位相共役光ファイバ通信システム

菊池 和朗*

(1996年4月8日 受理)

Optical Fiber Communication System
Using Optical Phase Conjugation

Kazuro KIKUCHI*

(Received April 8, 1996)

In a long-distance optical amplifier chain, the waveform distortion is induced both by the Kerr nonlinearity and the group-velocity dispersion of optical fibers. To cope with this problem, the optical communication system using mid-span optical phase conjugation has been proposed and experimented with. In this paper, after reviewing the methods for combating with such waveform distortion, we describe the principle of the system using optical phase conjugation. The proper design for the amplifier spacing and the dispersion value of transmission fibers is necessary to improve the distortion compensation efficiency. Some examples of system design are shown, and the feasibility of practical optical phase conjugators is briefly discussed.

Key Words: Optical fiber communications, Optical phase conjugation, Optical parametric effect, Group-velocity dispersion, Kerr effect

1. はじめに

エルビウムドープ光ファイバ増幅器(Erbium-Doped Optical Fiber Amplifier: EDFA)を直接光中継器として用いた、長距離光ファイバ伝送システムが実用化されつつある。このような光増幅中継系では、中継器間におけるファイバの損失が増幅器の利得により繰り返し補償されるため、S/N比の劣化による伝送距離制限は大幅に緩和さ

れる。しかしそれにかわって、光ファイバの3次非線形光学効果(カー効果)による伝送波形歪が伝送距離を制限する要素となってきた。

光ファイバの非線形性が無視できる場合には、光ファイバ伝送路の群速度分散の総量が0であれば伝送波形歪は生じない。しかし長距離の光増幅中継系では信号光パワーが光ファイバ全長にわたって高いレベルに維持されるため、光ファイバのカー効果が無視できなくなる。カー

* 東京大学工学系研究科電子工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

* Department of Electronic Engineering, University of Tokyo (7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

効果による波形歪を補償する方法として、これまで3つの提案がなされている。第一は分散マネジメント法である¹⁾。この方法は、伝送用光ファイバの総分散を0に保ったまま分散分布を長手方向に変化させ、分散の効果により非線形効果を減殺する手法である。第二は光ソリトン伝送方式である²⁾。この方式では、ソリトン光パルスを用いることにより分散による波形歪と非線形効果による波形歪を釣り合わせる。この釣合をシステム全長にわたって維持できれば、安定な光パルス伝送が可能となる。第三は本論文で述べる位相共役を用いた光通信システムである^{3,4)}。光増幅中継伝送路の midpoint で信号光の位相共役(複素共役)をとることにより、システム前半における分散と非線形効果の蓄積を後半において補償することができる。

本論文ではまず第2章で、ファイバの非線形性と群速度分散によって生じる光パラメトリック効果の概要を伝達関数を用いた解析により示す。第3章では、ソリトンを用いずにはほぼ完全に光パラメトリック効果を抑圧する手法である位相共役光通信システムについて説明し、その動作原理を明らかにする。次に4章において、本システムを有効に動作させるためのシステム設計の概要について述べる。さらに第5章において、位相共役デバイスについて簡単にふれる。

2. 光ファイバ中での光パラメトリック効果とその抑圧手法

本章ではまず、Kerr 効果と群速度分散を持つ光ファイバ中を伝搬する光波の同相変調および直交変調に対する基本方程式に基づき、光パラメトリック効果の振る舞いを明確にする⁵⁾。分散と非線形性の影響下における光電界の複素振幅 A の伝搬特性は、次の非線形シュレーディンガー方程式で記述される²⁾。

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

α は伝搬損失、 γ は $\gamma = 2\pi n^{(2)}/\lambda A_{\text{eff}}$ で定義される非線形係数で、 $n^{(2)}$ は非線形屈折率、 A_{eff} は有効コア断面積を示す。また、 β_2 は群速度分散パラ

メータである。ここで光増幅中継系での光パラメトリック効果を直観的に理解するために、光増幅中継系での光パワーの周期的変化を平均値 $\bar{P}$ で置き換える近似を用いる。このとき光ファイバに入射された CW 光はカー効果による位相回転を受け、 $A = \sqrt{\bar{P}} \exp[i\gamma \bar{P} z]$ のように振る舞う。次にこの光電界に、

$$A = \left\{ \sqrt{\bar{P}} + a \right\} \exp[i\gamma \bar{P} z] \quad (2)$$

$$a(z, T) = \{a_m(z) + ib_m(z)\} \cos(\omega_m T) \quad (3)$$

のように角周波数 ω_m で振動する摂動 a が加わったとする。 $a_m(z)$ は搬送波と同相の(In-Phase)変調成分を、 $b_m(z)$ は搬送波と直交する(Quadrature)変調成分を表す。同相変調は搬送波に対する振幅変調に対応し、直交変調は搬送波に位相変調を誘起することは容易にわかる。式(1)(2)(3)より $a_m(z)$ 、 $b_m(z)$ に対する微分方程式

$$\frac{da_m}{dz} = -\frac{1}{2}\beta_2 \omega_m^2 b_m \quad (4)$$

$$\frac{db_m}{dz} = \frac{1}{2}\beta_2 \omega_m^2 a_m + 2\gamma \bar{P} a_m \quad (5)$$

を得る。式(4)および(5)の物理的意味は明確である。 β_2 を含む項は、Fig. 1 に示すように搬送波フェーズ先端にのった同相変調成分と直交変調

Fig. 1 Evolution of the complex amplitude of optical field under the influence of the group-velocity dispersion and Kerr effect in optical fibers.

成分を回転させ、同相変調と直交変調を混合させる。一方 γ を含む項は、カー効果を示す。すなわちFig. 1に示すように、同相変調がファイバの屈折率変化を介して直交変調を誘起する。

次に入力端で同相変調 $a_m(0)$ を加えたとき、出力端での同相変調は $a_m(z)$ 、直交変調は $b_m(z)$ に変化する。式(4)(5)を用いて、伝達関数 $T_a = a_m(z)/a_m(0)$ 、 $T_b = b_m(z)/a_m(0)$ は以下のように求められる。

$$T_a(\omega_m) = \cos \left[\frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} \left(\frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} + 2\gamma \bar{P} \right) \right]^{\frac{1}{2}} z \quad (6)$$

$$T_b(\omega_m) = \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \beta_2 \omega_m^2 \right)}{\left(\frac{1}{2} \beta_2 \omega_m^2 \right) + 2\gamma \bar{P}} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \left[\frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} \left(\frac{\beta_2 \omega_m^2}{2} + 2\gamma \bar{P} \right) \right]^{\frac{1}{2}} z \quad (7)$$

T_a は入力された同相変調の出力端での変化を、 T_b は入力された同相変調が出力端で直交変調に変化する度合いを示すので、理想的な伝達関数は全帯域にわたって $T_a = 1$ および $T_b = 0$ である。Fig. 2に、 $n^{(2)} = 3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ 、 $A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $D = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2 = -4$ (正常分散(a))、 $+4$ (異常分散(b))ps/km/nm、 $\alpha = 0.2 \text{dB/km}$ 、 $L = 2,500 \text{km}$ 、 $\bar{P} = 0 \text{dBm}$ の条件下における伝達関数を示した。サイドバンド周波数が高いときには非線形効果は分散により抑圧され、 a_m および b_m は z 方向への伝搬に伴って正弦波状にパワーをやりとりするが、全パワーは保存されている。しかしサイドバンド周波数が低い領域では、 a_m あるいは b_m のパラメトリック増幅が起きている。特に異常分散領域($\beta_2 < 0$)ではパラメトリック増幅度は大きい。この非線形効果は変調不安定と呼ばれる。

このように非線形性が強い領域では搬送波がポンプ光として働き、サイドバンドにおいてパラメトリック利得が生じる。この効果は変調信号のスペクトルを変形させるので、非ソリトン系のシステムにおける伝送波形歪の原因となる。これに対して分散性の領域では同相変調と直交

変調は混じりあうものの、搬送波からサイドバンドへのパワーの移行は生じない。このように分散が0でなければ、非線形効果の及ぶ帯域は分散により制限されるが、一方非ソリトン系のシステムでは、分散による線形な波形歪を抑えるためにシステムの総分散は0でなければならない。したがって、非線形性を抑圧し同時に分散も0にすることは不可能であることがわかる。

この問題を解決する手法として、ソリトン伝送方式および分散マネジメント法が提案されている。ソリトン伝送方式では、ある特殊な光パ

Fig. 2 Transfer functions in an optical-amplifier chain. The solid curve shows T_a , and the broken curve T_b . (a):normal dispersion and (b):anomalous dispersion.

ルス波形を用いることにより分散と非線形性による波形歪をキャンセルさせる方式である。このため、システム全長にわたって分散と非線形性の釣合を維持させる必要がある。これに対して分散マネージメントは、総分散は0であるが分散を分布させることにより非線形効果の生じる帯域を制限する方法である。Fig. 2に示すように正常分散を用いた方が非線形効果は小さいので、伝送用には正常分散ファイバを用い、蓄積した分散を大きな異常分散を持つ分散補償ファイバによって周期的に補償するというシステムが考え得る。適当な間隔で分散補償を行えば、非線形効果の帯域を限定し、しかも総分散を0にできる。

3. 位相共役光通信システム

第2章で示したように、分散マネージメントは信号帯域外における非線形効果を抑圧する作用を持つ。この方式は比較的容易に実現できるので、実用システムに導入されつつある。しかし信号帯域内での非線形効果の蓄積を避けることはできないので、完全な歪補償を行うことは困難である。これに対して筆者らは、光増幅中継系の midpoint に入射光電界の複素共役を発生する位相共役デバイス挿入し、光ファイバの分散と非線形屈折率(カー効果)を同時に補償するシステムを提案した^{3,4)}。また渡辺らは、伝送路中の任意の点に位相共役器を設置したときの一般的な補償条件を導出した⁶⁾。ソリトン伝送システムが、光ファイバの分散と非線形屈折率に対する分布定数的な補償法であるのに対し、本方式は集中定数的な補償法であると考えられる。以下に本システムの動作原理について述べる。

式(1)の複素共役をとると

$$-\frac{\partial A^*}{\partial z} = +\frac{\alpha}{2}A^* - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} + i\gamma|A^*|^2 A^* \quad (8)$$

である。したがって損失と利得を反転させれば($\alpha \rightarrow -\alpha$)、 $A(T, z)$ が非線形シュレーディンガー方程式の解であるとき $-z$ 方向に進む $A(T, z)$ の複素共役もまた同じ方程式の解となる。

ここで入力端から光電界 $A(T, 0)$ を送出したと

しよう。伝送路の分散や非線形屈折率で歪みが生じた出力端での信号光を、複素共役をとったうえで入力端に逆行させると(ただし α の符号だけは反転させる)、入力端での光電界は $A^*(T, 0)$ となる。すなわち入力端ではもとの送信波形が再現できることがわかる。この事実は、Fig. 3(a)に示すように伝送路の midpoint に位相共役器を配置し、伝送路の前半と後半でファイバの分散分布および光パワー分布が midpoint に対して鏡像対称性を持てば、完全な歪み補償が可能となることを意味する。

渡辺らはこの補償原理を一般化し、つぎのような補償条件を導出した。位相共役器を設置した点を $z=0$ とし、 $z=0$ から見てカー効果による位相回転量の等しい対称点を $-z_1, z_2$ とする。すなわち

$$-\int_0^{-z_1} \gamma(z)P(z)dz = \int_0^{z_2} \gamma(z)P(z)dz \quad (9)$$

である。この対称点で

$$\frac{\beta_2(-z_1)}{\gamma(-z_1)P(-z_1)} = \frac{\beta_2(z_2)}{\gamma(z_2)P(z_2)} \quad (10)$$

の関係が満足されれば、分散とカー効果の完全補償が可能となる。すなわち、分散とカー効果に

Fig. 3 The ideal optical power distribution where an OPC can compensate for waveform distortion perfectly (a), and the optical power distribution in an actual system (b).

よる位相回転量の分布が独立に鏡像対称性を持つ必要はなく、その比が対称性をもてば十分であることがわかる。

次に、実際にはどのようなシステムを構成すればこの補償条件を満足できるかを検討しよう。Fig. 3(a)の光パワー分布を実現することは不可能であり、実際のシステムでの光パワー分布はFig. 3(b)のようになる。しかし光増幅器間隔を十分狭くすれば、光パワー分布は均一分布と近似することができる。この近似が成り立つ場合には、システム前半と後半でシステム長の比を $1:d$ 、光パワーの比と分散の比をそれぞれ $d:1$ にすれば、式(9)(10)に示す補償条件が満足される。なお、光パワー分布の不均一性による補償の不完全性については次章で論ずる。

一方、分散分布を制御する自由度が許される場合は、光パワーの減衰にあわせて分散値を指数関数的に低減させれば、式(10)における $\beta_2(z)/\gamma P(z)$ の値を一定にすることができる。この値をシステム前後半で補償条件を満足するように調整することにより、光パワーが均一分布と見なせない場合でも歪補償が可能となる。

4. システム設計

位相共役光通信システムは潜在的には長距離・大容量化に対応できる能力を持つ。現段階では光位相共役を比較的短距離のシステムへ導入した報告例が多いが^{7, 8)}、ごく最近、伝送速度20Gbit/s、伝送距離3,000kmのシステム実験が行われ、その優れた伝送性能が実証されつつある⁹⁾。ここでは、位相共役光通信システムの性能を引き出すためのシステム設計の概要について述べる。

長距離伝送システムでは、光パワー分布にあわせて伝送路の分散を細かく制御することは難しい。そこでここでは分散が均一であり、中点に位相共役器を置いたシステムについて考えよう。均一なパワー分布に基づく光パラメトリック効果は、前章の議論で示された通り光位相共役により完全に抑圧できるが、周期的な光パワー変動は、ある特定のサイドバンド周波数において

Fig. 4 Dispersion windows for suppressing the eye penalty. Note that we have a wide window in the normal dispersion region, and a relatively narrow window in the anomalous dispersion region.

サイドバンド変調不安定と呼ばれる光パラメトリック利得を生じさせる。これによって生じた伝送波形歪は、鏡像対称性を持たないパラメトリック効果によるものであるから位相共役によっても除去できず、本システムの性能限界を支配する要因となる¹⁰⁾。

サイドバンド変調不安定の影響を回避するためのシステム設計上の第一の留意点は、中継器間隔である。光増幅器の中継器間隔 l は、システムの非線形長 $L_{NL} = 1/\gamma \bar{P}$ より十分短くする必要がある。第二の留意点は、伝送用ファイバの分散である。Fig. 4は、分散によるアイ開口劣化(歪補償度の不完全性を示すパラメータ)の計算結果を示したものである。計算に用いたパラメータは、 $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ 、 $\bar{P} = 1.7\text{dBm}$ 、データ伝送速度 $= 40\text{Gbit/s}$ 、中継器間隔 $l = 40\text{km}$ 、システム全長 $= 2,000\text{km}$ である。非線形シュレーディンガー方程式を用いて伝送された信号波形を計算することにより、アイ開口劣化を評価している。正常分散領域では広い分散領域にわたってアイ開口劣化は小さく、異常分散領域ではアイ開口劣化が小さくなる分散の窓が存在することが示されている。

異常分散領域($\beta_2 < 0$)では、変調不安定によって広がったスペクトルがサイドバンド変調不安定

の種になり、位相共役器によっても補償できない歪みをもたらす。したがって、異常分散領域における変調不安定の影響を避けるためには、分散をある程度大きくし、変調不安定の帯域を信号帯域に比べて十分狭くする必要がある。これに対して、正常分散領域($\beta_2 > 0$)では変調不安定は存在しないので、分散と非線形屈折率によるスペクトルの変化は異常分散領域ほど大きくはない。したがって、サイドバンド変調不安定が誘起されにくく、位相共役による歪み補償が広い範囲で効率的に行われる。

以上の議論より、長距離伝送には正常分散領域の利用が好ましいと言える。この領域では分散の窓は広く、分散の変動に対して耐性がある。一方、 $1.3\mu\text{m}$ 零分散ファイバ(通常分散ファイバ)を $1.5\mu\text{m}$ 帯で用いる場合には、異常分散領域の窓を使うことが可能である。これは、通常分散ファイバを用いた既存のシステムを $1.5\mu\text{m}$ 帯で用いる場合の、伝送歪み補償技術として注目される。

光位相共役は、さらにいろいろなシステムに適用が可能である。まず、波長分割多重光通信システムへの適用を考えよう¹¹⁾。複数の波長が同時に1本のファイバ中を伝搬すると、1つのチャンネルでの波形歪に加えてチャンネル間の非線形相互作用によるクロストークが避けられない。しかしこのクロストークは、光ファイバの群速度分散とカー効果によって生じたものであるから、単一チャンネルの場合と同様に位相共役により補償できることは明かである。さらに光位相共役は、光ソリトン伝送の安定化にも有効である¹²⁾。本来光ソリトンは、群速度分散およびカー効果の存在下で安定に伝搬する光パルスであるが、パルス幅がサブps領域になると、ソリトンパルス間の相互作用やラマン効果などの非線形効果の影響により、安定な伝送が困難になる。このような状況のもとでも伝送路の midpoint で光位相共役を行えばこれらの非線形効果の影響を補償できるので、ソリトンの安定化が可能になる。

5. 光位相共役デバイス

光位相共役波は、縮退四光波混合を用いて発

Fig. 5 Schematic diagram of phase-conjugation devices.

生させることができる。Fig. 5にデバイスの基本構成を示す。3次の非線形感受率 $\chi^{(3)}$ を有する媒質にポンプ光(角周波数 ω_p)と信号光(ω_s)とを入射させるとポンプ光と信号光のビートが生じ、 $\chi^{(3)}$ の作用により媒質中に屈折率もしくは利得変動に基づくダイナミックグレーティングが形成される。ポンプ光がこのグレーティングによってブラッグ回折され、アイドラ光($\omega_i = 2\omega_p - \omega_s$)が発生する。ポンプ光と信号光によって生じる三次非線形分極は、ポンプ光電界を A_p 、信号光電界を A_s とすることにより

$$P_{NL} = \chi^{(3)} A_p^2 A_s^* \quad (11)$$

で与えられる。したがってこの非線形分極により励振されるアイドラ光電界 A_i は、信号光の位相共役となることがわかる。

光通信システムへ応用するためには、位相共役波の発生効率が高いこと、応答速度が高速であることが要求される。これらの要求に応える位相共役デバイスは、三次非線形光学材料として分散シフト光ファイバや半導体光増幅器を用いて実現されているが、システムへの導入をはかるには一層の高性能化が不可欠である。

6. むすび

超長距離光伝送システムの midpoint で光位相共役を行い、分散ならびに非線形効果を補償する位相共役光通信システムに関して解説した。長距離・大容量化のためのシステム設計理論はほぼ確立しつつあり、実用レベルの光位相共役デバイスの開発が現在の主たる研究課題である。光位相共役は、非ソリトン伝送システム、ソリトン伝送システムの如何にかかわらず、その伝送性能を向上させることが可能である。今後、大規模なシステム実験によりその有効性が実証される

ことを期待したい。

参 考 文 献

- 1) N. Henmi, Y. Aoki, T. Ogata, T. Saito and S. Nakaya: J. Lightwave Technol. 11 (1993) 1615.
- 2) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 1989).
- 3) K. Kikuchi and C. Lorattanasane: *Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA'93), SuC1, Yokohama, July 1993.
- 4) K. Kikuchi and C. Lorattanasane: IEEE Photonics Technol. Lett. 6 (1994) 104.
- 5) K. Kikuchi: IEEE Photonics Technol. Lett. 5 (1990) 221.
- 6) S. Watanabe and M. Shirasaki: J. Lightwave Technol. 14 (1996) 243.
- 7) M. C. Tatham, G. Sherlock and L. D. Westbrook: Electron. Lett. 29 (1993) 1851.
- 8) A. H. Gnauck, R. M. Jopson and R. M. Derosier: IEEE Photonics Technol. Lett. 5 (1993) 663.
- 9) S. Watanabe, S. Kaneko, G. Ishikawa, A. Sugata, H. Ooi and T. Chikama: *International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC'95)*, PD2-6, Hong Kong, June 1995.
- 10) C. Lorattanasane and K. Kikuchi: IEEE Photonics Technol. Lett. 7 (1995) 1375.
- 11) S. Watanabe: Optics Lett. 19 (1994) 1308.
- 12) W. Forsysiak and N. J. Doran: Electron. Lett. 30 (1994) 154.

レーザーワード

光位相共役 (Optical Phase Conjugation)

光電界複素振幅の複素共役を発生させる操作。三次の非線形光学材料にポンプ光 $E_p(\omega_p)$ と信号光 $E_s(\omega_s)$ を入射すると、角周波数 $2\omega_p - \omega_s$ のアイドラ光が発生する。アイドラ光の複素振幅は $|E_p(\omega_p)|^2 E_s(\omega_s)^*$ に比例するので、アイドラ光は信号光の位相共役波となることがわかる。

伝搬してきた光の位相共役波を同じ経路にそって戻してやると、経路上のどの位置においても、位相共役波の光電界は入射光の光電界の複素共役となる。したがって経路上で光電界が位相の擾乱を受けても、位相共役波はあたかも時間を遡るように伝搬し、位相の擾乱が補償される。この性質は、補償光学や光ファイバ通信システムにおける分散補償に応用されつつある。

(菊池 和朗)

群速度分散 (group velocity dispersion)

群速度(波のかたまりが伝搬する速度)が、波長によって変化する現象。群速度分散を有する媒質中を光パルスが伝搬すると、パルスの時間幅が広がってしまう。単一モード光ファイバでは、群速度分散は材料自身の屈折率の波長依存性に起因する材料分散と、導波路構造にすることによって生じる導波路分散との和で与えられる。標準的な石英系単一モード光ファイバでは波長 $1.3\mu\text{m}$ 付近で群速度分散が零となるが、伝搬損失が最小となる波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近で群速度分散が零となるように屈折率分布を工夫した分散シフトファイバが、大容量基幹伝送路に用いられている。

(戸田 裕之)