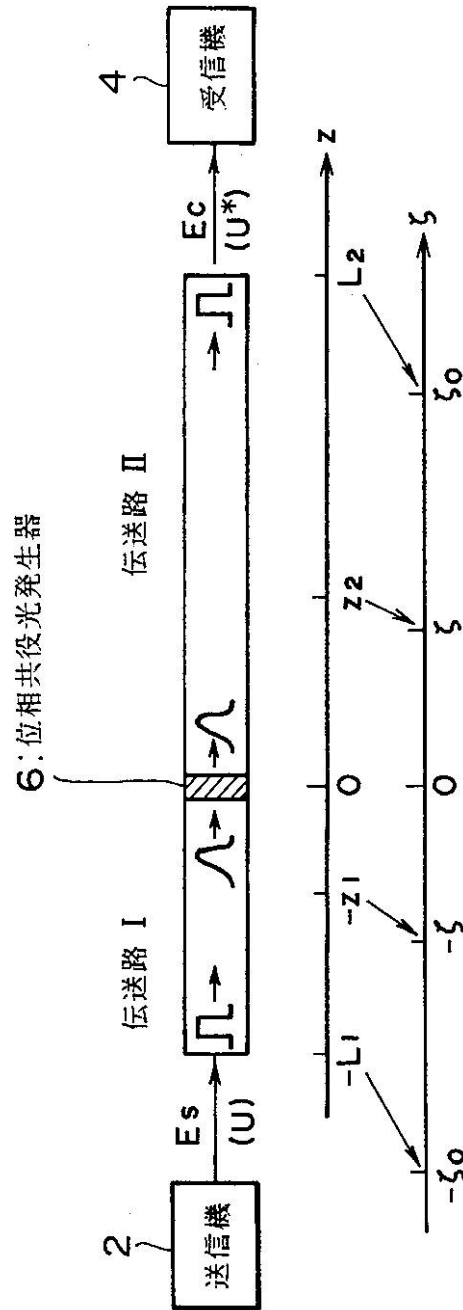
【 図 3 】

位相共役光発生器の他の例を示すブロック図



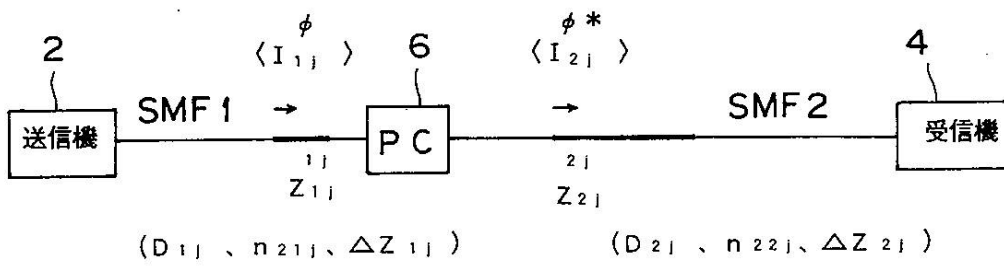
【 図 4 】

本発明の原理説明図



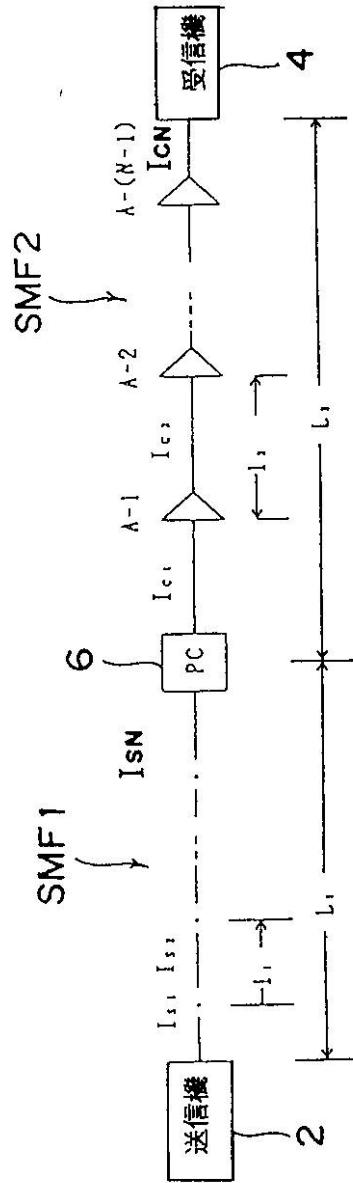
【 図 5 】

第 1 実施形態を示す図



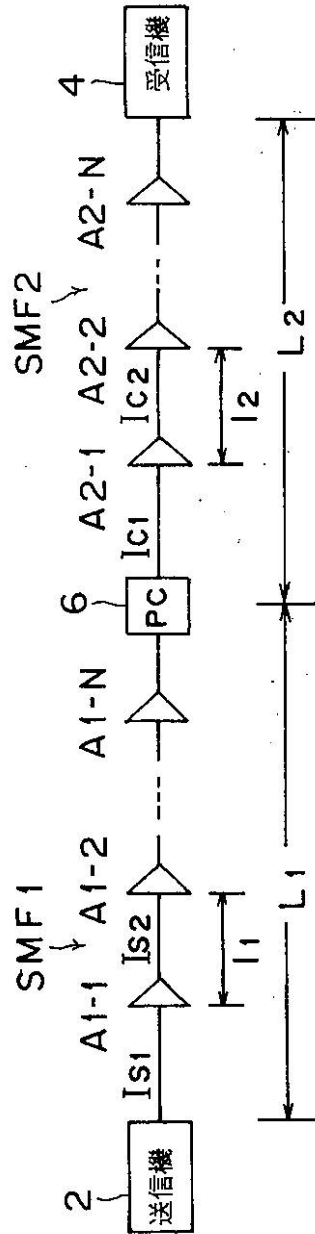
【 図 6 】

第2 実施形態を示す図



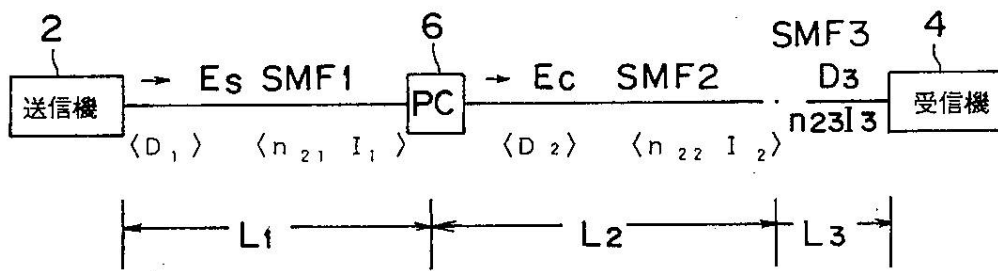
【 図 7 】

第3実施形態を示す図



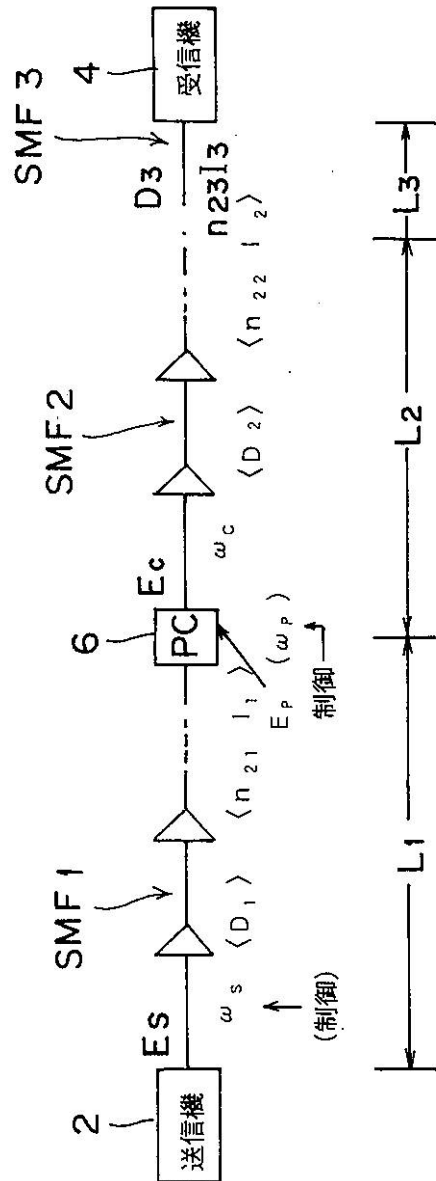
【 図 8 】

第 4 実施形態を示す図



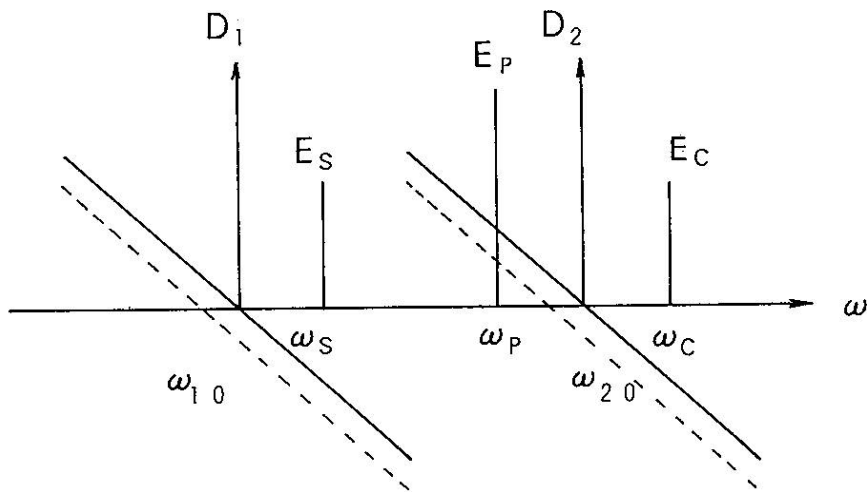
【 図 9 】

第5 実施形態を示す図



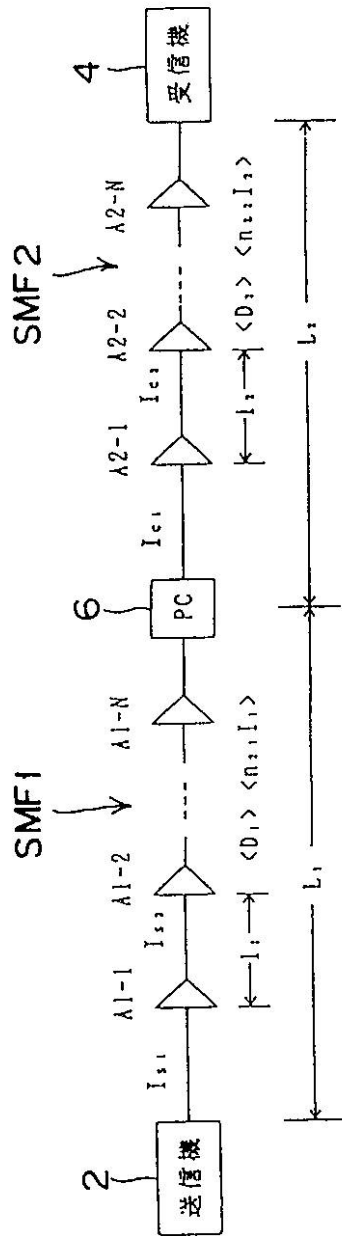
【 図 1 0 】

2つのファイバの零分散波長に対する
各光の周波数配置を示す図



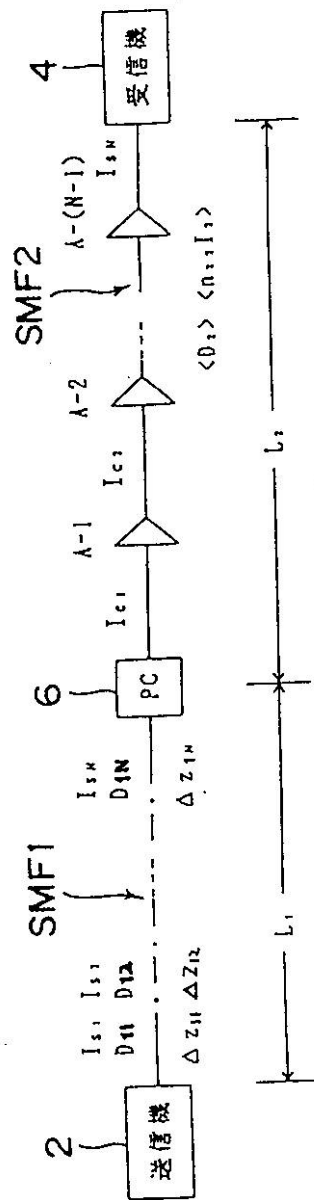
【図11】

第6実施形態を示す図



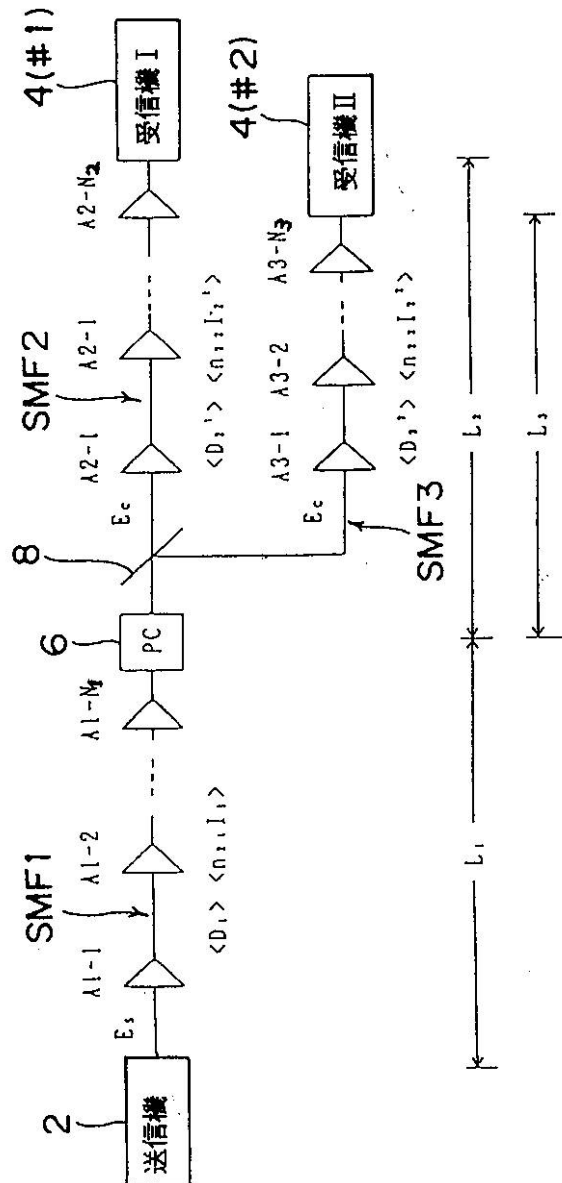
【 図 1 3 】

第7実施形態を示す図



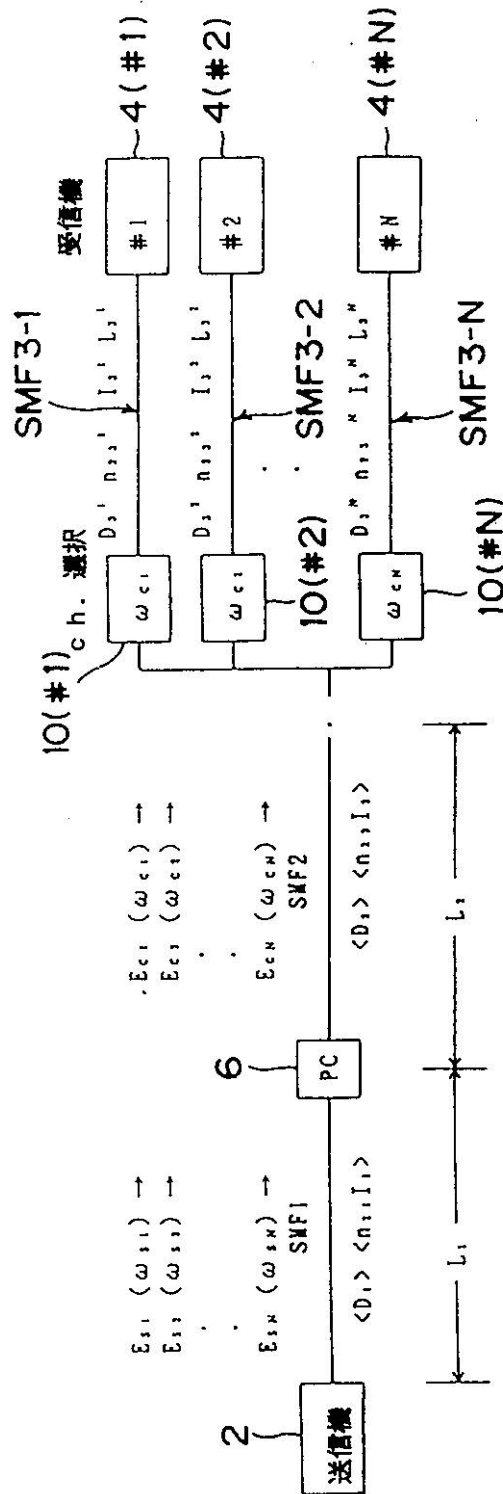
【 図 1 4 】

第8実施形態を示す図



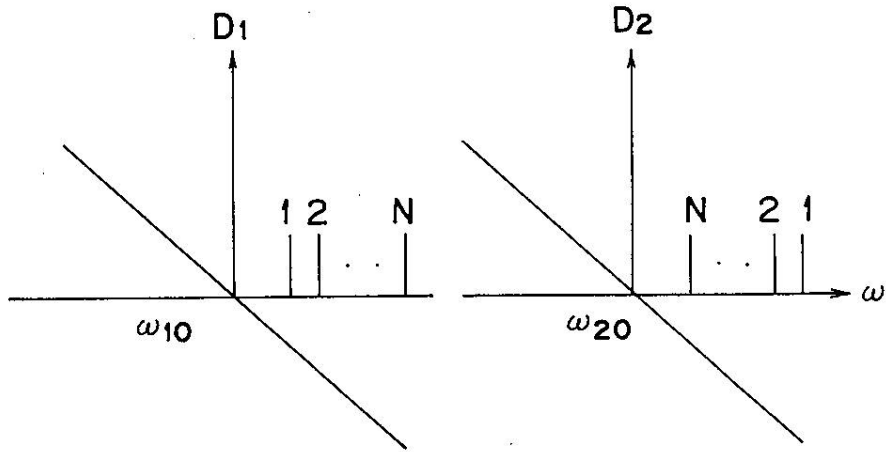
【 図 1 5 】

第9実施形態を示す図



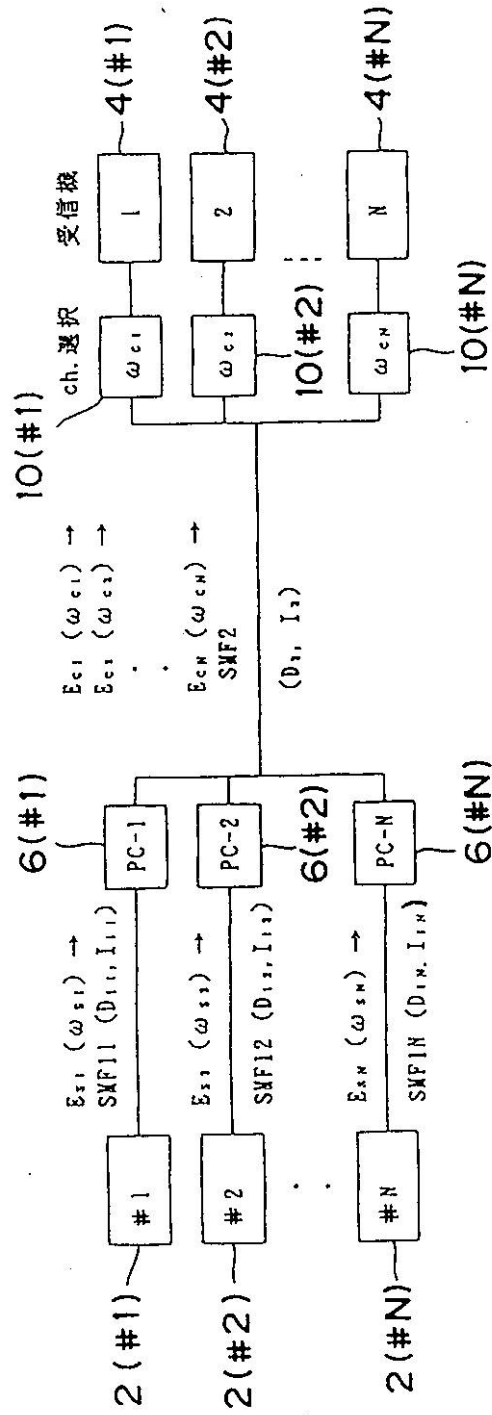
【 図 1 6 】

第 9 実施形態における周波数配置を示す図



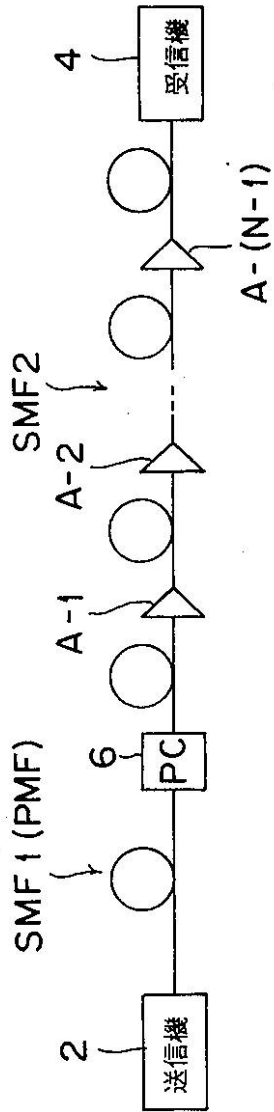
【 図 1 7 】

第10実施形態を示す図



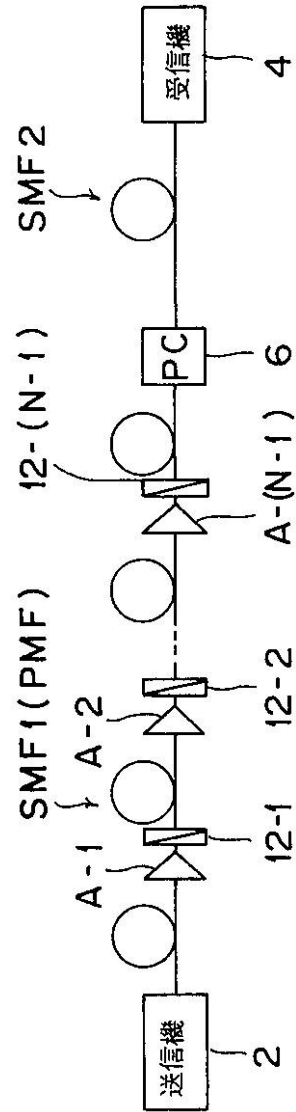
【 図 1 8 】

第11実施形態を示す図



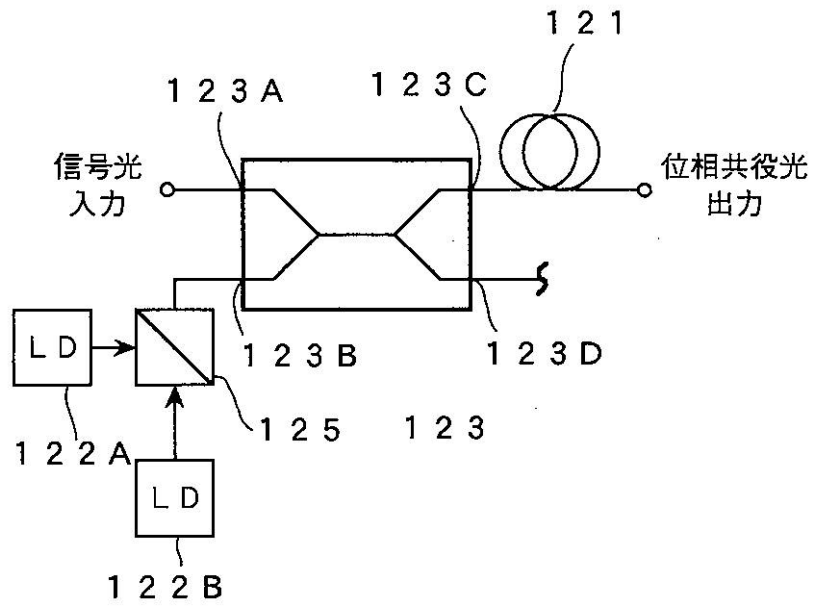
【 図 1 9 】

第12実施形態を示す図



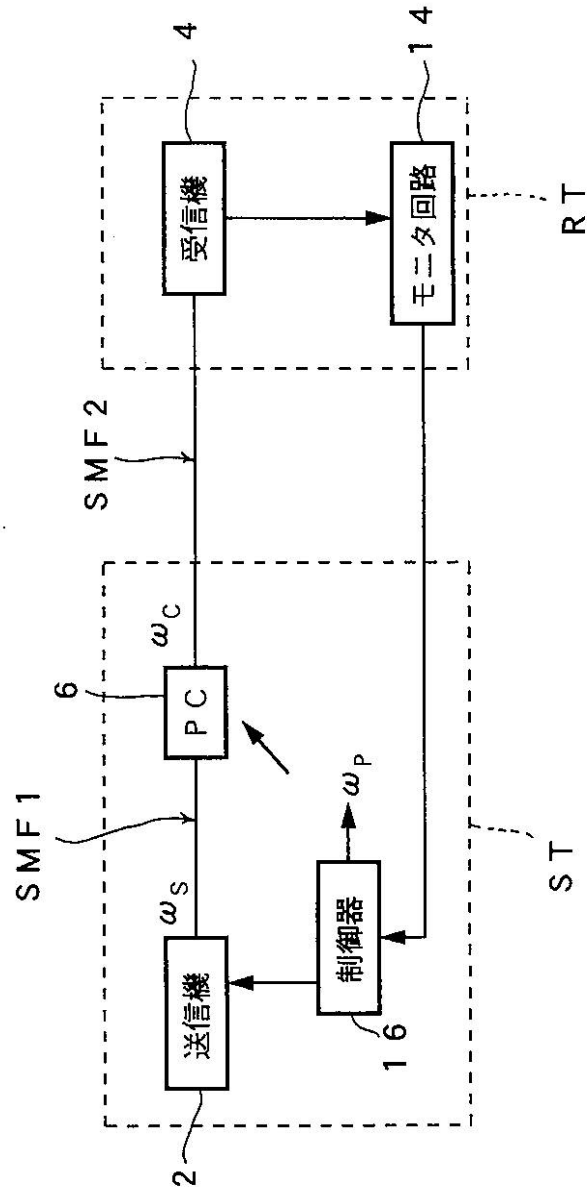
【 図 2 0 】

位相共役光発生器の更に他の例を示す図



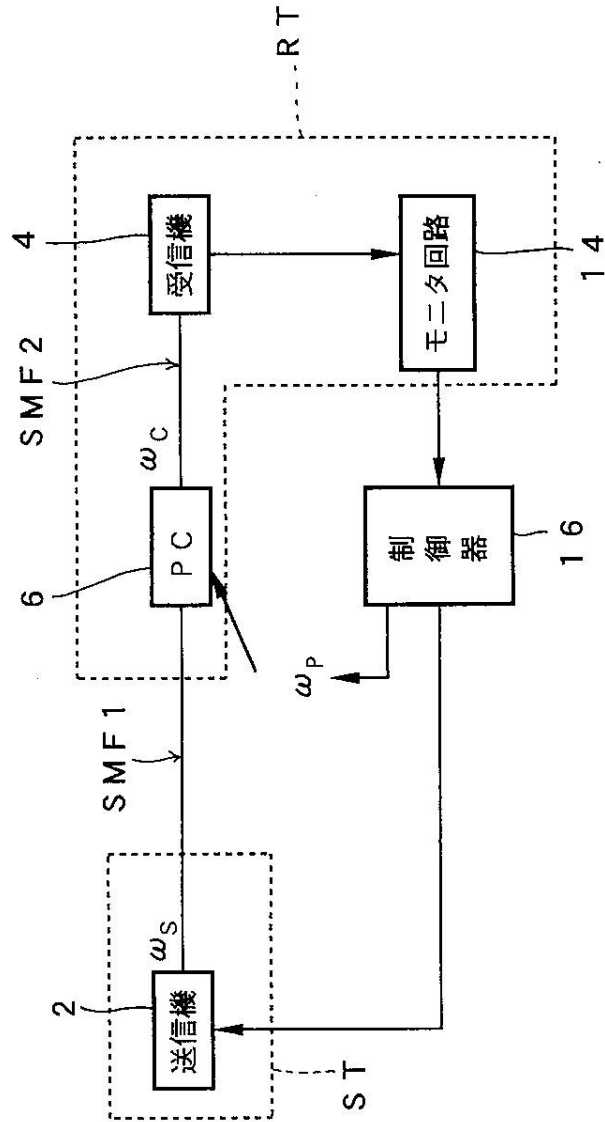
【 図 2 1 】

第 1 3 実施形態を示す図



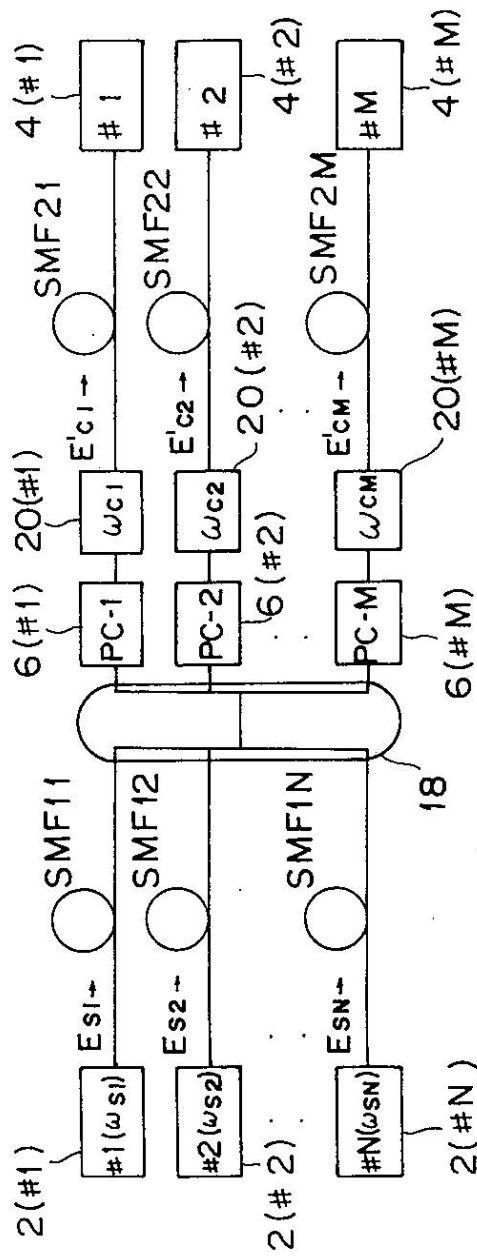
【 図 2 2 】

第 1 4 実施形態を示す図



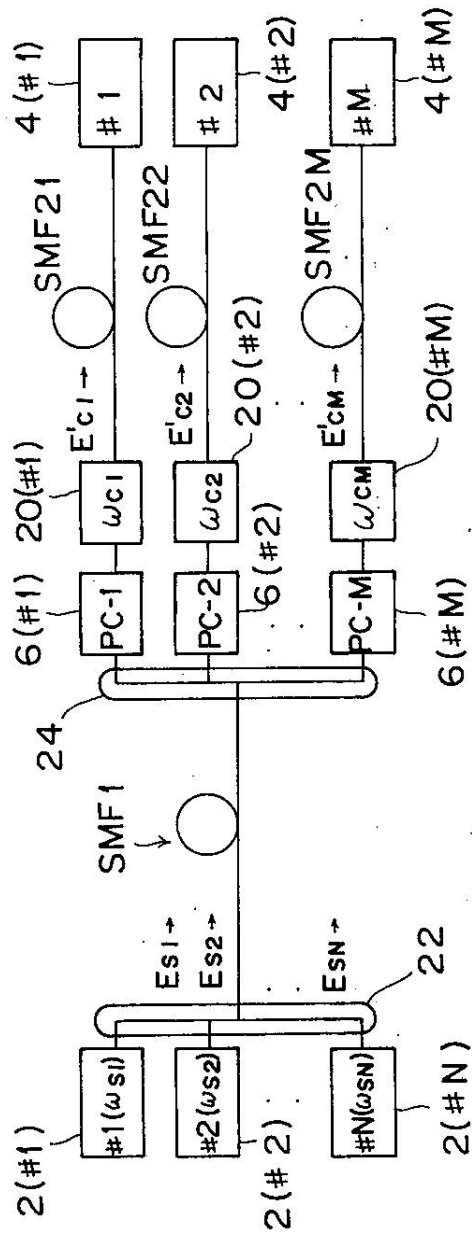
【 図 2 3 】

第15実施形態を示す図



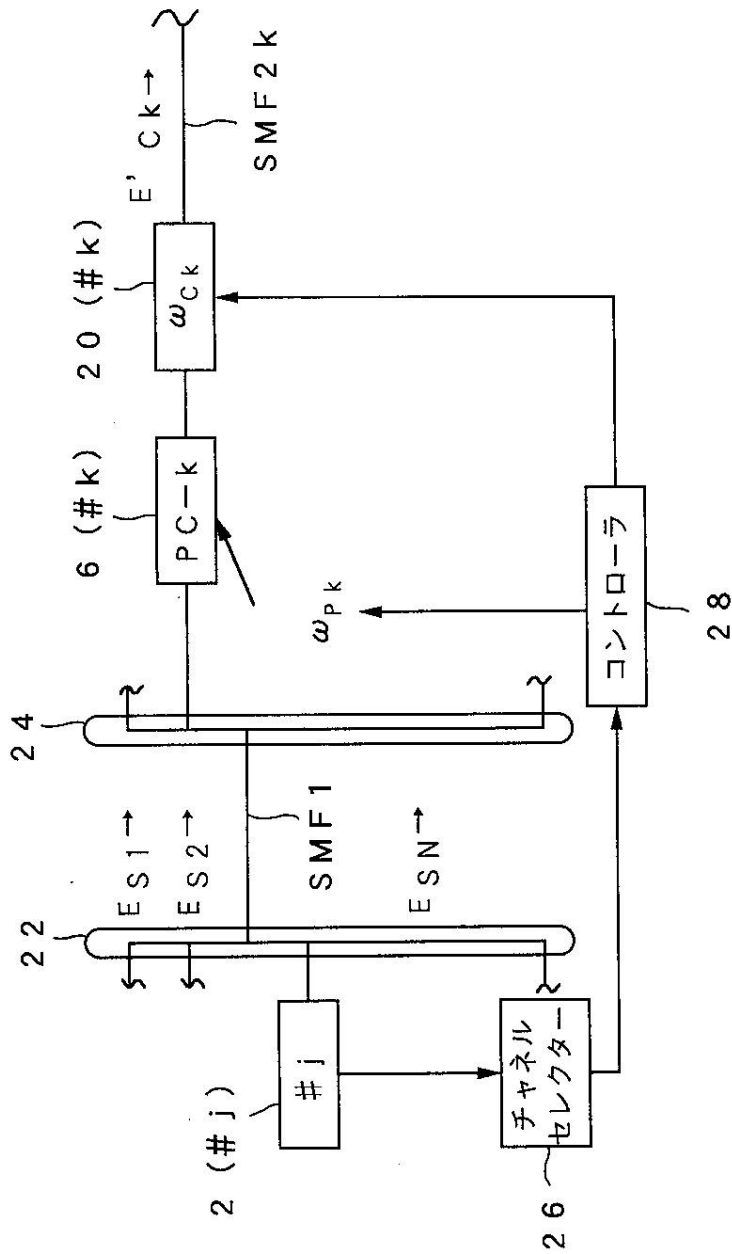
【 図 2 4 】

第16実施形態を示す図



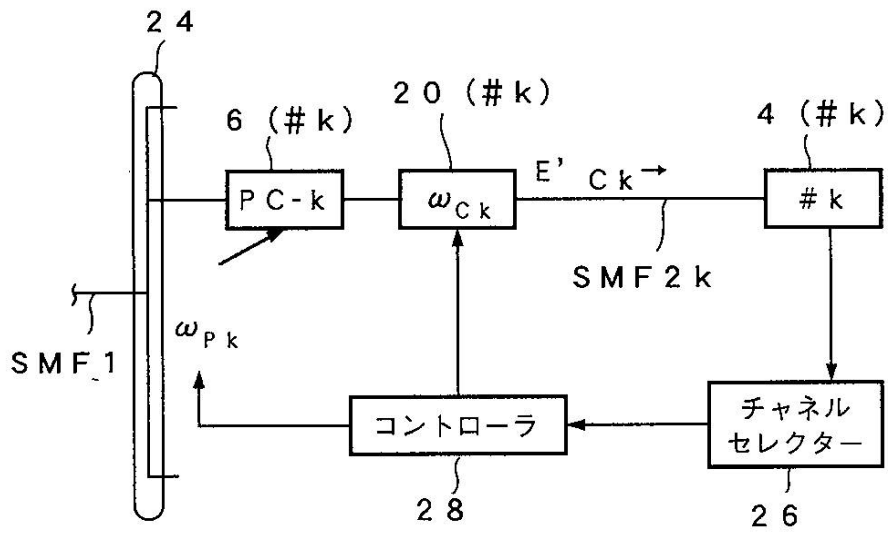
【 図 2 6 】

チャンネルセレクターの例を示す図



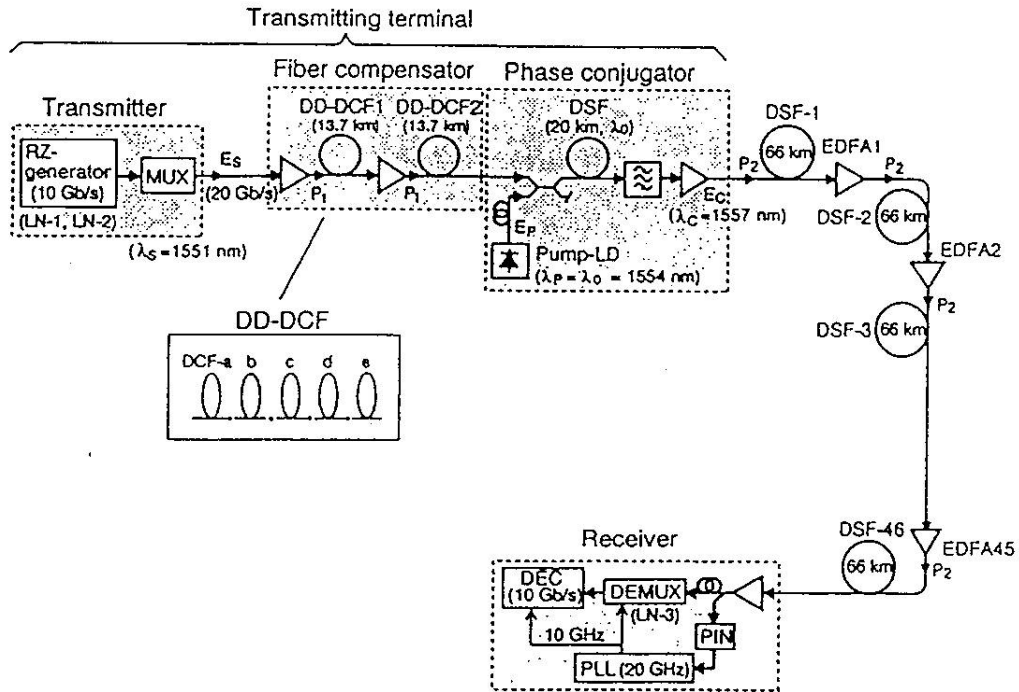
【図 27】

チャンネルセレクターの他の例を示す図



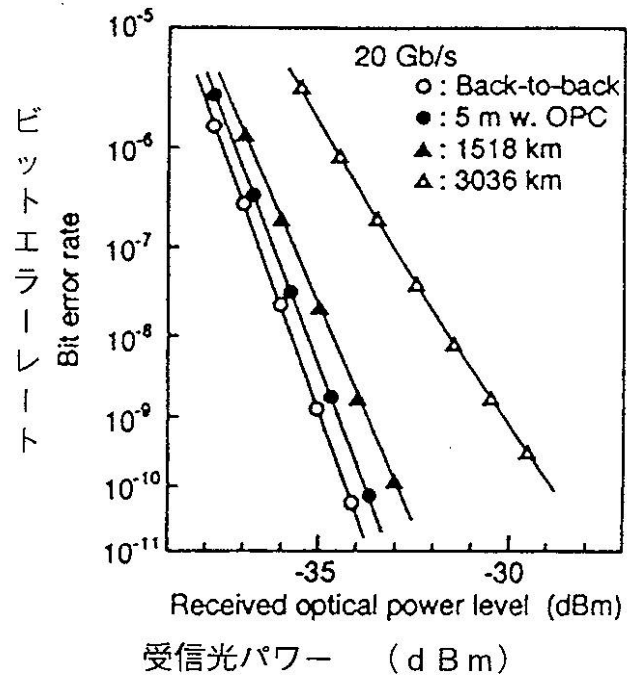
【 図 2 8 】

実証実験で用いたシステムのブロック図



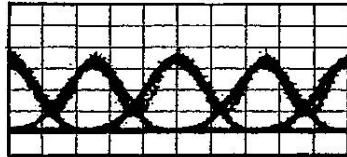
【 図 2 9 】

BER特性を示す図

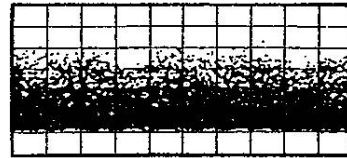


【 図 3 0 】

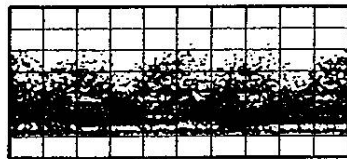
波形の変化を示す図



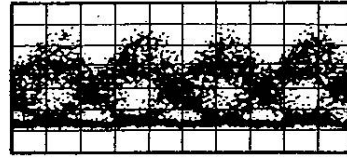
(a)



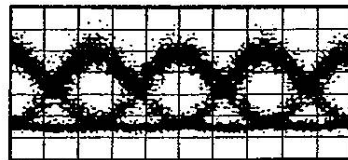
(b)



(c)



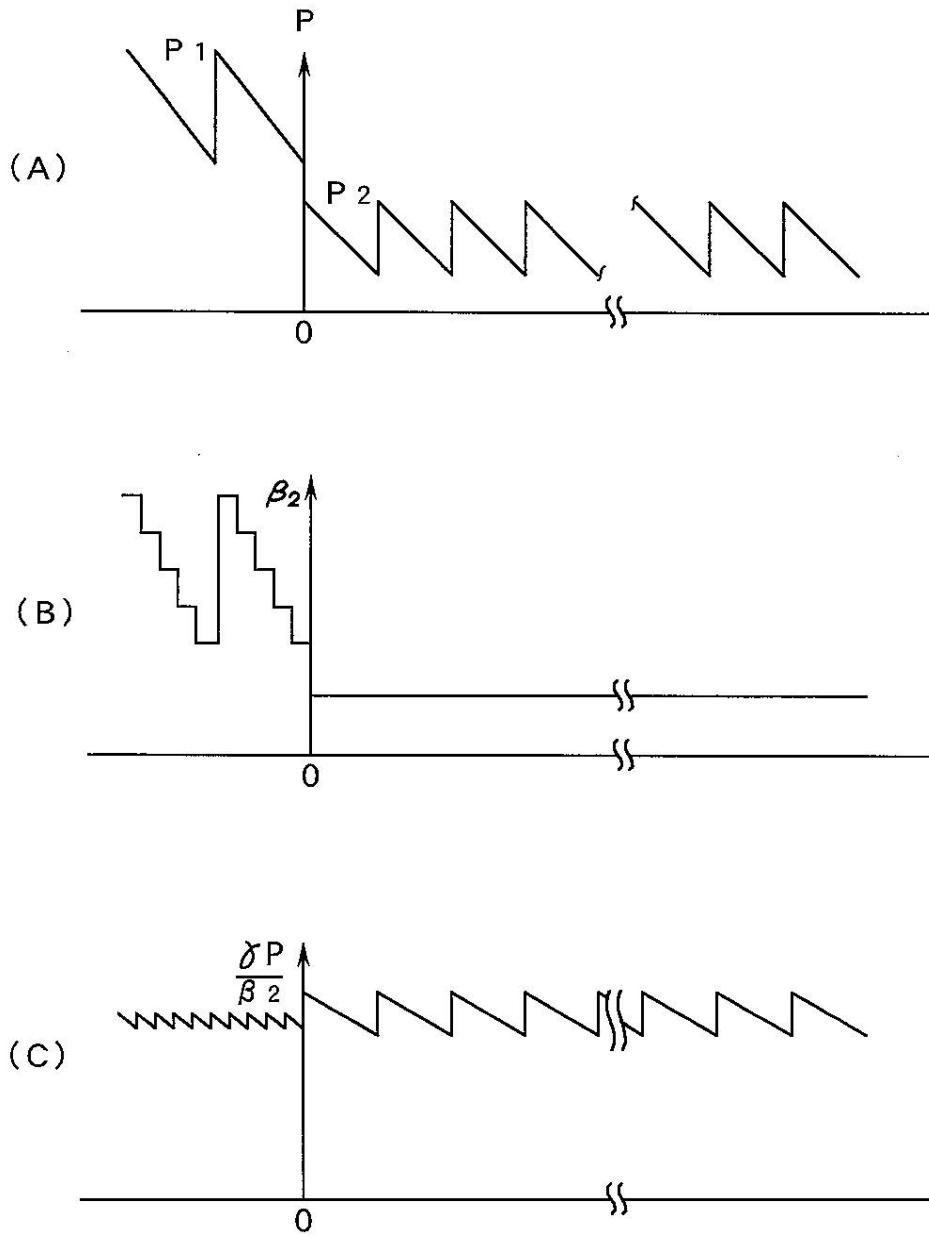
(d)



(e)

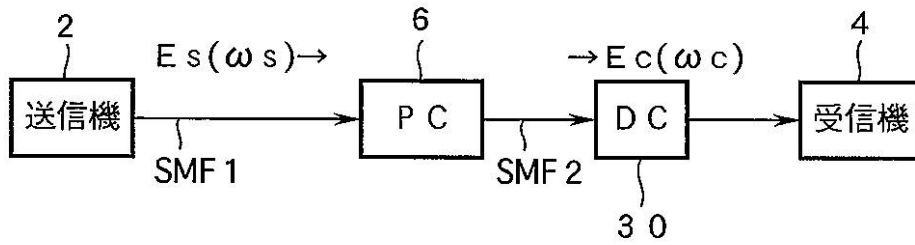
【 図 3 1 】

パワー等のダイヤグラムを示す図



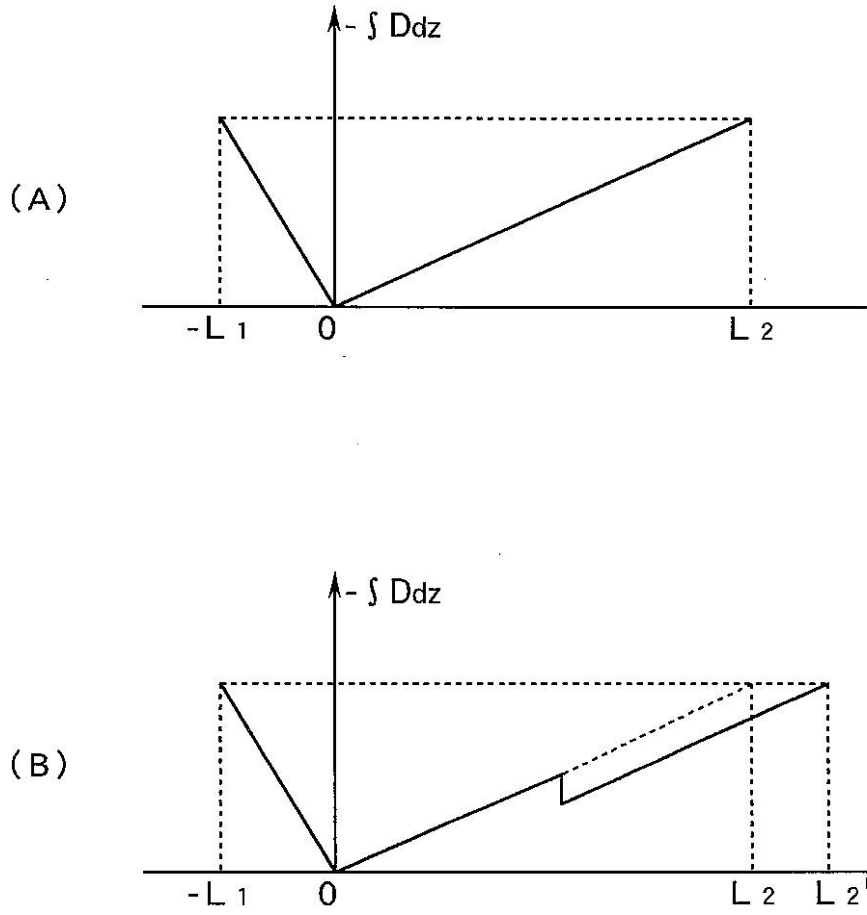
【 図 3 2 】

分散補償器 (DC) を付加した構成を示す図



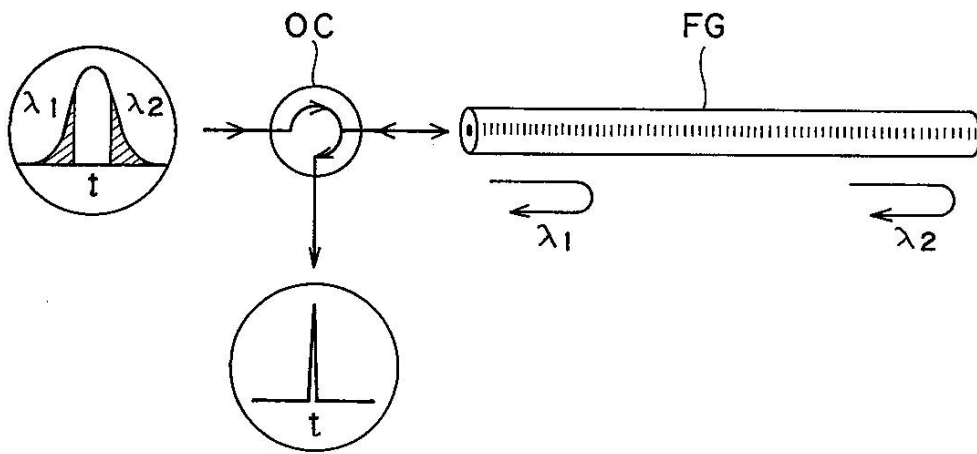
【 図 3 3 】

図 3 2 における伝送距離の拡大を説明するための図



【 図 3 4 】

ファイバグレーティングを用いた
分散補償器を示す図



フロントページの続き

(51) Int.Cl. F I

H 0 4 B 10/13 (2006.01)

H 0 4 B 10/135 (2006.01)

H 0 4 B 10/14 (2006.01)

G 0 2 F 1/365 (2006.01)

(56) 参考文献 特開平 7 - 3 0 1 8 3 0 (J P , A)
特開平 6 - 2 1 6 4 6 7 (J P , A)
特開平 7 - 3 1 2 5 7 4 (J P , A)
特開平 7 - 1 6 8 2 2 0 (J P , A)
特開平 7 - 1 5 4 3 2 4 (J P , A)
特開平 7 - 9 8 4 6 4 (J P , A)
国際公開第 9 4 / 0 2 4 7 8 1 (W O , A 1)

(58) 調査した分野(Int.Cl. , DB名)

G 0 2 F 1 / 3 5 - 1 / 3 9

H 0 4 B 1 0 / 0 0 - 1 0 / 2 8

H 0 4 J 1 4 / 0 0 - 1 4 / 0 8