

1 THzビート信号光を発生する光位相同期ループの開発

Development of an Optical Phase-Locked Loop for 1-THz Optical Beat Signal Generation

高坂繁弘^{*} 小関泰之^{*2} 並木周^{*3} 坂野操^{*4} 味村裕^{*}
Shigehiro Takasaka Yasuyuki Ozeki Shu Namiki Misao Sakano Yu Mimura

概要 大容量通信を支えるため光通信の高速化が進んでおり、将来の160 Gbit/sを越える通信速度においては高速な信号処理が可能である全光信号処理技術の実現が期待されている。そこで我々は信号処理に不可欠であるクロック信号光源として、1 THzと高速なビート信号光を発生することができる光位相同期ループ(optical phase-locked loop: OPLL)を開発した。本OPLLは、ビート光源と全光位相比較器により構成され、簡素な構成を実現するためにビート光源には2台の3電極分布帰還型半導体レーザを用い、全光位相比較器としてシリコン雪崩フォトダイオード中の二光子吸収効果を用いた。繰り返し周波数40 GHzの光パルス列に対する同期特性を測定した結果、本OPLLが160 GHzビート信号光と1 THzビート信号光をそれぞれ126 fs(0.016 rad²)と28 fs(0.03 rad²)と低いタイミングジッタで同期できることを確認した。

1. はじめに

通信システムにおいてデータ信号からクロック信号を抽出し再生する技術は、欠かせない技術の一つである。クロック信号が時間基準を与えることで、中継点でのデータ信号整列や、受信器でのデータ認識を正確に行うことができるからである。現在の光通信システムでは、光信号はフォトダイオードにより電気信号に変換された後に、電気信号処理でクロック信号再生が行われている。

一方で、大容量な情報を伝送するために光通信速度の高速化が進行しており、将来の160 Gbit/sを越えるような光通信速度では電気的に信号処理することが困難とされている。高速な信号処理が可能である全光信号処理を行うためにはクロック信号光が欠かせないため、光学的なクロック信号再生技術が重要なになってきている。

160 GHzを越える超高速クロック信号光を発生する技術を実現する光源として、モードロックレーザダイオード(laser diode: LD)を用いる方法¹⁾や低繰り返し周波数のモードロックレーザを時分割多重する方法²⁾が提案されている。しかしながら、これらの方法はそれぞれ、モードロックLDの製造に高度な技術が必要、構成が複雑で光損失が多いなどの課題がある。

ところで、2つの異なる波長の連続光を合波し干渉することでビート信号光を発生する技術がある。この技術の特長は、

構成が簡素であり、電気デバイスの帯域に制限されず高い繰り返し周波数のビート信号光を発生できる点にある。この技術の特長を利用し、光ファイバを用いた光パルス圧縮技術を応用することで、最大1 THzと高い繰り返し周波数の光パルス列を発生した実験が報告されている³⁾⁻⁵⁾。

ビート信号光をクロック信号光として用いるためには、ビート信号光が外部信号光に対して同期している必要がある。ビート信号光を外部同期する方法として光位相同期ループ(OPLL)技術を用いる方法がある。ただし、従来のOPLLにおいて出力ビート信号光の周波数の上限は、構成する要素である電気位相比較器やフォトダイオードの帯域に制限されていた⁶⁾。一方で、電気デバイスの帯域に制限されない位相比較方式として、全光位相比較器があり、全光位相比較器を用いて超高速信号光に同期した10 GHzのRF信号を発生できることが報告されている⁷⁾。我々は、この全光位相比較器をOPLLに導入することで、160 GHzを越える超高速ビート信号光の外部同期が可能と考え、技術開発を進めてきた^{8), 9)}。

本稿では、全光位相比較器を用いるOPLL技術により超高速ビート信号光を外部同期できることを示す。最初に動作原理と設計指針を示し、次に160 GHzビート信号光の外部同期実験結果^{8), 9)}を報告する。そして、このOPLLの超高速性を実証するために1 THzビート信号光の外部同期実験結果¹⁰⁾を報告する。この実験結果を通じて、本OPLL技術は超高速クロック信号光を発生できることを示す。

2. OPLLの動作原理

全光位相比較器を用いるOPLLの原理構成を図1に示す。大きく分けて3つの構成要素からなる。1つはマスタLDとスレー

* 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

*2 科学技術振興機構さきがけ(現在 大阪大学)

*3 現在 産業技術総合研究所

*4 研究開発本部 横浜研究所

PLDにより構成されるビート信号光源、1つはシリコン雪崩フォトダイオード(silicon avalanche photodiode: Si-APD)を用いた全光位相比較器、そして、ループフィルタである。ここで、ビート信号光の周波数は2つのLDが出力する連続光の差周波数に一致する。

ビート信号光の外部信号光に対する同期動作は次のとおりである。

- (1) 全光位相比較器においてビート信号光と外部信号光のタイミングの差である位相誤差を検出し、位相誤差信号を出力する。
- (2) 位相誤差信号をループフィルタで整形後、スレーブLDに負帰還し、位相誤差信号の値がゼロになるように出力波長すなわちビート信号光の周波数を制御する。

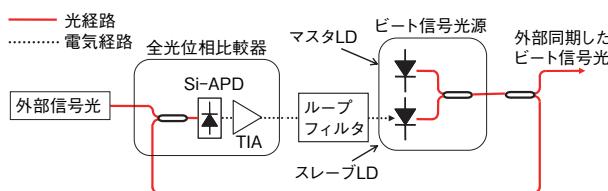


図1 OPLLの原理構成(実線と点線は、それぞれ光経路、電気経路)

Schematic configuration of OPLL. (Solid and dotted lines are optical and electric paths, respectively)

全光位相比較器の動作原理は次のとおりである。その概略を図2に示す。

- (1) 偏波を一致させたビート信号光と外部信号光を合波してSi-APDに入力する。
- (2) Si-APDが、位相誤差量に応じた光電流を発生し、電流増幅器(trans-impedance amplifier: TIA)で電流を電圧に変換する。
- (3) TIAの出力電圧から位相誤差信号に無関係であるオフセット電圧を差し引く。

ここで注意したいのは、Si-APDは波長1.5 μm帯の光にはほとんど感度を示さないため、ほぼ二光子吸収効果(two photon absorption: TPA)によってのみ光電流を発生する点である。TPA効果は、非共鳴な非線形光学効果であるため100 THz以上の応答速度を有し、実用上、入力信号の速度に制限を与えない。また、図2に示すように、発生した光電流を位相誤差信号として扱えるのは、TPAに誘起される光電流の発生量が、ビート信号光と外部信号光が同時に投入した時が最大で、両信号光のタイミング差が大きくなるに従い減少するからである。本稿では、光電流の最大値と最小値の中間値を位相誤差量ゼロと設定し同期実験を行っている。なお、光電流が発生する周波数はビート信号光の周波数と同じで160 GHz以上と高速であるが、光電流はSi-APD素子それ自体やTIA中の電気容量で積算されるため、出力される位相誤差信号の帯域は電気的に処理できる程度に狭くなる。

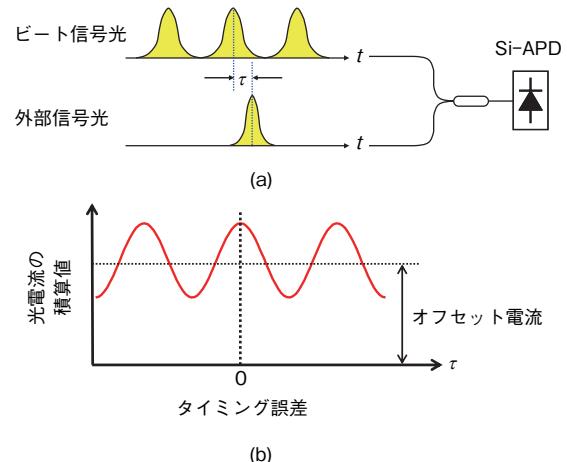


図2 Si-APDにおける全光位相比較の動作原理の概略

(a) : ビート信号光と外部信号光のタイミング誤差の定義

(b) : タイミング誤差に対する光電流の積算値

Operation principle of all-optical phase-detector using a Si-APD.

(a) : Definition of timing error τ between optical beat signal and external optical signal,

(b) : An example of integrated photocurrent as a function of timing error τ .

時間精度の高い同期ビート信号光を発生するには、その指標となるタイミングジッタの削減が必要である。そのためには、OPLLのループ帯域がLDの線幅に比較して十分広帯域でなければならない⁶⁾。この状況を実現するために、本稿では3電極分布帰還型(distributed feed-back: DFB) LDをビート光源に採用した。その概略を図3に示す。3電極DFB-LDは、細い線幅を保ったまま広帯域なFM応答特性を有する特長を持つとともに、通常のDFB-LDの上部電極を単純に3分割したものであるため市販されているDFB-LDとほぼ同じ工程で製造でき、製造が容易であるため、スレーブLDとして適しているからである¹¹⁾。実際に試作した3電極DFB-LDは、約250 kHzと細い線幅と100 MHz以上のFM応答帯域を示した。3電極DFB-LDの駆動は、図3に示すように、各電極に定電流源を接続し線幅が最も小さくなるように駆動電流量を調節した。また、出力波長の変調は中心電極に重畠させた変調信号を行った。なお、このDFB-LDの線幅が細いことからマスタ LDにも本DFB-LDを用いた。

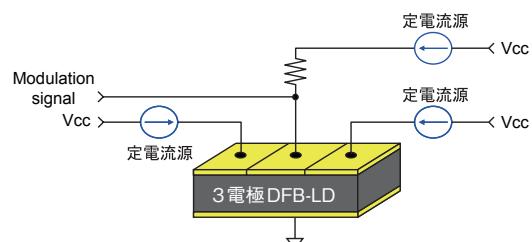


図3 3電極DFB-LDの配線概略
Wiring diagram of three-electrode DFB-LD.

ビート信号光源に用いるLDの線幅が決まると、タイミングジッタを削減するために必要なループ帯域が決まる。実際、線幅が250 kHzのLDをビート光源で用いる場合、低いタイミングジッタを実現するためには少なくとも10 MHzを超えるル

普帯域が必要となる。このループ帯域は、文献7のSi-APDを用いるPLLのループ帯域6 kHzに比較して3桁大きい。ループ帯域の広帯域化にはTIAの広帯域化が必要となるが、同時に広帯域な熱雑音が位相誤差信号に重畳するため、TIAの帯域を広帯域にするほど信号雑音比(signal-to-noise ratio: SNR)が劣化する。そこで、同期動作に必要なSNRを維持したまま広帯域化するために、入力信号光の平均パワーの増大、TPA効率を増加させるためにSi-APDにおける入力信号光のスポットサイズを4.3 μmに絞るなどの対応を行った。

更に、ループ帯域が広帯域であるため、ループ遅延時間がループ帯域や位相余裕を制限する大きな要因となる^{6), 12)}。ここで、ループ遅延時間とは位相誤差信号がOPLL内のループを伝搬するのにかかる時間である。本OPLLでは、図4の点線で囲まれているループを構成している要素を空間光学系を用いてサイズ145 × 44 × 110 mm³にモジュール化した。図5にOPLLモジュールの外観を示す。本モジュールのループ遅延時間は約1 nsであり、100 MHz以下のループ帯域に対してループ遅延時間は無視できる程度である。

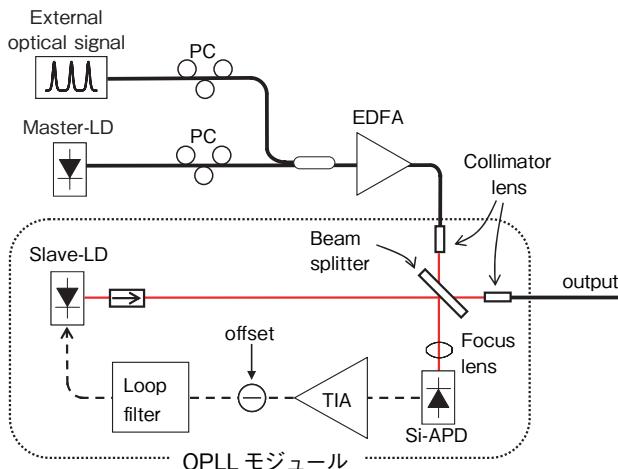


図4 OPLLの構成 (EDFA : erbium-doped fiber amplifier, PC : polarization controller)
Configuration of OPLL.

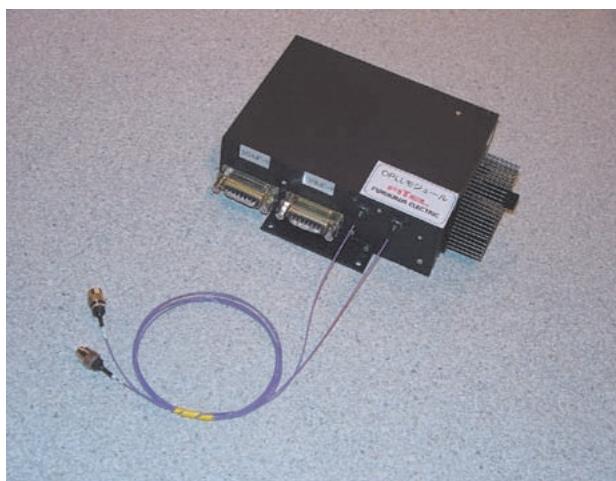


図5 OPLLモジュールの外観
Appearance of OPLL module.

3. 同期実験

3.1. 160 GHzビート信号光の外部同期実験

本OPLLにより160 GHzビート信号光の外部同期が可能であること、及びビート光のタイミングジッタ量を確認するために、160 GHzビート信号光の外部同期実験を行った⁹⁾。

外部信号光として、中心波長1540 nm繰り返し周波数40 GHzパルス幅2 psの光パルス列を用いた¹³⁾。本外部信号光のパルス幅は、160 Gbit/s信号光で用いられるパルス幅に相当している。160 GHzビート信号光を発生するようにマスタLDとスレーブLDの波長をそれぞれ、1557.7 nm, 1559.0 nmにした。Si-APDにおける入力パワーは、参照信号光 200 mW、マスタ LD: 50 mW、スレーブ LD: 3 mWである。TIAのトランスインピーダンスを5 kΩとし、帯域はおよそ80 MHzに設定した。ラグリードタイプのループフィルタを用い、ループ帯域は~20 MHzに設定した。

OPLLの同期動作を確認するために、ビート信号光と外部信号光の相互相關測定を行った。測定系の構成を図6に示す。160 GHzビート信号光と外部信号光の相互相關の検出にはSi-APDを用いた。ここで、160 GHzビート信号光はOPLLの出力光から2段の光フィルタを用いて取り出した。ビート信号光と外部信号光の相対時間は光遅延線により掃引している。図7に示すように、6.25 ps周期の正弦波が明瞭に見て取れ、ビート信号光が外部信号光に同期していることが分かる。

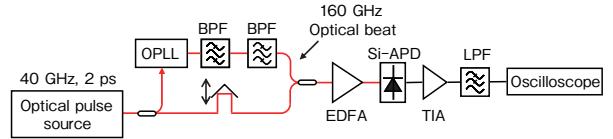


図6 相互相關測定系の構成 (赤線: ファイバ光学経路、青線: 電気経路) (BPF : band-pass filter, LPF : low-pass filter)
Configuration of a cross-correlation measurement system. (Red and blue lines are optical and electric paths, respectively)

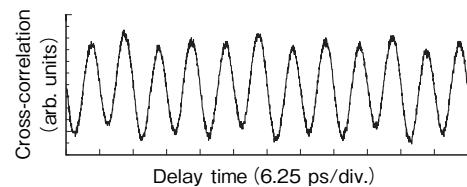


図7 160 GHzビート信号光と40 GHzパルス光の相互相關波形
Waveform of cross-correlation between 160 GHz optical beat signal and 40 GHz optical pulse train.

ビート信号光の位相雑音を測定するために、OPLL出力光をSi-APDとTIAを用いる位相誤差検出器とオシロスコープとRFスペクトラムアライザで測定した。図8に測定した160 GHzビート信号光の位相誤差信号波形を示す。同期動作を行っていないときはランダムに位相誤差信号が広がっているのに対して、同期動作により位相誤差がゼロに集中することからも同期動作を確認できる。図9に160 GHzビート信号光の位相雑音

スペクトルを示す。これは、RFスペクトラムアナライザを用いて測定した位相誤差信号のパワースペクトルをフリーランニング時の位相誤差信号のパワーで規格化したものである。なお、規格化に用いたパワーは、オシロスコープを用いて測定した位相誤差信号の振幅を基に計算した。DFB-LDの線幅から計算されるフリーランニング時のスペクトルに対して、位相雑音スペクトルは10 MHzよりも低周波領域において位相雑音が低減していることからも、同期動作を確認できる。位相雑音量は位相雑音スペクトルを積分し定数をかけることで得られる。同期動作時の値から背景雑音の値を差し引くことで、OPLLにより付加される位相雑音量が分かる。その結果、位相誤差信号の分散値とタイミングジッタは、それぞれ0.016 rad², 126 fsであることが分かった。

一方で、OPLLモジュール製作前に予備実験としてループ遅延時間が5 nsのOPLLを用いて160 GHzビート信号光の同期実験を行っている⁸⁾。このOPLLが出力する160 GHzビート信号光のタイミングジッタは291 fsであった。のことより、ループ帯域が広帯域であるOPLLにおいて低タイミングジッタの実現にはループ遅延時間の短縮が重要であることが確認できた。

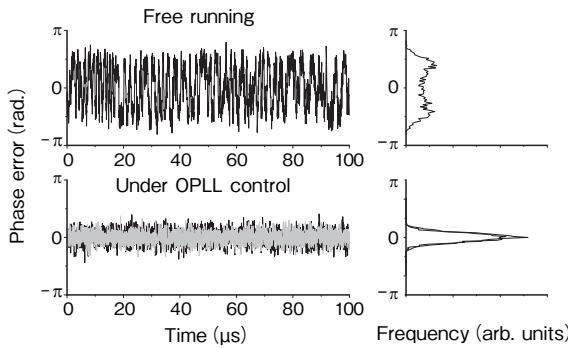


図8 160 GHzビート信号光の位相誤差信号波形(左図)とその頻度グラフ(右図)(黒線は測定値、灰色線は背景雑音)
Waveforms of phase error signal in 160 GHz optical beat signal (left hand side) and its frequency graphs (right hand side). (Black and gray lines are measured signal and background noise, respectively)

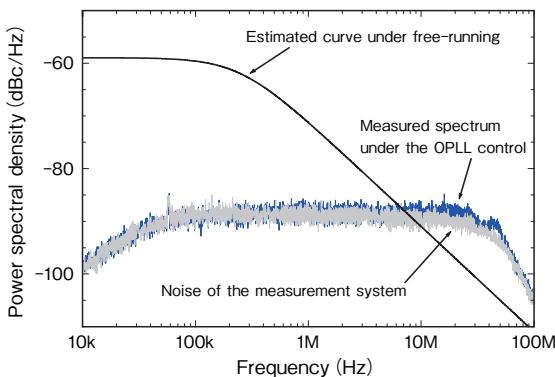


図9 160 GHzビート信号光の位相雑音スペクトル(青線: OPLL制御時のスペクトル。灰色線: 測定系の雑音のスペクトル。黒線: フリーランニング時の計算値)
Phase noise spectrum of 160 GHz optical beat signal. (Blue line: the spectrum under OPLL control, gray line: background noise, and black line: estimated line under free running).

このようにOPLLにより160 GHzビート信号光を外部信号光に対して同期でき、かつ126 fsと低タイミングジッタが実現できることが実証された。

3.2.1 1 THzビート信号光の外部同期実験

ビート信号光の周波数は2つの連続光の波長差で決まるため周波数の上限ではなく、全光位相比較器であるSi-APD中のTPAの応答速度は100 THz以上あるとされる。そのため、本OPLLは160 GHzよりも一桁程度周波数が高いビート信号光を、容易に同期できると期待される。そこで、本OPLLの超高速性を確認するために、1 THzビート信号光の外部同期実験を行った¹⁰⁾。

実験構成は基本的に図4の実験構成と一致しているため、160 GHzビート信号光同期実験と異なる点を次に示す。まず、1 THzビート信号光を発生するために、前節の実験系におけるマスタLDのみを置き換え、マスタLDとスレーブLDをそれぞれ1566.3 nm, 1558.2 nmに設定した。次に、外部信号光としてパルス幅を短くし、中心波長1540 nmの40 GHz繰り返し500 fs光パルス列を用いた¹³⁾。この外部信号光のパルス幅は1 Tbit/s信号光で用いられる信号光のパルス幅に相当している。一方で、Si-APDにおける各信号光のパワーは、外部信号光、マスタLD及びスレーブLDをそれぞれ195 mW, 70.8 mW及び4.6 mWと前節の実験値とほとんど同じ値に設定した。上記のように設定した結果、Si-APDの入力において図10の光スペクトルが得られた。なお、外部信号光のパルス幅が短くなったため、光ファイバの分散によりパルス幅が広がる影響を受けやすくなっている。パルス幅が広がると位相誤差信号の振幅が小さくなるため本実験では、位相誤差信号の振幅が最大となるように外部信号光源とSi-APD間の光ファイバの総分散値がゼロとなるように分散補償のための光ファイバを挿入した。

1 THzビート信号光の外部信号光に対する同期を確認するために、両信号光の相互相關波形を測定した。同期していない場合は無相関であるが、同期している場合は両信号に相関が生じるため1 ps周期の波形が測定できると期待される。相互相關波形測定系は図6と同様であるが、光フィルタの波長を本実験に最適になるように調整し直した。図11に測定した相互相關波形を示す。1 ps周期の波形が見て取れ、1 THzビート信号光が外部信号光に対して同期していることが確認された。

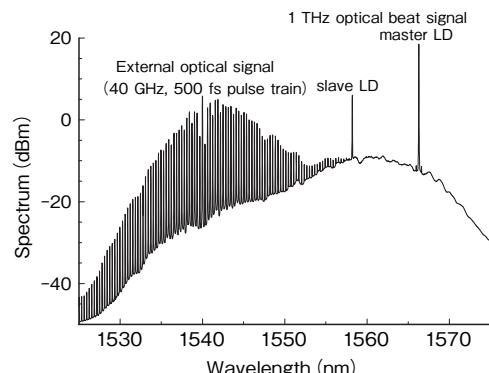


図10 Si-APD入力における光スペクトル
Optical spectrum at Si-APD input port.

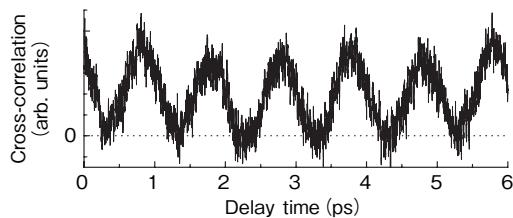


図11 1 THz ビート信号光と外部信号光の相互相関波形
Cross-correlation signal between 1 THz optical beat signal and the external optical signal.

次に1 THzビート信号光のタイミングジッタを測定する。タイミングジッタ測定には図6の相互相関波形測定系において、光学遅延器を固定したときの位相誤差信号の平均値が図11の相互相関波形の中心値に一致する遅延量で光学遅延器固定し、正確に波形を測定するためにローパスフィルタ(LPF)を取り外した。この変更により、相互相関信号を位相雑音信号として測定することができる。

位相誤差信号をオシロスコープで測定した結果を図12に示す。非同期時にはランダムに分布していた位相誤差信号が、同期動作時には位相誤差ゼロの値に集中し、その広がりは背景雑音に迫る程度にまで抑えられている。この結果からも、1 THz ビート光の同期を確認できる。次に、位相誤差信号をRFスペクトラムアライザで測定し、得られた位相雑音スペクトルを図13に示す。前述の実験同様に位相誤差の分散値と対応するタイミングジッタを計算した結果、それぞれ、 0.03 rad^2 と 28 fs であることが分かった。このように、小さなタイミングジッタで1 THzビート信号光を同期できることが明らかになった。

以上から、本OPLLが、1 THzビート信号光のような高速信号光であっても同期可能な超高速性を有していることが示された。

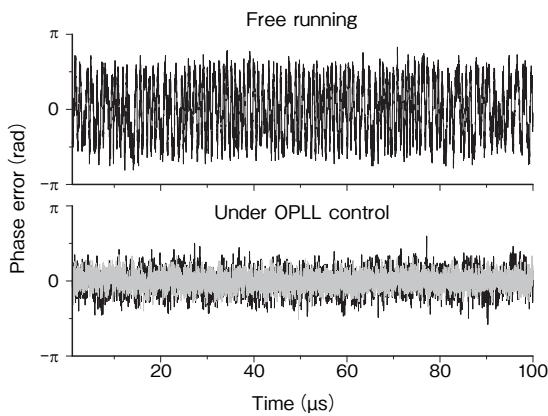


図12 1 THz ビート信号光の位相誤差信号波形(黒線)(灰色線: 背景雑音)
Phase error signals of 1 THz optical beat signal (black line). (Gray line: background noise)

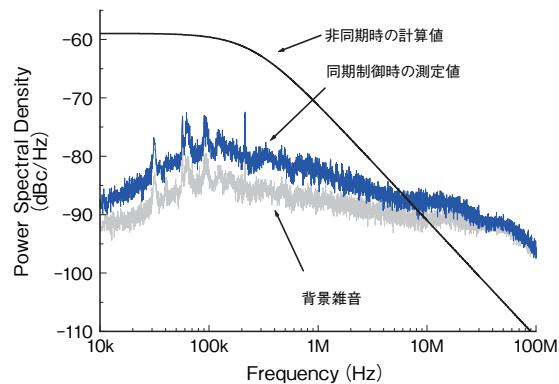


図13 1 THz ビート信号光の位相雑音スペクトル(青線は OPLL制御時の測定値、黒線は非同期時の計算値、灰色線は背景雑音)
Phase noise spectrum of 1 THz optical beat signal (Blue line: measured line under OPLL control, black line: estimated line under free running, and gray line: background noise).

4. まとめ

3電極DFB-LDを用いたビート信号光源とSi-APDを用いた全光位相比較器により構成されたOPLLが、160 GHzビート信号光を40 GHz繰り返し2 ps光パルス列に対して126 fsのタイミングジッタで、1 THzビート信号光を40 GHz繰り返し0.5 ps光パルス列に対して28 fsのタイミングジッタで同期できることを示した。この結果から、本OPLLは将来の通信速度の増加に十分対応できる高速性を有したクロック信号光源として優れた基本性能を有していると言える。今後は、本OPLLが超高速全光信号処理を支えるクロック信号光発生技術となるように改良を加え、実用化を推し進めて行く。

5. 謝辞

本研究は科学技術振興機構との共同研究の成果である。

参考文献

- 1) S. Arahira and Y. Ogawa: "Retiming and reshaping function of all-optical clock extraction at 160 Gb/s in monolithic mode-locked laser diode," IEEE J. Quantum. Electron., **41** (2005), 937.
- 2) S. Watanabe, F. Futami, R. Okabe, Y. Takita, S. Ferber, R. Ludwig, C. Schubert, C. Schmidt and H. G. Weber: "160 Gbit/s optical 3R-regenerator in a fiber transmission experiment," Tech. Dig. Optical Fiber Communications Conference (OFC 2003), paper PD16 (2003).
- 3) S. V. Chernikov, J. R. Taylor and R. Kashyap: "Experimental demonstration of step-like dispersion profiling in optical fibre for soliton pulse generation and compression," Electron. Lett., **30** (1994), 433.
- 4) K. Igarashi, J. Hiroishi, T. Yagi and S. Namiki: "Comb-like profiled fibre for efficient generation of high quality 160 GHz sub-picosecond soliton train," Electron. Lett., **41** (2005), 688.
- 5) Y. Ozeki, S. Takasaka, J. Hiroishi, R. Sugizaki, T. Yagi, M. Sakano and S. Namiki: "Generation of 1 THz repetition rate, 97 fs optical pulse train based on comb-like profiled fibre," Electron. Lett., **41** (2005), 1048.

- 6) U. Gliese, T. N. Nielsen, M. Bruun, E. L. Christensen, K.E. Stubkjaer, S. Lundgren and B. Broberg: "A wideband heterodyne optical phase-locked loop for generation of 3-18GHz microwave carriers," *Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992), 936.
- 7) R. Salem, G. E. Tudury, T. U. Horton, G. M. Carter, and T. E. Murphy: "Polarization-Insensitive Optical Clock Recovery at 80 Gb/s Using a Silicon Photodiode," *Photon. Technol. Lett.*, **17**, (2005), 1968.
- 8) S. Takasaka, Y. Ozeki, K. Igarashi and S. Namiki: "Optical Phase-locking of 160 GHz Optical Beat to 40 GHz Optical Pulse Train Using a Three-electrode DFB-LD and a Si Avalanche Photodiode," *Tech. Dig. European Conference on Optical Communications (ECOC 2005)*, paper Th1.3.6 (2005).
- 9) S. Takasaka, Y. Ozeki, S. Namiki and M. Sakano: "External Synchronization of 160-GHz Optical Beat Signal by Optical Phase-Locked Loop Technique," *Photon. Technol. Lett.*, **18** (2006), 2457.
- 10) 高坂他:「OPLLによる1 THzビート光の同期」, 2007年信学会ソサイエティ大会, C-4-6 (2007).
- 11) R. J. S. Pedersen, U. Gliese, B. Broberg and S. Nilsson: "Characterization of a 1.5 μ m three-electrode DFB laser," *Tech. Dig. European Conference on Optical Communications (ECOC 1990)*, Amsterdam (1990), 279.
- 12) M. A. Grant, W. C. Michie and M. J. Fletcher: "The performance of optical phase-locked loops in the presence of nonnegligible loop propagation delay," *J. Lightwave Technol.*, LT-5 (1987), 592.
- 13) K. Igarashi, H. Tobioka, M. Takahashi, T. Yagi and S. Namiki: "Widely wavelength-tunable 40 GHz femtosecond pulse source based on compression of externally-modulated pulse using 1.4 km comb-like profiled fibre," *Electron. Lett.*, **41** (2005), 797.