

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560379

研究課題名（和文）長距離大容量周波数多重光ファイバー伝送システムにおける四光波混合光雑音の低減

研究課題名（英文）Reduction of Four Wave Mixing in Long-Haul Large-Capacity Frequency Division Multiplexing Optical Fiber Transmission Systems

研究代表者

沼居 貴陽（NUMAI TAKAHIRO）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：60261351

研究成果の概要（和文）：長距離大容量周波数多重光ファイバー通信システムにおいて、レーザー光と光ファイバーとの間の3次の非線形効果によって四光波混合光が発生する。この四光波混合光は、信号光と一緒に受信機に入って雑音となる。本研究では、信号光の周波数配置、変調信号の時間的な重なり、信号光の偏波配置を工夫することで、四光波混合光による雑音を低減した。また、チャンネル数の増加を目的として、周波数多重信号の総周波数帯域を低減した。

研究成果の概要（英文）：In long-haul large-capacity frequency division multiplexing optical fiber transmission systems, four-wave-mixing (FWM) light is generated due to the third-order nonlinear optical effect. The FWM light is incident upon the receiver with the signal light, and the FWM light is the cause of the noise. In this research, new allocations of light frequencies, signal pulses, and polarizations were proposed and the FWM noise was analyzed. Both FWM noise and the total frequency bandwidth were reduced.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：光エレクトロニクス

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、量子エレクトロニクス、光ファイバー伝送、非線形光学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 1980年代後半から本格的に実用化が始まった光ファイバー伝送システムは、長距離大容量伝送が可能であり、当時の電話需要の急増に伴って頻繁に発生していた電話回線線のパンクを救っただけでなく、伝送容量の余裕を生み出した。この結果、光ファイバー伝送システムは、1990年ごろから普及をはじめたインターネットを支えるインフラストラクチャーとなった。インターネットが普及し、一般家庭でのインターネット利用

者のうち約40%がADSL、約30%がFiber to the Home (FTTH)を利用するまでになり、高画質の静止画や動画など、音声に比べて極めて情報量が大きいデータがインターネットを通じて、やり取りされるようになった。このため、情報伝送路における伝送容量の増大が、またしても急務となってきた。したがって、光ファイバー伝送システムにおいて、伝送容量を拡大することが必要となるが、光ファイバーの敷設費用が莫大であることを考慮すると、すでに敷設してある光ファイバー

を用いて、伝送容量を増大することが望ましい。このような方法の一つが、1本の光ファイバーの中を、搬送波周波数の異なる複数の光信号を伝送する周波数多重(frequency-division-multiplexing、FDM)光ファイバー伝送システムである。しかし、光ファイバー中の3次の非線形効果のために、三つの信号光から新たな光信号が生じる四光波混合(Four wave mixing、FWM)とよばれる現象がある。そして、FWMによって発生した光(FWM光)の搬送波周波数が信号光の搬送波周波数と一致すると、FWM光が雑音光となって信号の伝送品質が劣化するという問題があった。(2)研究代表者は、FDM光ファイバー伝送システムにおけるFWM光雑音を低減する第1歩として、まず搬送波周波数の配置に着目した。従来は、搬送波周波数を等間隔に配置(equally-spaced、ES)するシステムや、不等間隔に配置(unequally-spaced、US)するシステムだけが提案されていた。そして、ESでは搬送波周波数の帯域幅が小さいという長所があるが、FWM光の搬送波周波数と信号光の搬送波周波数が一致する場合が多く、FWM光による雑音が大きいう短所があった。一方、USでは、FWM光の搬送波周波数と信号光の搬送波周波数が一致しないように搬送波周波数を配置することが可能で、FWM光による雑音を生じさせないという長所があるが、搬送波周波数の帯域幅が大きく、さらにチャンネル数を増加させると、搬送波周波数を配置する手続きが煩雑になるという短所があった。そこで、研究代表者は、USを一つの基本単位として周期的に反復する、反復不当間隔配置(repeated US、RUS)を提案し、理論的に解析した。その結果、ESよりもFWM光雑音が小さく、USよりも搬送波周波数の帯域幅が小さく、チャンネル数が増加しても搬送波周波数を配置する手続きが簡素であるという結論を得た。さらにUS間に等間隔のスペースを設けた equally-spaced RUS (ERUS)と、US間に不等間隔のスペースを設けた unequally-spaced RUS (URUS)を提案した。

## 2. 研究の目的

(1)USと同様にFWM雑音光が生じない信号光配置であって、しかもESよりも搬送波周波数帯域の小さい信号光配置が存在するかどうか、また存在するとすれば、どのような信号配置であるかを明らかにすることを目的としている。  
 (2)本研究の学術的な特色・独創的な点は、3次の非線形光学効果において、信号光の周波数軸上での重なりだけでなく、時間軸上での重なり、空間的な重なりに着目したことである。つまり、周波数、時間、空間すべてについて信号光を制御することにより、FWM光雑音がまったく発生しないようにし、周波数

多重光ファイバー伝送システムにおける伝送品質を向上させることが目的である。

## 3. 研究の方法

(1)信号光の変調方式と各チャンネルの偏波方向を制御し、3次の非線形効果によるFWM光が生じないような信号光の配置について検討する。変調方式の具体的な例としては、図1(a)のような強度変調/直接検波方式(intensity modulation/direct detection、IM/DD)におけるNRZ、RZ、bit phase-arranged RZ(BARZ)や、(b)のような差動位相シフトキーイング(differential phase shift keying、DPSK)などが考えられ、FWM光雑音の発生効率、符号誤り率、パワーペナルティについて理論的に計算する。

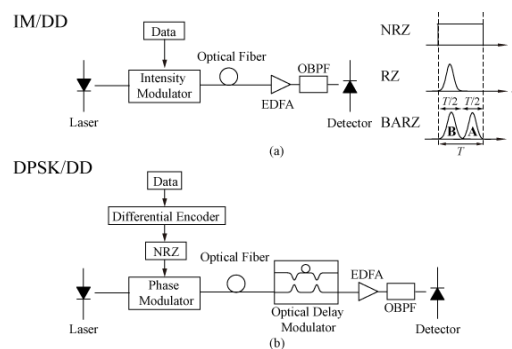


図1. 変調方式の例

(2) FDM光ファイバー伝送システムでは、受信側で各チャンネルの信号を分離するために、光フィルタを用いる。図2に光フィルタの透過特性の一例を示す。図2(a)はFDM光ファイバー通信システムで用いられている光フィルタの透過特性を示したものであり、図2(a)の光フィルタを二つ組み合わせると、図2(b)のような透過特性を得ることができる。

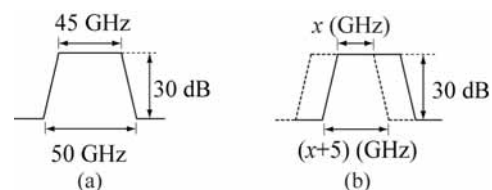


図2. 光フィルタの透過特性

FDM光ファイバー伝送システムにおける受信を考えると、単に信号光の搬送波周波数と一致するFWM光が存在しないということだけでは必ずしも十分ではなく、信号光を選択するための光フィルタの透過帯域内に入るFWM光の数ができるだけ少なく、光強度も小さいことが求められる。そこで、研究代表者が提案した変調方式、偏波配置、周波数配置の組

合せに対して、光フィルタの透過特性と FWM 光雑音との関係を研究する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 強度変調 / 直接検波方式

図 3 に示した 3 種類の変調方式 NRZ、BARZ、Quaternary BARZ (Q-BARZ) に対して、FWM 光雑音を解析した。

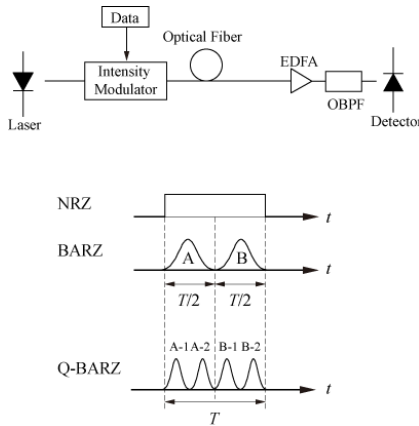


図 3 . 変調方式 : NRZ、BARZ、Q-BARZ

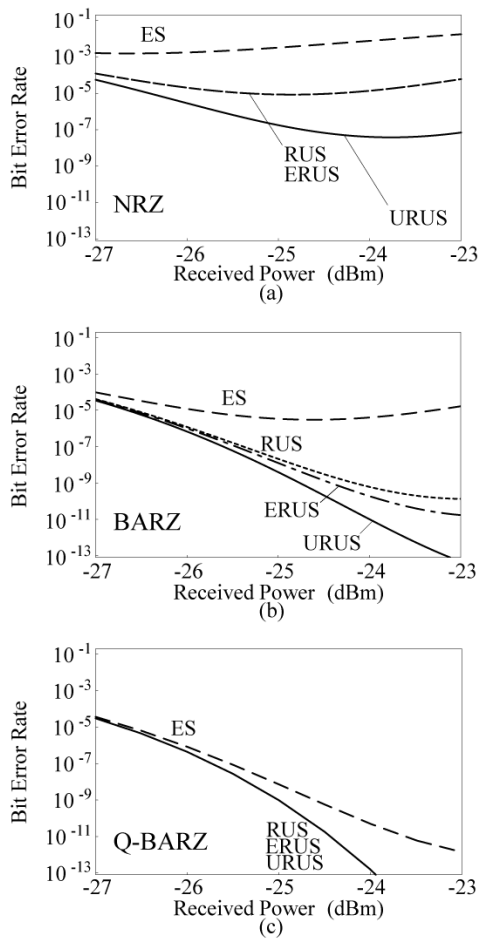


図 4 . NRZ、BARZ、Q-BARZ の符号誤り率

解析では、光ファイバーの分散、パルス幅の広がり、群遅延を考慮した。性能指数としては、FWM 光雑音の発生効率、符号誤り率(Bit Error Rate)、パワーペナルティ、許容入力パワーを用いた。例として、符号誤り率を図 4 に示す。NRZ、BARZ、Q-BARZ 方式の中で、研究代表者が提案した Q-BARZ において、もっとも FWM 光雑音を小さくすることができた。

##### (2) 周波数シフトキーイング (frequency shift keying、FSK) / 直接検波方式

二つの偏移周波数を用いるシステムを提案し、一つの偏移周波数を用いた従来のシステムに比べて、FWM 光雑音を低減できることを明らかにした。

さらに、二つの偏移周波数をチャンネルごとに割り当てる方式と、2 種類のベースユニットを用いた周波数配置を組み合わせ、チャンネルの周波数間隔の非周期性を十分高くすることで、位相整合を起きにくくした。さらに、位相不整合をできるだけ大きくして四光波混合光の強度を抑制するために必要な 2 種類のベースユニットの周波数とゼロ分散周波数との関係を明らかにした。クロストーク (crosstalk)、許容光入力 (allowable input power) とも、従来の方式に比べて改善した。ここで、許容光入力とは、パワーペナルティが 1 dB となる光入力である。図 5 にクロストークを、図 6 に許容光入力を示す。従来に比べて、クロストークは 8.59 dB 減少し、許容光入力は 5.36 dB 増加した。

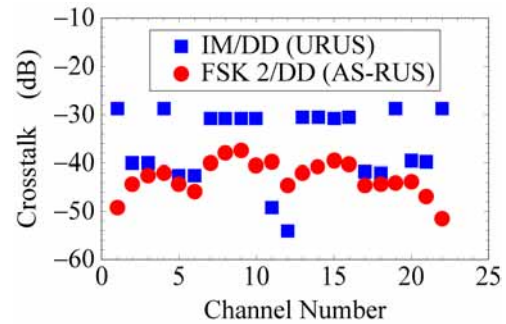


図 5 . クロストーク

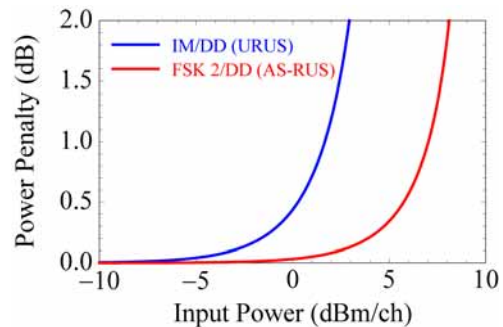


図 6 . 許容光入力

### (3) 偏波配置

光ファイバーの曲がりやねじれによる偏波方向の変化を考慮して、光信号ごとの偏波方向の割り当て（偏波配置）と FWM 光雑音との関係を研究した。

偏波配置と平均 FWM 光効率との関係を図 7 に示す。図 7 において、偏波方向は赤色の矢印で表わされており、(a) 偏波方向一定、(b) 隣接チャンネル間で偏波直交、(c) 隣接ベースユニット間で偏波直交、(d) ゼロ分散周波数  $f_0$  を境界として偏波直交となっている。この中で、(d) が FWM 光抑制にもっとも効果があることが明らかになった。

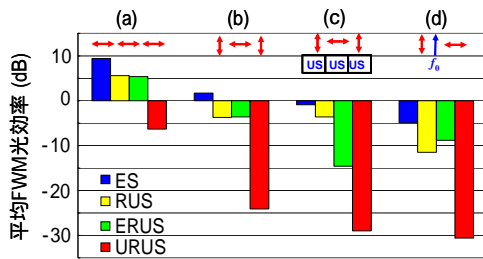


図 7 . 偏波配置と平均 F W M 光効率

### (4) 周波数配置

不等周波数間隔配置から構成されるベースユニットをもとにして、周波数間隔が、それぞれ昇順、後順となる 2 種類のベースユニットを用いる方式を提案し、F W M 光雑音の解析をおこなった。受信側に配置する、各チャンネルの信号光を選択するための光フィルタの帯域も考慮して、従来の周波数配置と、F W M 光雑音を比較した。

ここでは、2 種類のベースユニットを一部オーバーラップさせながら配置することで、信号光の総周波数帯域を低減した。さらに、位相整合が起きにくくなるように、ベースユニット間のオーバーラップ量を最適化し、信号光の搬送周波数配置の非周期性を高めた。この結果、提案した方式が有効となる光フィルタの帯域を見出すことができた。図 8 に光フィルタの帯域とパワーペナルティとの関係の一例を示す。

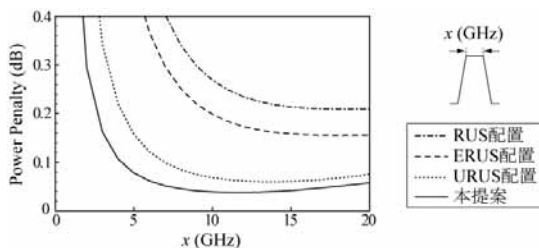


図 8 . 光フィルタの帯域とパワーペナルティとの関係

本方式では、F W M 光雑音を抑制するだけでなく、図 9 に示すように、信号光の総周波数帯域を従来よりも 18% 低減することができた。

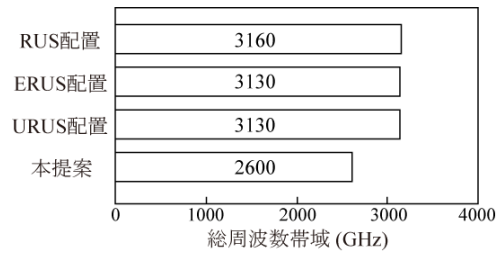


図 9 . 各周波数配置の総周波数帯域

### (5) 研究に対する評価

研究成果だけでなく、研究背景も、研究代表者のこれまでの研究と密接に結びついている。本研究を開始してから、研究背景についての執筆依頼があり、図書、において解説した。研究成果については、雑誌論文がきっかけとなって、InTech という出版社の Mr. Niksa Mandic から "Optical Fibers", ISBN: 978-953-307-922-6 への執筆依頼が届いた。ただし、依頼に応じるかどうかは、研究・教育活動の兼ね合いによる。参考までに、下記に執筆依頼の一部を再録する。

This book will be published by - Open Access Publisher covering the fields of Science, Technology and Medicine. You are invited to participate in this book project based on your paper "Influence of modulation formats on FWM noises in FDM optical fiber transmission systems," your publishing history and the quality of your research.

### 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 5 件)

著者名: Y. Ito and T. Numai、論文標題: Reduction of four wave mixing noises in FDM optical fiber transmission systems with quaternary bit-phase arranged return-to-zero、雑誌名: Optics Communications、査読: 有、巻: 282、発行年: 2009、ページ: 3989 - 3994

著者名: Y. Ito, J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai、論文標題: Influence of modulation formats on FWM noises in FDM optical fiber transmission systems、雑誌名: Optics Communications、査読: 有、巻: 281、発行年: 2008、ページ: 4515 - 4522



著者名：J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai、論文標題：Effects of frequency/polarization allocations and the zero dispersion frequency on FDM lightwave transmission systems、雑誌名：Optics Communications、査読：有、巻：281、発行年：2008、ページ：3882 - 3891

著者名：Y. Nagatani, Y. Ito, J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai、論文標題：Theoretical analysis of frequency allocations in FDM lightwave transmission systems、雑誌名：IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology、査読：有、巻：26、発行年：2008、ページ：1993-2001

著者名：J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai、論文標題：Effects of frequency and polarization allocations on FDM lightwave transmission systems、雑誌名：Optics Communications、査読：有、巻：281、発行年：2008、ページ：2627 - 2632

[学会発表](計 18 件)

発表者名：T. Tamo and T. Numai、発表標題：Reduction of Four-Wave-Mixing in FSK FDM Lightwave Transmission Systems by Asymmetric Repeated Unequally Spaced Frequency Allocations、学会名等：Photonics Global @Singapore 2010、発表年月日：2010年12月15日、発表場所：Singapore (Singapore)

発表者名：T. Tamo and T. Numai、発表標題：Reduction of Four-Wave-Mixing in FDM Lightwave Transmission Systems by Asymmetric Repeated Unequally Spaced Frequency Allocations、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2010年7月6日、発表場所：Cambridge (U.S.A.)

発表者名：T. Tamo and T. Numai、発表標題：Reduction of Four-wave-mixing Noises by FSK Modulation with Dual Deviation Frequencies in FDM Optical Fiber Transmission Systems、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2010年3月25日、発表場所：西安(中国)

発表者名：T. Nakamura and T. Numai、発表標題：Reduction of Four-wave-mixing Noises by Unequally Spaced Allocations with Dual Base Units in FDM Optical Fiber Transmission Systems、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2010年3月25日、発表場所：西安(中国)

発表者名：中村 亨、沼居貴陽、発表標題：四光波混合に対する周波数配置と光フィルタの影響、学会名等：電子情報通信学会総合大会、発表年月日：2010年3月17日、発表場所：東北大学(宮城県)

発表者名：玉生卓也、沼居貴陽、発表標題：非対称反復不等間隔周波数配置を用いた周波数分割多重光ファイバー通信システムにおける四光波混合の低減、学会名等：電子情報通信学会光通信システム研究会、発表年月日：2009年10月23日、発表場所：九州大学(福岡県)

発表者名：中村 亨、沼居貴陽、発表標題：二種類のベースユニットを重ねた周波数配置によるFDM光ファイバー通信システムにおける総周波数帯域と四光波混合の低減、学会名等：電子情報通信学会光通信システム研究会、発表年月日：2009年10月23日、発表場所：九州大学(福岡県)

発表者名：中村 亨、沼居貴陽、発表標題：二種類のベースユニットを重ねた周波数配置による狭帯域化および四光波混合の低減、学会名等：電子情報通信学会ソサイエティ大会、発表年月日：2009年9月18日、発表場所：新潟大学(新潟県)

発表者名：Y. Ito, T. Tamo, and T. Numai、発表標題：Reduction of Four Wave Mixing Noises in FDM Optical Fiber Transmission Systems with Quaternary Bit-Phase Arranged Return-to-Zero、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2009年3月25日、発表場所：北京(中国)

発表者名：玉生卓也、伊藤良峻、沼居貴陽、発表標題：四値ビット位相信号を用いたFDM光ファイバー通信システムにおけるFWM光雑音の低減、学会名等：電子情報通信学会総合大会、発表年月日：2009年3月17日、発表場所：愛媛大学(愛媛県)

発表者名：玉生卓也、沼居貴陽、発表標題：二種類の偏移周波数を用いたFSK変調による四光波混合の低減、学会名等：電子情報通信学会総合大会、発表年月日：2009年3月17日、発表場所：愛媛大学(愛媛県)

発表者名：Y. Ito, J. Onishi, S. Kojima, and T. Numai、発表標題：Influence of Modulation Formats on FWM noises in FDM Lightwave Transmission Systems、学会名等：IEEE Photonics Global、発表年月日：2008年12月10日、発表場所：Singapore (Singapore)

発表者名：Y. Ito, T. Tamo, and T. Numai、発表標題：Reduction of Four Wave Mixing Noises in FDM Optical Fiber Transmission Systems with Quaternary Bit-Phase Arranged RZ、学会名等：電子情報通信学会光通信システム研究会、発表年月日：

2008年10月24日、発表場所：九州大学（福岡県）

発表者名：玉生卓也、伊藤良峻、沼居貴陽、発表標題：BARZ信号を用いたFDM光ファイバー通信における四光波混合のパルス幅依存性、学会名等：電子情報通信学会ソサイエティ大会、発表年月日：2008年9月19日、発表場所：明治大学（神奈川県）

発表者名：伊藤良峻、玉生卓也、沼居貴陽、発表標題：FDM光ファイバー伝送におけるFWM光雑音と光増幅器雑音によるシステム劣化の変調方式依存性、学会名等：電子情報通信学会ソサイエティ大会、発表年月日：2008年9月19日、発表場所：明治大学（神奈川県）

発表者名：S. Kojima and T. Numai、発表標題：Suppression of FWM Noises in FDM Lightwave Transmission Systems by Modified Repeated Unequally-Spaced Frequency Allocations、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2008年7月3日、発表場所：Cambridge (U.S.A.)

発表者名：T. Numai、発表標題：Suppression of FWM Noises in FDM Lightwave Transmission Systems by Frequency, Polarization, and Bit-Phase Allocations、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2008年7月3日、発表場所：Cambridge (U.S.A.)

発表者名：S. Kojima and T. Numai、発表標題：Influence of Frequency Allocations and Optical Filters on FDM Optical Fiber Communications、学会名等：Progress In Electromagnetics Research Symposium、発表年月日：2008年7月3日、発表場所：Cambridge (U.S.A.)

〔図書〕(計2件)

著者名：T. Numai、出版社名：Wiley-IEEE、書名：Laser Diodes and Their Applications to Communications and Information Processing、発行年：2010、総ページ数：390

著者名：T. Numai、出版社名：Research Signpost、書名：Optical Information Processing、発行年：2008、総ページ数：155（共著、担当ページ：73-113）

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：

出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://research-db.ritsumeai.ac.jp/Profiles/28/0002728/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼居 貴陽 (NUMAI TAKAHIRO)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：60261351

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：