

平成22年6月4日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19560380  
 研究課題名（和文）光位相変調方式に対する自己/相互位相変調効果の高速評価法に関する研究  
 研究課題名（英文）Fast assessment method of self/cross-phase modulation on optical phase modulation systems  
 研究代表者  
 乗松 誠司（NORIMATSU SEIJI）  
 京都大学・大学院情報学研究科・准教授  
 研究者番号：20303886

研究成果の概要（和文）：固定局間の高速通信では光ファイバ通信を行うのが一般的である。加入者と固定局との間も光ファイバ通信を用いた高速通信が普及してきている。これに伴い、固定局間の通信速度向上が求められている。速度向上のため、周波数の異なる複数のレーザ光を用いることが行われている。このような方法では、非常に細い光ファイバ中に光パワーが集中するため信号品質の劣化が生じてしまう。劣化量を評価するために、光ファイバ中で生じている現象を計算機上で計算を行うが、実際の現象を再現するために繰り返し計算を行わなければならない。多大な計算時間がかかる。簡易で高速な計算方法を開発することで、光ファイバ通信システムの効率的な設計に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The high-speed communications between fixed stations are generally performed by optical fiber communications. Bitrates of subscriber's lines have been increased by optical fiber communications. As a result, it is expected to improve the bitrates in backbone networks. To improve the bitrates, several lasers with different frequencies are used. In this way, the signal quality degradation is caused due to the concentration of optical power in a strictly narrow core of optical fiber. To assess the amount of degradation, computer simulations are conducted. However, calculations must be performed repeatedly to reproduce the actual phenomenon, and it needs a lot of computing time. By developing a simple, fast calculation method, this work will contribute to the efficient design of optical fiber communication systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学、光ファイバ通信、位相変調、ファイバ非線形効果

## 1. 研究開始当初の背景

異なる波長を搬送波として送信データで変調を行う波長分割多重(WDM)が、光ファイバ通信の大容量化の本命として実用化され、さらに大容量化に向けて活発に研究開発が行われている。しかし、WDMで搬送波数を増加させると、伝送路である光ファイバ内の光パワーが増加し、4光波混合、自己/相互位相変調、誘導ラマン散乱などの光ファイバ非線形効果が生じて伝送特性が劣化する。また、それぞれのチャンネル当たりの伝送速度も、40Gbit/s以上の高速化に向け、研究開発が活発化しており、チャンネル当たりの光パワーも今後増加していくと予想される。

これら光ファイバ非線形効果の影響の評価を行う場合、伝送路中の光信号の伝搬をシミュレーションするスプリット・ステップ・フーリエ法(SSF法)が用いられる。SSF法では、極力短く刻んだ光ファイバ片における群速度分散と非線形効果による波形の変化を交互に計算し、信号伝送の方向へ各ファイバ片の計算を継続的に進めるため、光ファイバ通信のような長距離伝送では、数日程度の時間を要する。実際のシステムではWDMチャンネルに独立した情報を載せて伝送するため、これをシミュレーションするには各WDMチャンネルへの信号に対し、ランダムな系列を選びながら評価値が収束するまで計算を行った後、統計的な処理が必要となり、極めて長い計算時間を必要とする。さらに、チャンネル当たりの伝送速度が高速化していくと、前記光ファイバ片をさらに短く刻んで計算しなくてはならず、計算時間はさらに増加する。そのため、SSF法を用いると、例えば伝送路の群速度分散の組み合わせや伝送路への入力光パワーの設定値といった1組のパラメータ群の設定に対する1つの計算結果が得られるだけであるので、各種パラメータを最適化していくのは不可能に近い。

また、変調方式として現在実用化されている強度変調方式より光ファイバ非線形効果の影響が低減できる光差動位相変調方式を含め、さまざまな変調方式の研究が活発化している。長距離伝送の観点からは次世代の変調方式として、光差動位相変調方式が有望視されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、光ファイバ通信において多波長帯利用による大容量化に関するものであり、特に近年研究が活発化している光差動位相変調方式に対するものである。光ファイバ非線形効果の中でも劣化の主要因となる、自己/

相互位相変調による当該方式の受ける伝送特性劣化を簡易に精度よく定量評価する方法を開発することを主な目的とする。

## 3. 研究の方法

光差動位相変調方式では、自己/相互位相変調による位相変動分だけでなく、強度変動分を同時に考慮に入れていかなければならない。このため、波形劣化に至る過程を詳細に調査する必要がある。

さらに、本研究の基礎となる2004～2006年度に採択された基盤C(一般)で分かっていたように、自己位相変調によって波形劣化したWDMチャンネル同士の相互位相変調を正確に評価するためには、それぞれの自己位相変調の影響をどれだけ正確に表現できるかにかかっている。これについては、より解析が簡易な強度変調方式においても、まだ誰も成功していないため、この検討にも重点をおく必要がある。

誤り率に対し、どの程度影響を与えるか、を正確に評価可能という点が本研究で特に重要になる。波形劣化が誤り率に及ぼす影響についても、本研究提案者のグループにより提案され、公表されている。したがって、自己/相互位相変調が波形劣化にどのように影響するかが分かれば、誤り率に結びつけることは可能と考えられる。

本研究で主に対象とするシステムは、最近特に注目されている光差動位相変調を行うシステムとするが、近年、位相を利用したさまざまな変調方式が提案されてきており、それらに適用できる近似法も必要となる。これらは本研究で検討を行うものを単純に拡張して適用できる可能性は大きい。

また、自己/相互位相変調や誘導ラマン散乱を、それぞれ単独で検討してきたが、実際の光ファイバ中ではこれらが同時に生じる。つまり、それぞれの効果がお互いに相互作用しながらWDMチャンネルが光ファイバ中を伝搬していく。同時に生じた場合と、単独で検討した結果を足し合わせた場合とで、どの程度の差が出てくるか、についても検討していく必要もある。

上記のような観点に立ち、以下の項目に示したように研究を進める。

- (1) 自己/相互位相変調の影響を、強度変動分及び位相変動分として導出できる近似法の検討を行う。さらに、自己位相変調の影響を表現する手法の開発にも重点をおく。強度変調方式において現在までに得

られた知見で利用可能な部分も利用する。  
解析的な近似式で表現できれば、計算時間としては非常に短くなるが、うまく表現できない場合も考えられる。数値計算を含むものであっても、シミュレーションにおける逐次計算を除くような近似を用いる予定であるので、シミュレーションより計算時間を大幅に短縮することは可能である。

- (2) SSF法を用いて計算を行うことにより、自己/相互位相変調が光差動位相変調方式の伝送特性に及ぼす影響の特徴抽出を行う。特に、自己/相互位相変調による強度変動分が光差動位相変調方式の受信特性に与える影響を調べ、どの程度影響を与えるかを明らかにする。
- (3) 位相変調であれば、包絡線波形として振幅一定のNRZ形式のものを想定するが、パルス化してRZ形式としたものの方が光ファイバ非線形効果の影響が少なくなるため、将来の変調方式として有望である。そのため、NRZ/RZ形式どちらへも適用可能なように検討を行う。
- (4) 位相を利用した他の変調方式への適用を考察する。特に最近注目されている多相位相変調系への適用も視野に入れる。
- (5) 上記検討項目の結果が得られれば、自己/相互位相変調の影響を短時間で評価できるので、WDMチャネルの配置法など自己/相互位相変調の影響を抑える設計方法の検討を行うことも可能である。

#### 4. 研究成果

デジタル通信で最も重要な指標は誤り率である。誤り率に対し、どのように影響を与えるか、という点が本課題に特に重要となる。変復調方式として光差動位相変調方式が特に注目されているので、本課題ではこの方式に注目する。また、ファイバ非線形効果のうち、自己/相互位相変調の影響を定量化することが本課題の目的となる。

相互位相変調効果はWDMの場合に生じる。それぞれのWDMチャネルが担うデータは独立なものであるため、相互位相変調の影響を一般的に評価するには、お互いに独立なデータとなるように疑似ランダム信号を何回も発生させ、その信号がどのように影響を受けるかを評価するものが従来法である。そのため従来法では計算時間が多くかかる。

- (1) 光差動位相変調方式において、誤り率に対応する位相差 $Q$ 値というものが用いられている。これは2相差動位相変調信号

に対して定義されているものである。この位相差 $Q$ 値を4相差動位相変調信号に対して拡張する方法を考案し、最適送信パワーを決定する程度の場合に対しては適用可能であることを示した。この方法では、ファイバ非線形効果だけでなく、一般的に波形劣化が生じた場合にも適用でき、大幅な計算時間の低減に寄与する。  
(下記雑誌論文⑧として公表)

- (2) 自己/相互位相変調が同時に起こっている場合についても検討を行った。光差動位相変調方式では受信系が複雑となるため、強度変調方式の場合において検討を行った。その結果、自己位相変調だけの影響を受けた波形に対し、擬似的に相互位相変調の影響を重畳させることで、誤り率を小さな誤差で推定できることを示した。従来法の約1/400の計算時間となる。(下記雑誌論文⑦として公表)
- (3) 光差動位相変調方式において、上記「疑似ランダム信号を何回も発生させる」部分を統計的に数式上で処理することにより、分散を短時間で求めることに成功した。分散が分かれば、誤り率への影響が評価できる上、完全にランダムな場合の評価となるため、実際の場合に適合しやすいという特徴がある。(下記雑誌論文⑥として公表)
- (4) 理論限界となる送受信構成の場合に対し、誤り率の閉じた表式の導出を行った。二相光差動位相変調方式の場合と多相光差動位相変調方式の場合とで、雑音の影響が異なるため、二相の場合と多相の場合に関して別々に導出した。これらの特殊な場合は従来分かっていたが、光の場合への拡張を行っている。これらは理論的な解析へ寄与すると考えられる。(下記雑誌論文④⑤、学会発表①として公表)
- (5) 光差動位相変調方式において、上記「疑似ランダム信号を何回も発生させる」部分により、ガウス雑音が重畳した効果と同じとなることに注目した。シミュレーション数回だけを行うことにより、そのガウス雑音の大きさを推定し、計算によって疑似ガウス雑音を発生することにより相互位相変調の影響を評価できる方法を開発した。従来法の約1/60の計算時間となる。強度変調方式における同様な方法(上記(2))に比べ、計算時間の低減率が低くなったのは、光差動位相変調方式では位相成分への影響まで考慮に入れなくてはならず、余分な計算が必要になるためである。(下記雑誌論文②として公

表)

- (6) 当研究において対象となる直接検波では、雑音において光増幅器雑音が支配的とした検討が行われてきたが、実際にはショット雑音も存在する。ショット雑音も考慮に入れて検討した結果、一般的な光増幅器ではショット雑音の影響が少ないことを実証した。ショット雑音まで考慮に入れると計算時間が大幅に増加してしまうが、これにより計算時間を増やさなくとも正確さを保証できる。(下記雑誌論文③として公表)
- (7) 次々世代の変調方式の1つの候補として、振幅位相変調方式がある。この信号生成において、複数の光強度を設定しなければならないが、最適な設定値はまだ明らかになっていないため、これを明らかにした。(下記雑誌論文①として公表予定)
- (8) 光多相差動位相変調方式の誤り率は複雑であり、さらに高速評価ができるような近似があるのが望ましい。粗いながらもガウス近似を行ったところ、広い適用範囲で近似が成り立つことが分かった。(未公表)

国内外において、複数の光ファイバ非線形効果の影響を同時に考慮に入れる試みはほとんどなされていない。また、得られる誤差についても、測定器の精度程度まで小さいため、これだけ小さな誤差でシステムの評価ができるのは、他にはない。さらに、計算時間に関しても従来法に比べ、圧倒的に高速に処理できる方法が得られたと確信している。

今後の展望として以下のような点が挙げられる。

- (1) 本課題では、考慮に入れる光ファイバ非線形効果が自己位相変調と相互位相変調までしかできなかった。今後は誘導ラマン散乱なども含めた評価が可能となるよう、拡張していく必要がある。
- (2) 本課題では次世代システムとして、光差動位相変調における光ファイバ非線形効果を考えた。現在、光ファイバの利用帯域をさらに有効に利用する方式として、振幅と位相を同時に変化させる、振幅位相変調方式が注目されている。本課題で位相成分に対する光ファイバ非線形効果の影響が評価できるようになり、本研究の基礎となる2004~2006年度に採択された基盤C(一般)では強度成分に対する光ファイバ非線形効果の影響が評価でき

るようになったことになる。よって、これらを発展させていけば、振幅位相変調方式に対する光ファイバ非線形効果の影響の評価にもつなげていけると考える。

- (3) また、検波方法としても、本課題では次世代システムとして直接検波方式における光ファイバ非線形効果を考えた。線形的に信号を取り出すコヒーレント検波が注目されている。信号を線形的に取り出すことで、光ファイバ非線形効果をはじめとする、光ファイバ中で生じる様々な影響の電気領域での補償が可能となる。この場合、受信機で影響を推定することになるが、複雑な方法をとると、受信機の構成が大変複雑かつ高価なものになってしまう。また、計算時間がかかると、信号伝搬に遅延が生じることになるため、高速かつ簡易な方法が求められる。本課題は光ファイバ非線形効果の高速かつ簡易な評価法の開発であり、上記のような目的にも適する。まだ、受信機での計算に適するまで簡易にはなっていないが、研究の方向性は完全に一致していると言える。よって、さらに検討を進めることにより、次々世代におけるシステム研究へ大きなインパクトを与え得ると考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 岡野慎也、乗松誠司、光振幅位相変調—直接検波方式における最適消光比と誤り率特性、電子情報通信学会論文誌、査読有、掲載予定
- ② 乗松誠司、小田裕大、阿形直起、光二相差動位相変調方式の誤り率に対する自己/相互位相変調の影響の高速評価法、電子情報通信学会論文誌、査読有、J93-B 巻、2010、412-421
- ③ 岡野慎也、乗松誠司、光差動位相変調方式における雑音分布とその自由度、電子情報通信学会論文誌、査読有、J92-B 巻、2009、1661-1668
- ④ 岡野慎也、乗松誠司、光4相差動位相変調方式の誤り率の多相方式への拡張法、電子情報通信学会論文誌、査読有、J92-B 巻、2009、31-43
- ⑤ 鮫島清豪、乗松誠司、光二相差動位相変調方式の理論限界における誤り率、電子情報通信学会論文誌、査読有、J92-B 巻、2009、20-30
- ⑥ 乗松誠司、小嶋武郎、光二相差動位相変調方式に対する相互位相変調の影響の統

- 計的評価法、電子情報通信学会論文誌、  
査読有、J91-B 巻、2008、1647-1657
- ⑦ 乗松誠司、岡田紘明、小田裕大、強度変  
調方式の誤り率に対する自己/相互位相  
変調の影響の高速評価法、電子情報通信  
学会論文誌、査読有、J91-B 巻、2008、  
140-150
- ⑧ 吉田剛、乗松誠司、4 相差動位相変調方  
式における位相差  $Q$  値に関する一検討、  
電子情報通信学会論文誌、査読有、J90-B  
巻、2007、1353-1356

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① 岡野慎也、光多相 DPSK の理論限界におけ  
る誤り率特性、電子情報通信学会、2008  
年総合大会、B-10-102、2008 年 3 月 21  
日、北九州市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

乗松 誠司 (NORIMATSU SEIJI)  
京都大学・大学院情報学研究科・准教授  
研究者番号：20303886