

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06451

研究課題名(和文) 利得飽和型パラメトリック増幅器と非線形伝送路符号を適用した次世代光伝送方式の研究

研究課題名(英文) Research on next generation optical transmission systems with gain saturated parametric amplifiers and nonlinear transmission code

研究代表者

今宿 互 (Imajuku, Wataru)

近畿大学・産業理工学部・准教授

研究者番号：00530817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：非線形光学媒質の光パラメトリック過程における利得飽和現象を活用した利得飽和型光パラメトリック増幅器と非線形伝送路符号を波長多重コヒーレント伝送路に適用することで、当該伝送路の性能限界を与える光非線形位相雑音を抑制できることを理論的に示したものである。また、本研究期間において、二次非線形光学材料で構成された光導波路の光増幅特性、雑音特性解析を可能とする量子論的シミュレータを開発した。さらに、波長多重光ファイバ伝送路の非線形位相雑音の解析を可能とする小信号理論を展開し、光雑音伝搬に関する解析解を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネット利用の拡大に伴い通信トラフィック量は年率30%程度の割合で増大を続けており、将来を見据えた次世代大容量光ファイバ伝送方式の確立が社会的にも益々重要になっている。本研究は、非線形光学媒質の光パラメトリック過程における利得飽和現象を活用した利得飽和型光パラメトリック増幅器を波長多重コヒーレント伝送路に適用することで、光非線形位相雑音を抑制できる可能性を理論的に示したもので、将来の光ファイバ伝送システムのさらなる大容量化・長距離化の一助となり得る成果である。

研究成果の概要(英文)：This study theoretically shows that optical fiber transmission systems propagating nonlinear transmission code signals with gain saturated parametric amplifiers might improve system performance. In the process of this study, we developed a simulator that can analyze optical waveguides made with second-order nonlinear material based on quantum optic theory. Also, we derived analytical solution of transfer function for wavelength division multiplexed optical fiber transmission line for the first time.

研究分野：通信工学

キーワード：光ファイバ 光増幅 符号

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初においては、デジタルコヒーレント検波光ファイバ技術が実用化され、100 Gbit/s × 80~100 ch 程度の 10Tbps 級の大容量伝送システムが国内においても展開される状況となった。さらに、次世代システムとしてサブキャリア多重方式を応用した 400Gbit/s×n ch 方式のフィールド実験が報告されるなど、さらなる大容量化を実現するための研究開発が積極的に進められていた。一方、インターネットを中心とする通信トラフィックは年率 30% 程度の割合で増大を続けており、将来を見据えた次世代大容量光ファイバ伝送方式の確立が社会的にも益々重要視されている状況であった。

大容量光ファイバ伝送システムの伝送容量を改善する手段として光雑音の抑制が最重要テーマであるが、コヒーレント検波方式では特に非線形位相雑音の抑圧が特に重要である。

研究代表者は、このような状況の元、過去に自身で実証した光パラメトリック増幅器の利得飽和現象を活用した利得飽和光パラメトリック増幅器を活用することで、非線形位相雑音を抑制する可能性に着目した。理論的に非線形位相雑音の起源は、光ファイバ伝送路における非線形光学過程にあり、各チャネルの光信号強度雑音に起因する。つまり、非線形位相雑音の種となる光信号強度雑音を前述の利得飽和光パラメトリック増幅器により抑制しながら反復光増幅中継を実施することで、大容量光ファイバ伝送システムの高性能化を図る着想を得た。

### 2. 研究の目的

本研究期間で、非線形光学媒質の光パラメトリック過程における利得飽和現象を活用した利得飽和型光パラメトリック増幅器を波長多重コヒーレント伝送路に適用することで、当該伝送路の性能限界を与える光非線形位相雑音を抑制できることを示し、次世代光ファイバ伝送技術の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

利得飽和光パラメトリック増幅器の動作特性を評価するシミュレータを製作した。製作にあたり、入力信号光のみならず励起光とアイドラ光の量子光雑音、さらには光パラメトリック増幅器内部の光損失に伴う量子光雑音の混入も考慮に入れた量子論的なシミュレータを製作した。

次に利得飽和光パラメトリック増幅器の光ファイバシステムへの適用効果を解析する一手段として波長多重伝送系における小信号解析理論の構築を図った。その上で、利得飽和光パラメトリック増幅器と非線形符号(周波数変調光信号)を適用した多段光中継伝送路の性能見積りを実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 利得飽和光パラメトリック増幅器の動作特性解析

利得飽和光パラメトリック増幅器は、ニオブ酸リチウム光導波路などの二次非線形光学材料と石英光ファイバなどの三次非線形光学材料で実現する方法の二種類がある。解析的な理論解析の結果、三次非線形光学材料では、利得飽和条件において信号光強度雑音の抑圧が可能であるが、利得飽和条件における励起光電力の変動が、信号光位相への変動に転化されることを見出した。そこで、本研究では、二次非線形光学材料のニオブ酸リチウム光導波路に着目し、製作したシミュレータで数値解析を行った。

図 1 (a) は、励起光電力 0.3 W, 0.5 W, 0.7 W 時の周期的分極反転ニオブ酸リチウム導波路の光増幅特性を示している。光増幅特性から入力信号光電力を 10mW にブースト後、ニオブ酸リチウム光導波路に信号光を入力すると利得飽和が発生する可能性が示されている。この動作条件において、ニオブ酸リチウム光導波路の雑音電力を量子論的に評価し、信号対雑音比の改善量を数値解析した。信号対雑音比の改善は、線形光増幅条件では起きえない利得飽和条件特有の現象である。図 1 (b) は増幅信号光を直接検波した場合の信号対雑音比の改善量である。振幅雑音が除去され信号対雑音比が改善することが分かる。図 1 (c) は増幅信号光を位相検波した場合の信号対雑音比の変化量を示す。位相方向については、信号対雑音比の改善効果は見られない。つまり、位相方向については、線形増幅器のように振る舞うことが期待される。

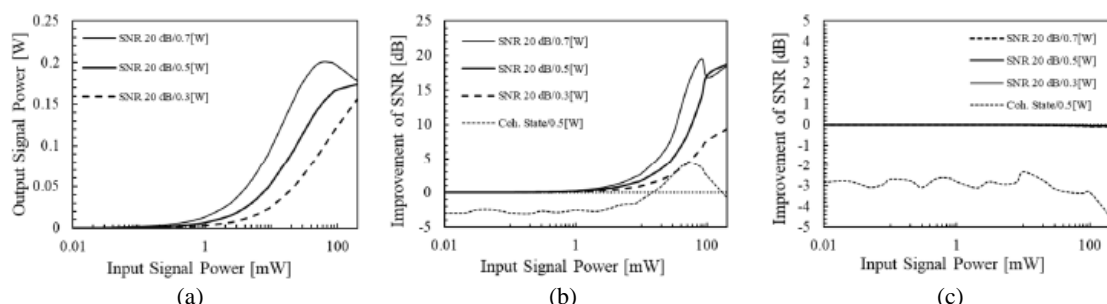


図 1 利得飽和光パラメトリック増幅器の動作特性 (a) 光増幅特性, (b) 強度検波時の信号対雑音比の変化, (c) 位相検波時の信号対雑音比の変化

## (2) 波長多重伝送系における小信号解析理論の構築

光ファイバ伝送路の分散ならびに非線形光学効果の影響を加味した信号対雑音比の予測手法として小信号解析法が存在する。しかしながら、これまでに開発された小信号解析法は、1波長 ch 光ファイバ伝送路を対象としたものであった。本研究期間では、波長多重伝送条件における小信号理論を構築し、小信号成分（雑音成分に相当）の光ファイバ伝送路における伝達関数の解析解を導出した。従来の小信号解析理論によると、光ファイバの分散が負 ( $\beta_2 < 0$ ) の値となる異常分散条件において光信号側波帯の特定周波数において雑音成分の指数関数的な増大が発生する変調不安定とよばれる現象がある。導出した解析解によると、当該変調不安定の発生周波数が波長多重数に比例して増大し、より広帯域に光雑音が増強されることが新規に示された。

図2は、導出した解析解の数値例を示す。図2(a)は、異常分散条件、具体的にはシングルモード光ファイバのCバンド帯伝送時 ( $\beta_2 = -21.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ )、分散シフト光ファイバのLバンド帯伝送時 ( $\beta_2 = -3.0 \text{ ps}^2/\text{km}$ ) を示す。波長多重数が増加するにつれて変調不安定性が発生する周波数帯も増加することが確認できる。図2(b)は、正常分散条件、具体的には同Sバンド帯伝送時 ( $\beta_2 = +3.0 \text{ ps}^2/\text{km}$ ) の数値例である。(比較としてLバンド帯伝送時の結果も併記) 数値例では、1mW程度の光信号電力条件では正常分散領域においては、側波帯の雑音電力の増大帯域幅が狭く、変調不安定性の発生を避けることができることが示されている。図2(c)は、信号対雑音比と中継器段数の関係（中継器間隔 80km）での結果を示している。多波長条件では、信号対雑音比の急激な劣化を示している。これは、理論式の導出過程において各波長 ch の群速度差を0と近似した影響であると推察され、構築した理論の補正が必要であることを示唆している。

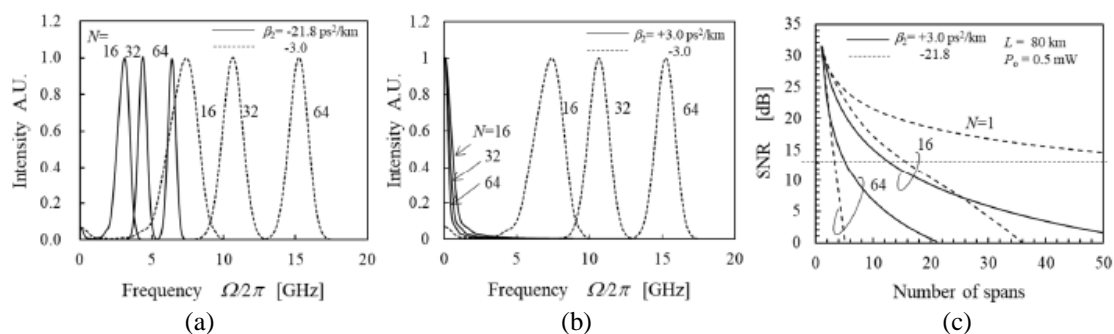


図2 多重光伝送時における小信号理論の解析例 (a)異常分散条件の雑音スペクトル, (b)正常分散条件の雑音スペクトル, (c)信号対雑音比と中継器段数の関係

## (3) 小信号理論を適用した利得飽和光パラメトリック増幅伝送システムの性能解析

前述の研究成果を活用し、利得飽和パラメトリック光増幅器と非線形伝送路符号を適用した多中継光ファイバ伝送路の信号対雑音比を解析した。ここで、シングルモード光ファイバ伝送路を仮定し損失係数  $-0.25 \text{ dB/km}$ 、分散係数  $\beta_2 = -21.8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、非線形係数  $\gamma = 1.30 \text{ 1/W/km}$ 、光増幅中継器を 80km 間隔で配備した場合を仮定し、光増幅中継器に利得飽和パラメトリック光増幅器 (GSPA) とエルビウム添加ファイバ光増幅器 (EDFA) を用いた場合の比較を行った。

図3(a)は、信号対雑音比の中継器段数依存性を示す。ここで、 $N$ は波長多重数を示す。結果からも明らかなように、利得飽和パラメトリック光増幅器を適用した場合の信号対雑音比が高く、急激に信号対雑音比が劣化する波長多重数  $N=64$  を除くと波長 ch 数が増えると改善効果が大きくなる可能性が確認された。図3(b)は、1chあたりの光増幅器出力信号電力と伝送可能中継器段数の関係を示す。波長 ch 数が増えると利得飽和パラメトリック光増幅器による改善効果が大きくなる傾向があることがより顕著に確認された。

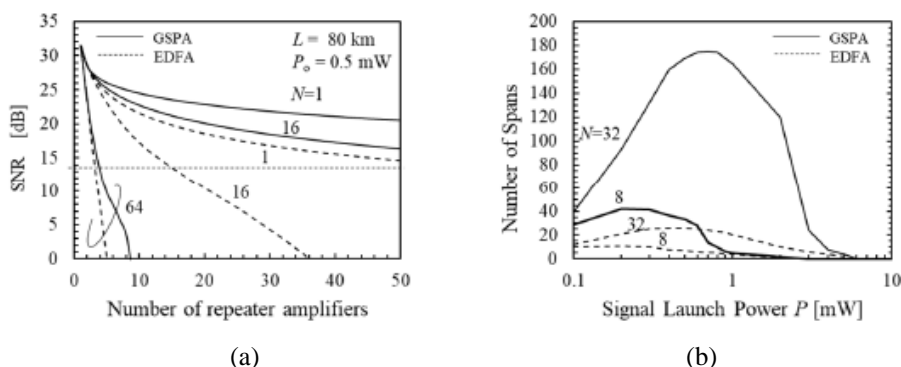


図3 光ファイバ伝送システムの信号対雑音比特性 (a)中継器数に対する依存性 (1chあたりの光増幅器出力信号電力 0.5 mW), (b)光増幅器出力信号電力 (1chあたり)に対する依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takuya Takemura, Shun Noguchi, Kunihiko Mori, Mitsunori Fukutoku, and Wataru Imajuku
2. 発表標題 Quantum Noise Analysis of Gain Saturated Periodically Poled Lithium Niobate waveguides
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Imajuku, Kunihiko Mori, and Mitsunori Fukutoku,
2. 発表標題 XPM-induced phase noise mitigation by gain saturated parametric amplifiers
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Imajuku, Kunihiko Mori, and Mitsunori Fukutoku
2. 発表標題 Analytical fiber transfer function with XPM-induced process in N-channel coherent WDM transmission systems
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 穂高, 村松優法, 今宿 互
2. 発表標題 光ファイバ線路における小信号解析法の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今宿 互
2. 発表標題 WDM光伝送システムにおける相互位相変調雑音の小信号解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岳村 拓也, 野口 駿, 今宿 互
2. 発表標題 利得飽和PPLN 光増幅器の雑音特性解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今宿 互, 野口 駿, 岳村 拓也, 森 邦彦, 福德 光師
2. 発表標題 利得飽和パラメトリック光増幅器を用いた非線形位相雑音の抑圧
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Imajuku, Takahiro Nakaishi, Mikiya Kakoi, Kunihiko Mori, and Mitsunori Fukutoku
2. 発表標題 Nonlinear Phase Noise Reduction by Gain Saturated Parametric Amplifiers in Coherent Optical Transmission
3. 学会等名 Nonlinear Optics (NLO) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----