

機関番号：17501

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20360175

研究課題名 (和文) 絶対位相制御光周波数コムによるマルチ光周波数基準の発生と
光周波数同期網への展開研究課題名 (英文) Generation of Optical frequency comb reference based on
carrier-envelope offset phase locking technologies and its
application to optical frequency synchronous photonic network

研究代表者

古賀 正文 (KOGA MASAFUMI)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：60448545

研究成果の概要 (和文)：2030 年に 3 桁増加が予想される通信トラフィック需要を支えることのできる新しい光ファイバ通信ネットワーク技術として光周波数同期網の概念提案を行い、基礎をなす高周波数確度光周波数コム基準生成に取り組んだ。光周波数が Hz 程度で確からしい 10^{-14} を目標として掲げ、それを可能とする Carrier-envelope offset phase 制御光発生を目指し、半導体レーザ光源による最もハードルの高いオクターブ光発生を達成した。

研究成果の概要 (英文)：

Data traffic is continuing to grow steadily at the rate of 20 to 40% per year even though the world economy remains stagnant. The projected demand traffic reaches Exa-bit/s network throughput. In response to this growing demand traffic, our project proposed the concept of optical frequency synchronous photonic network based on carrier-envelope offset phase (CEP) locked frequency comb. Octave-spanning super-continuum light was achieved by 100fsec pulse-train seeded from laser diode.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2009 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：光通信

科研費の分科・細目：電気・電子工学

キーワード：通信方式 (無線、有線、衛星、光、移動)、量子エレクトロニクス、レーザ

1. 研究開始当初の背景：

(1) フォトニックネットワーク技術の進展：PN は、実用化技術において近年 2 つの大きな技術的ブレークスルーを果たした。ひとつには、光スイッチ技術、もう一つには、DQ

PSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) 変調方式の実用化である。前者は、ROADM (Reconfigurable Add/Drop Multiplexing) システムに採用され世界の主要通信キャリアが導入を進めている。後者は、40

Gbit/s伝送システムとしての実用化である。伝送技術に閉じていた光通信の実用化技術が、ネットワーク (NW) 技術に展開され、光位相変調技術が実用化というハードルを越えたという点で両者ともに意義深い。

2つの実用化におけるブレークスルーを経て、PNの研究開発は新しい局面を迎えていた。光ファイバ伝送技術では、光位相制御を採用した符号の多値化に関する論文発表が相次ぐとともに、光位相を使った波形等化技術も開発競争が激しくなるなど、コヒーレント伝送技術の復活が著しい。

(2) 光周波数計測技術の進展とIEC標準への提案: 1990年代中頃以降にWDM伝送システムの導入が進む中で、ITU-Tにおいて光周波数グリッドが規定され、通信帯光周波数計測技術は大きく進展した。本研究は、光通信システム用マルチ光キャリア光源として 10^{-12} 以下の確度・安定度を指すものである。応募者等は、1990年代後半より光周波数計測の必要性を唱え、モードロック半導体レーザによる光コム発生の研究を進め、その後Supercontinuum(SC)光源による計測へと展開させた。

(3) キャリアエンベロープ位相ロック (CEP) 技術: 光の「ものさし」として光の絶対周波数を計測可能としたCEP制御光コムの発明は、米国NIST J. Hall氏、独マックスプランク研究所 T. W. Hänsch氏等によって先行推進され、2005年にノーベル物理学賞が授与された。1960年代に始まったレーザ光周波数の高精度な計測に関わる研究開発は、CEP制御光コムの発明によって大きな飛躍を遂げたのである。CEP制御光コムはモード同期レーザが発する超短光パルスのキャリアエンベロープ位相 (CEP) を正確に制御したパルス列であり、パルス繰返し時間Tの逆数の周波数 f_{rep} で正確に光周波数スペクトル

を刻む。絶対光位相を安定制御することにより光周波数の位相揺らぎを抑圧でき、正確な光周波数計測が可能となる。

2. 研究の目的

本研究は、半導体レーザ光を種として f-to-2f 自己参照干渉法によるキャリアエンベロープ位相 (CEP) 制御光周波数コム (光コム; comb) を発生させて、光コムに位相同期させた光通信帯サブ kHz 線幅高コヒーレンスマルチ光周波数キャリアを生成し、当該マルチ光周波数キャリアによってもたらされる光周波数同期フォトニックネットワーク (PN) の可能性を追求するものである。本期間では半導体レーザによる CEP 制御光コムを光周波数基準として発生させ、光位相同期したマルチ光周波数キャリアを生成し、光周波数同期 PN の概念の下で雑音特性に優れた位相感応増幅 (PSA ; Phase Sensitive Amplification) による再生無中継距離の一桁拡大を目指した基礎検討を行なうことを目的としている。

3. 研究の方法

光周波数同期 PN の概念の実証へ向けて、本研究期間では次の3つの課題 ; (1) 半導体レーザを種とする CEP 制御光コムによる光周波数基準の発生、(2) CEP 制御光周波数基準へ同期した位相感応型マルチ光周波数キャリア増幅伝送、に取り組む。(1) では、応募者等が別途受託して進めている「光位相同期多波長光源広帯域化チェーン技術の研究開発」の成果を種光源として活用し、CEP 制御光周波数基準の発生を目指す。(2) では、マルチ光周波数キャリアに対する位相感応型増幅伝送実験を推進する。

4. 研究成果

(1) 半導体レーザを種とする CEP 制御光コムによる光周波数基準の発生 :

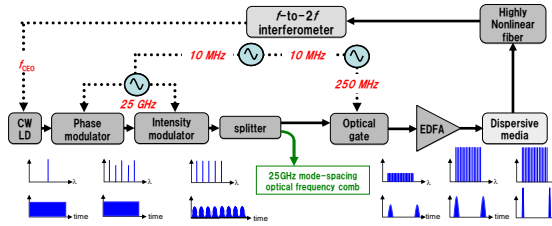


図1 25GHz モード間隔 CEP 制御光発生へ向けた我々の提案構成

①構成の提案 : 位相変調器、分散圧縮媒体ならびに光ゲート分周の組合せによる光周波数コム発生構成を米国光学会/IEEE Photonics Society 主催 CLEO にて提案し、250MHz 周波数間隔程度が既存の発生技術の限界であるのに対して 100 倍にあたる 25GHz 間隔光周波数コム発生機構として一定の評価を得た。構成を図 1 に示す。通信装置を局へ配備できるように、半導体レーザ光源を採用して CEP 制御光を発生させるための構成を開発方針として掲げた。

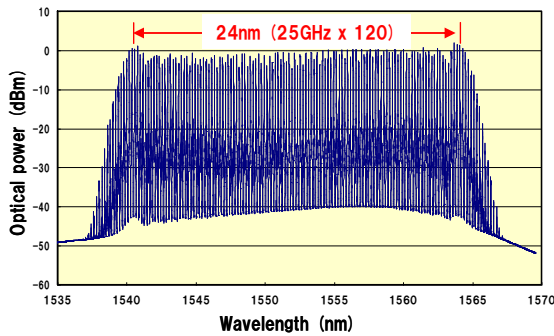


図2 25GHz モード間隔 120 チャンネル

②25GHz 光周波数基準コム : 本構成による光周波数基準コムの様子を図 2 に示す。線スペクトルが 25GHz 間隔で 120 本、24nm の波長範囲で均一に広がっているのが分かる。ITU-T で標準化されている光周波数グリッド規定の中の一つである 25GHz 間隔によるコム(Comb)の様子を示している。中心波長はアンカー周波数である 1552.52nm(193.1THz)にある。なお、

CEP ロック前の状態である。通信用 LD 光源をこの光周波数コム基準へ光 PLL ロック

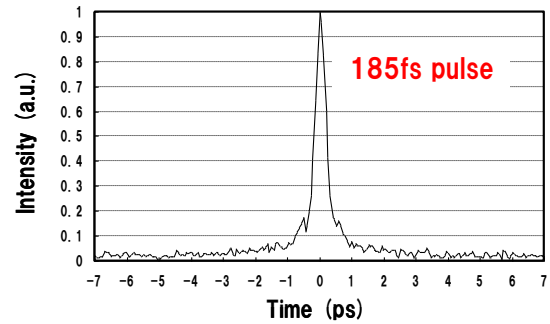


図3 分散圧縮によって得られた 185fsec 短パルスの自己相関波形

クすることによって、Hz オーダでの周波数同期網を確立することができる。

③185fsec パルス発生 : 本スペクトルを通常光ファイバによる分散圧縮を行なった結果、185fsec の短パルス発生に成功した。得られた短パルスを図 3 に示す。あくまでも 25GHz 繰返し周波数でのパルス波形である。パルスピーク値を高めるために光ゲートによって 1/100 繰返し周波数まで分周を行い、1-2W 平均出力クラス光増幅器によって増幅する。

④Supercontinuum オクターブ光の発生 : パルス圧縮と高出力化光増幅によってパルスピーク強度を高め、高非線形定数を有するテラライト光ファイバへ入力することによって 1 オクターブの広がりを持つ Supercontinuum 光が得られた。その結果を図 4 に示す。約 20dB 低下の位置でオクターブ光広がりが得られたのが分かる。

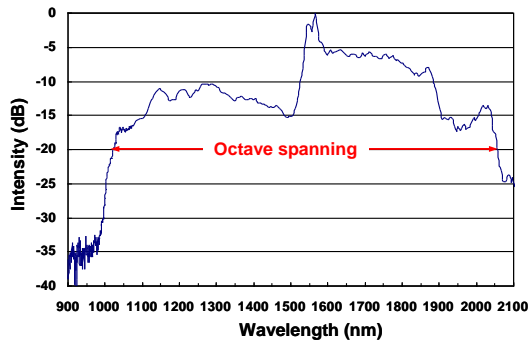


図4 オクターブの拡がり示した Supercontinuum 光のスペクトル

(2) CEP 制御光周波数基準へ同期した位相感応型マルチ光周波数キャリア増幅伝送

CEP による安定な信号光-PSA 励起光間位相同期を前提として、光 BPSK 信号の再生中継間隔を数値シミュレーションした。伝送速度 10 Gbit/s、増幅中継間隔 80 km、伝送路ファイバ非線形係数 1.92 W/km、分散 3ps/nm/km とした場合の再生中継間隔の送信光パワ依存性を図 5 に示す。PSA の瞬時パワに対する利得飽和効果が距離延伸効果に大きな効果を有しており、3dB 飽和出力パワが送信パワの 10 倍のとき、再生中継間隔が約 1 万 km と従来の 10 倍以上に距離が延伸する。

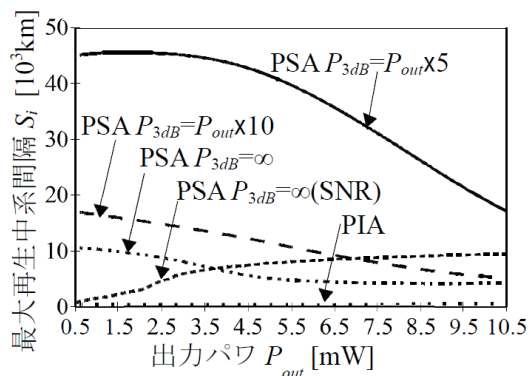


図 5 PSA 中継による再生中継間隔(計算)

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 2 件)

- ① A. Ishizawa, T. Nishikawa, S. Aozasa, A.

Mori, O. Tadanaga, M. Asobe, and H. Nakano, "Efficient carrier-envelope offset locking with a simplified configuration of an f-to-2f interferometer", 査読有, Japanese Journal of Applied Physics Vol.50, No.2, 2011, pp.022502-1--022502-4

- ② A. Ishizawa, T. Nishikawa, A. Mizutori, H. Takara, S. Aozasa, A. Mori, H. Nakano, A. Takada, and M. Koga, Octave-spanning frequency comb generated by 250-fs pulse train emitted from 25 GHz externally phase-modulated laser diode for carrier-envelope-offset-locking, 査読有, Electron.Lett., Vol.46, Issue19, 2010, pp.1343-1344

[学会発表] (計 13 件、内 5 件招待講演)

- ① M.koga, A. Takada, A. Ishizawa, T. Nishikawa, and H. Takara," Proposal of Optical Frequency Synchronized Photonic Network based on Carrier-Envelope Offset Phase Locked Frequency Comb," Korea-Japan workshop on beyond 100Gbit/s, to be held in Jeju, Korea, June, 2011 [Invited].
- ② 石澤淳、西川正、水島明、高良秀彦、青笹真一、森淳、寒川哲臣、中野秀俊、高田篤、古賀正文、25 GHz モード間隔キャリアエンベロープオフセット周波数ロック光周波数コムのためのオクターブ光発生、レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会、2011 年 1 月 9 日、電気通信大学
- ③ 石澤淳、西川正、水島明、高良秀彦、青笹真一、森淳、寒川哲臣、中野秀俊、高田篤、古賀正文、25 GHz 位相・強度変調で得られた短パルス光によるオクターブ光発生、第 71 回応用物理学会学術講演会、2010 年 9 月 16 日、長崎大学

- ④ 石澤淳、西川正、水鳥明、高良秀彦、中野秀俊、高田篤、古賀正文、25 GHz 間隔通信波長帯光コムのカリヤエンベロープ制御へ向けて [招待講演]、第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会、2010 年 8 月 20 日、慶応義塾大学
- ⑤ Tadashi Nishikawa, Atsushi Ishizawa, Akira Mizutori, Hidehiko Takara, Hidetoshi Nakano, Atsushi Takada, Masafumi Koga, Approach to achieving a wider mode spacing carrier-envelope phase-locked frequency comb at telecommunications wavelength region [Invited], The 2th Shanghai Tokyo Advanced Research Symposium on Ultra Intense Laser Science, 2010 年 5 月 27 日, Xiamen (China)
- ⑥ Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Akira Mizutori, Hidehiko Takara, Shinichi Aozasa, Atsushi Mori, Hidetoshi Nakano, Atsushi Takada, Masafumi Koga, New Approach to Achieving a Carrier-Envelope Phase-Locked Frequency Comb with 25-GHz Mode Spacing, Conference on Lasers and Electro-optics, 2010 年 5 月 19 日, San Jose (USA)
- ⑦ 石澤淳、水鳥明、高良秀彦、西川正、青笹真一、森淳、中野秀俊、高田篤、古賀正文、高繰り返し CEP 制御光コム実現に向けたオクターブ光発生、第 70 回応用物理学会学術講演会、2009 年 9 月 10 日、富山大学
- ⑧ Atsushi Ishizawa, Tadashi Nishikawa, Shinichi Aozasa, Atsushi Mori, Yousuke Hiraki, Osamu Tadanaga, Masaki Asobe, and Hidetoshi Nakano, Efficient Carrier Envelope Offset Locking for a Frequency Comb by Modifying a Collinear f-to-2f Interferometer, Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009 年 6 月 2 日
- ⑨ 石澤淳、西川正、青笹真一、森淳、開洋介、忠永修、遊部雅生、中野秀俊、コリニア f-2f 干渉計改善による光コムの高効率なカリヤエンベロープオフセットロック、第 56 回応用物理学会関係連合講演会、2009 年 3 月 31 日、筑波大学
- ⑩ 三好俊平、橋本佳祐、高田篤、”位相感応型光増幅中継を用いた BPSK 多中継伝送系の再生中継間隔のシミュレーション検討”、電子情報通信学会光通信システム研究会技術研究報告 2011 年 1 月 28 日、徳島大学
- ⑪ 三好俊平、橋本佳祐、高田篤、”位相感応型光増幅中継を用いた BPSK 多中継伝送系の再生中継間隔のシミュレーション検討”、2011 年電子情報通信学会総合大会 2011 年 3 月 17 日 (東京都市大学)
- ⑫ 高田篤、古賀正文、”コヒーレント光通信用位相感応型光増幅器”、2011 年電子情報通信学会総合大会 2011 年 3 月 15 日 (東京都市大学) [招待講演]
- ⑬ 古賀正文、高田篤、水鳥明、石澤淳、西川正、高良秀彦、“カリヤ・エンベロープ・オフセット位相ロック光周波数コムを基準とする光周波数同期網の提案”2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、9 月 13 日 [招待講演、予定]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 正文 (KOGA MASAFUMI)
大分大学・工学部・教授
研究者番号：60448545

(2) 研究分担者

西川 正 (NISHIKAWA TADASHI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研
究所・量子光物性研究部・主幹研究員

研究者番号 : 20374069

石澤 淳 (ISHIZAWA ATSUSHI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研
究所・量子光物性研究部・研究主任

研究者番号 : 30393797

高田 篤 (ATSUSHI TAKADA)

徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス
研究部・情報ソリューション部門・計算機
システム工学・教授

研究者番号 : 00548563

水鳥 明 (AKIRA MIZUTORI)

大分大学・工学部・助教

研究者番号 : 10190646