

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月5日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560373

研究課題名（和文）光振幅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）A fast assessment method of self/cross-phase modulation on optical phase/amplitude 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）：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、これに伴い、固定局間の通信速度向上が求められている。現在、光強度に信号を乗せて伝送しているが、通信速度向上のため同時に位相にも信号を乗せる方式が検討されている。また、さらに速度向上するため、周波数の異なる複数のレーザー光を用いて多チャンネル化されている。このような方法では、非常に細い光ファイバコア内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、光ファイバコア内で生じている現象を計算機上で計算を行うが、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、光振幅/位相に情報を乗せた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）：Bitrates of subscriber's lines have been increased by optical fiber communications. As a result, it is expected to improve capacity of backbone networks. To improve capacity, optical amplitude/phase modulation is studied, although current modulation utilizes optical amplitude. To improve capacity more, more than one laser with different frequencies is used. In that case, the signal quality degradation arises due to the concentration of optical power in a strictly narrow core of an 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 and fast calculation method, this work will contribute to the efficient design of optical fiber communication systems using optical amplitude/phase modulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012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/相互位相変調効果、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。

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波長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、例えば伝送路の波長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、次世代の変調方式として差動位相変調(DPSK)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。特に、振幅や位相に対し同時に情報を載せる振幅位相変調(APSK)方式を利用してシンボル速度を下げ、波長分散や偏波モード分散の影響を低減することによる、100 Gbit/s以上の高速化の検討が行われている。APSK方式の中でも、特に直交振幅変調(QAM)方式が周波数利用効率の点で優れるが、QAMの検波にはコヒーレント検波が必要である。位相のみを用いるDPSK方式では特に相互位相変調効果の影響は低減できるが、APSK方式では位相方向の信号点が近接しており、振幅変化によって生じる自己/相互位相変調効果の影響は甚大であると予想される。

さらに、近年デジタル回路が高速に動作するようになり、伝送路における信号劣化のデジタル信号処理回路(DSP)等による補償が検討され始めている。受信機における電氣的な補償などが提案されているが、波長分散や偏

波モード分散の補償が主である。光ファイバ非線形効果の補償については、SSF法などのシミュレーションを用いて逆伝搬の計算を行い、送信側で予等化を行うことが提案されているが、シミュレーションをDSP等で実行することは負荷が高く、実時間性に乏しい。

2. 研究の目的

本課題は、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振幅位相変調(APSK)方式を対象とする。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/相互位相変調効果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。また、受信方式としては、直接検波及びコヒーレント検波の両方を対象とする。

3. 研究の方法

APSK方式では、信号の振幅変動及び位相変動によって生じる自己/相互位相変調効果を考えなければならない。さらに自己/相互位相変調効果による影響は、位相変動だけでなく、強度変動分もあるため、これらも同時に考慮に入れていかなければならない。注意が必要であるのは、APSK方式では2種類以上の大きさの振幅を用いるため、振幅変化の影響は単純ではなく、強度変調方式やDPSK方式の検討結果を単純に組み合わせただけでは達成できないと予想される。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、本課題の基礎となる2004～2006年度及び2007～2009年度に採択された基盤研究(C)による研究の結果分かってきたように、自己位相変調効果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効果を正確に評価するためには、それぞれの自己位相変調効果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、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。自己位相変調効果まで含めた評価は多岐にわたる相互作用を考慮に入れなければならないことが予想される。

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課題で特に重要になる。波形劣化が誤り率に及ぼす影響についても、本課題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/相互位相変調効果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。

また本課題の直接の研究対象ではないが、重要なツールであるSSF法の改良も行い、可

能な限り短時間で計算が行えるようにする。さらに、誤り率の真値を求める際、SSF法と組み合わせ、コヒーレント検波を行った場合の誤り率評価も行えるよう準備が必要である。そのため、これが開発されるまでは、直接検波受信機を用いた場合が対象となる。

上記のような観点に立ち、以下の項目のように研究を進めた。

- (1) 自己/相互位相変調効果の影響を、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、自己位相変調効果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考案することにより、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) 様々な状況についてSSF法を用いて計算を行うことにより、自己/相互位相変調効果がAPSK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/相互位相変調効果による強度変動分がAPSK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) SSF法で計算した伝送後の波形を入力とし、光/電気フィルタの影響を考慮に入れた、コヒーレント検波した場合の誤り率計算法を開発する。本課題提案者にはコヒーレント検波に関する研究実績があるので可能であると考えられる。
- (5) SSF法による計算にもかなりの時間がかかることが予想される。そこで、現在利用しているSSF法で計算の効率化を図り、計算時間を短縮するために、計算アルゴリズムの改良も合わせて行う。

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、という点が本課題では特に重要となる。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チャンネルが担うデータは独立であるため、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擬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。

これに対し、2007~2009年度に採択された基盤研究(C)による研究結果として、擬似的に相互位相変調の影響を重畳させることで、強度変調方式および光差動位相変調方式においてシミュレーションを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、計算によって擬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(以下、擬似XPM雑音法と呼ぶ)。この方法では誤り率を小さな誤差で推定できる。この方法のAPSK方式への適用を念頭に置いて研究を進め、また、関連する研究を行い、下記のような成果が得られた。

- (1) 4-DPSK方式およびAPSK方式に対する擬似XPM雑音法を提案した。同相軸及び直交軸での処理が必要になるため、単純な適用を行うと処理時間がかかり、高速性が失われてしまう。そこで、劣化波形を詳細に検討した結果、特定のシンボルにおいて波形劣化が顕著であり、光受信機に用いるマッハ・ツェンダ干渉器の特性も考慮すると、同相軸及び直交軸で特定のシンボルだけを考慮すればよいことが分かり、4-DPSK方式における計算時間を7/100程度にすることが可能となった。(下記雑誌論文①として公表)
- (2) 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。2, 4, 32相差動位相変調における雑音分布のキュムラントを検討した結果、2相の場合は電気段における雑音はガウス雑音とできないが、多相になると広い適用範囲でガウス雑音に近いことが分かった。さらに誤り率の漸近挙動に注目し、ガウス近似を行った場合の誤り率の表式を得、その誤差が小さいことを示した。(下記雑誌論文④として公表)
- (3) 本課題が対象とするシステムは、多中継伝送路を伝送する形態が主である。多中継

伝送路における光雑音の影響について、従来はすべての光ファイバと光増幅器が同じ特性の場合に限り公式が存在していた。これを拡張することにより、同じ特性とは限らない一般的な構成の場合にも成り立つ、多中継伝送路における光雑音の影響を導出する公式を明らかにした。(下記雑誌論文③として公表)

- (4) 実際の光通信システムにおける誤り率は、光電界を電気信号に変換したものの雑音特性が直接影響する。上記の「多中継伝送路における光雑音の影響を導出する公式」は、光電界の雑音特性を記述していて、これと電気信号における雑音特性との関係が明確ではなかった。光電変換過程において光信号雑音分布と電気信号雑音分布を結びつけるスケーリング変換があるが、従来の定義では矛盾を生じてしまう。そこで、スケーリング変換を再定義することにより、光信号雑音分布と電気信号雑音分布の関係を明確化した。また、再定義したスケーリング変換を行うと、現在よく用いられる光信号雑音分布は電気信号に変換しても雑音分布が変化しないことも明らかになった。(下記雑誌論文②として公表)
- (5) 自己位相変調効果に関して長距離伝送の場合にも適用できるような方法の検討を進め、従来技術との比較を行った。その過程で、数値積分法について高精度化を行うことにより、積分に用いるサンプル数の低減に努めた。その結果、従来技術と同程度まで計算量を低減できるようになった。また、本手法を光受信機における非線形効果補償に適用する検討を行い、サンプル数をさらに低減する方法を考案し、その効果を検証している最中である。現在のところ、肯定的な結果が得られつつある。相互位相変調効果にも適用可能なように検討を開始したが、上記のように自己位相変調効果での改良を行ったため、その適用は未完である。(未公表)
- (6) コヒーレント検波した場合の誤り率計算法に関しては、従来手法の適用も考えたが、計算精度の問題があることが分かったので、その抜本的な改良を行い、その検証の最中である。現在のところ、肯定的な結果が得られつつある。(未公表)

今後の展望として以下のような点が挙げられる。

本課題では検波方式として、直接検波とコヒーレント検波方式を対象としたが、このうちコヒーレント検波方式に関しては、光受信機

における自己位相変調効果の補償が行えるため、その補償法が注目されている。本課題での成果は、簡略化することによる高速な評価法であるので、自己位相変調効果補償法への適用は特性を生かした直接的な応用として考えられる。また、光受信機での補償が可能になるまで簡易になっていないが、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。

また、位相/振幅に信号を割り当てる APSK 方式に関する評価法が確立してきたことで、これらを発展させていけば、コヒーレント検波方式と組み合わせることで、さらに高効率な変調方式である、QAM 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がっていけると考える。

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 4 件)

- ① 阿形直起、乗松誠司、擬似 XPM 雑音法の光 4 相差動位相変調/振幅位相変調方式への適用、電子情報通信学会論文誌、査読有、J95-B 巻、2012、155-167
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j95-b_2_155&category=B&year=2012&lang=J&abst=
- ② 乗松誠司、光子統計から光電子統計への変換について、電子情報通信学会論文誌、査読有、J95-B 巻、2012、61-64
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j95-b_1_61&category=B&year=2012&lang=J&abst=
- ③ 乗松誠司、任意の入力光子統計に対する一般化した多中継伝送路の出力光子統計、電子情報通信学会論文誌、査読有、J94-B 巻、2011、938-946
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j94-b_8_938&category=B&year=2011&lang=J&abst=
- ④ 乗松誠司、岡野慎也、光多相差動位相変調方式における雑音分布のキュムラントとガウス近似、電子情報通信学会論文誌、査読有、J93-B 巻、2010、1562-1565
http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j93-b_11_1562&category=B&year=2010&lang=J&abst=

[学会発表] (計 1 件)

- ① 阿形直起、擬似 XPM 雑音法の光振幅位相変調方式への適用、電子情報通信学会、2011 年総合大会、B-10-28、2011 年 3 月

14 日、東京

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