

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis



塩田 達俊 (Tatsutoshi SHIODA, Ph. D.)
埼玉大学大学院 理工学研究科 数理電子情報部門
電気電子システム領域 准教授
(Department of Electrical and Electric Systems, Saitama University)

応用物理学会、日本光学会、電子情報通信学会、日本分光学会、日本液晶学会、Optical Society of America (OSA)、The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 会員

受賞：塩田達俊、「コニカミノルタ画像科学奨励賞」、「(X-Z 軸) 断層画像デジタルカメラ&ムービーの実現へ向けた新規光学システムの開発と基礎検討」コニカミノルタ画像科学振興財団、2011年3月7日 / 塩田達俊、「インテリジェント・コスモス奨励賞」、「二波長同時ヘテロダイン検波法の開発」インテリジェント・コスモス振興財団、2010年5月17日 / 塩田達俊、「日本液晶学会 2006 年度学会奨励賞」、「Orientation of Liquid Crystal Molecules Evaporated onto Rubbed and Photoaligned Polymer Surfaces」、日本液晶学会、2006年9月14日。

研究専門分野：光計測、超高速フォトニクス

あらまし 光周波数コムを参照光とした新たな位相スペクトルの計測技術を提案し、多波長同時ヘテロダイン検波法と名づけた。これは超高速光コムシンセサイザ/アナライザを実現するための技術である。今回は信号光として 6.4 THz 帯域の 200 GHz 光周波数コムを発生し、その振幅/位相スペクトルを多波長同時ヘテロダイン検波法によるスペクトルのモニターをしながら光シンセサイザにより制御した。結果として、3.2 Tbit/s 16 bit の光デジタル信号を発生させ、それを観測することに成功した。また、振幅/位相の電界スペクトル変化の様子をフーリエ変換による簡単な処理で追跡し、パルス内のチャープ特性を評価した。一方、シングルショット計測は光通信分野のみならず他の高速技術にも重要な技術である。提案手法に高速なデータロガー(デジタルサイザ)を導入し、将来的なシングルショット計測の実現を目指す。今回はサンプリング時間 1ns で位相スペクトルおよびデジタル信号波形の計測を行い、シングルショット計測の実現可能性が示された。

1. はじめに

現代の光情報通信分野における大容量伝送の普及に伴い高速光信号の需要が急速に拡大してきており、今後もさらなる高速化の必要性が生じていくと考えられる。一方で、時間領域での直接的な信号処理では電子回路などの応答速度が限界に達しつつあり、さらなる高速光信号の利用を実現するためには応答速度に制限されない信号処理技術が重要である。過去に報告された超高速波形観測のための主な技術として、自己相関器や FROG、SPIDER といったものがよく知られている。これらはフェムト秒の高い時間分解能が得られる一方で、自己相関器は時間窓が狭いことや非対称の波形が観測できないことが課題である。FROG や SPIDER は非線形効果を利用しているため入力信号の強度に制約がありシングルショットの計測に向かないなどの課題がある。これらの課題を克服した高速光波形観測の実現をするために、高速光波形計測に有効な時間-周波数変換を利用し、周波数軸上で振幅/位相スペクトルを計測して実時間波形を復元する方法に新たな手法として二波長同時ヘテロダイン検波法を提案した[1]。この手法を用いることで、検出回路の速度に捉われない波形観測が実現可能となり、応答速度 200 MHz の光受信器で 500 GHz の光信号波形観測をすでに実証している[2]。ここでは、参照光を強度変調した二つの波長成分のみの信号を用いたが、光周波数コムのような広帯域にわたり等間隔に並ぶ信号を利用し、検出側にアレイ導波路格子(AWG)を導入して、並列処理を可能にする多波長同時ヘテロダイン検波法を新たに構築すれば、さらに短時間で高速光波形の計測が実現できる。一方、高速光波形の発生をするために有効な方法として、AWG、強度・位相変調器により構成される、光シンセサイザの利用が提案されている。これを提案手法と組み合わせて任意の高速光波形を生成・計測するホログラフィック光周波数コム合成・解析法を新たに構築し、約 2 THz の波形を生成・計測した[3]。提案手法により得られる時間波形には包絡線のみならず内部のキャリア波の情報も含まれる。したがってキャリア成分に現れるチャープなどの影響の情報も同時に得ることが可能と考えられる。そこで、計測結果の時間波形にフーリエ変換を用いた処理をすることでパ

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

ルス内部の電界スペクトルの解析を試みた。具体的には、計測したパルス波形を時間領域で分割し、区間ごとにフーリエ変換することで得られた電界スペクトルを時間 - 周波数軸上にマッピングすることで振幅・位相の変化を解析した。また、今回は光シンセサイザおよび AWG の設計を改良して、より高速かつ緻密な任意波形の生成を実現するシステムを検討し、そのデモンストレーションとして 3.2 Tbit/s 16 bit のデジタル信号の生成・計測を行った結果を報告する。

また、現在の光情報通信分野での信号検出にはシングルショットでの検出が用いられており、このような計測に適用することにおいては高速な光波形計測の実現が重要である。そこで、参照光に光周波数コムのような広帯域のスペクトルを持つ信号を利用し、検出側にアレイ導波路格子(AWG)を導入して、並列処理を可能にする多波長同時ヘテロダイン検波法を新たに構築することで、より高速な光波形計測を実現可能とした。一方で、これまでは提案手法の検出部において長いサンプリング時間をとっていたため、計測速度が制限されていた。そこで高速な光波形計測の実現のため、サンプリング時間を従来の 200 ms から 1 ns に短縮して位相計測およびデジタル変調光波形計測を行い、過去の結果と比較することで高速なサンプリングでの計測を実証し、シングルショット計測実現の可能性を検討した結果を報告する。

2. 原理

2. 1 位相スペクトルの計測

Fig.1 に二波長同時ヘテロダイン検波法による位相計測の原理図を示す。この方法は 2 つのスペクトル縦モード間の相対位相を計測することができる。計測のためピーク間の周波数差を信号光の間隔($\Delta\omega$)と同期した二波長の参照光を用意する。位相は 2 本とも ϕ とする。信号光と参照光を合波してヘテロダイン検波し、左右それぞれ一対の信号光と参照光から生じるビート信号(周波数 $\delta\omega$)を得る。これらのビート信号は次式で表される。

$$V_1(t, \phi, L) = \alpha_1 \cos\left\{\delta\omega t + (\phi_1 - \phi_r) + \frac{n}{c}(\omega_1 L_s - \omega_{r1} L_r)\right\} \dots(1)$$

$$V_2(t, \phi, L) = \alpha_2 \cos\left\{\delta\omega t + (\phi_2 - \phi_r) + \frac{n}{c}(\omega_2 L_s - \omega_{r2} L_r)\right\} \dots(2)$$

ここで、 α_1, α_2 は光強度に依存した定数、 L_s は信号光、 L_r は参照光の光路長とした。その後、2 式のビート信号を乗算することで生じる信号の DC 成分は式(3)のようになり、これを読み取ることで相対位相が検出できる。

$$V_{DC}(\phi, L) = Bias. + \alpha_1 \alpha_2 \cos\left(\Delta\phi + \frac{n}{c} \Delta\omega \Delta L\right) \dots(3)$$

ここで、 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 、 $\Delta L = L_s - L_r$ とした。式(3)は、参照光源の光周波数変動に全く影響を受けない。また、参照光として光周波数コムを利用することで、複数の相対位相の計測を並列して行うことが可能になる。このような処理を行う場合の提案手法を多波長同時ヘテロダイン検波法と呼ぶ。

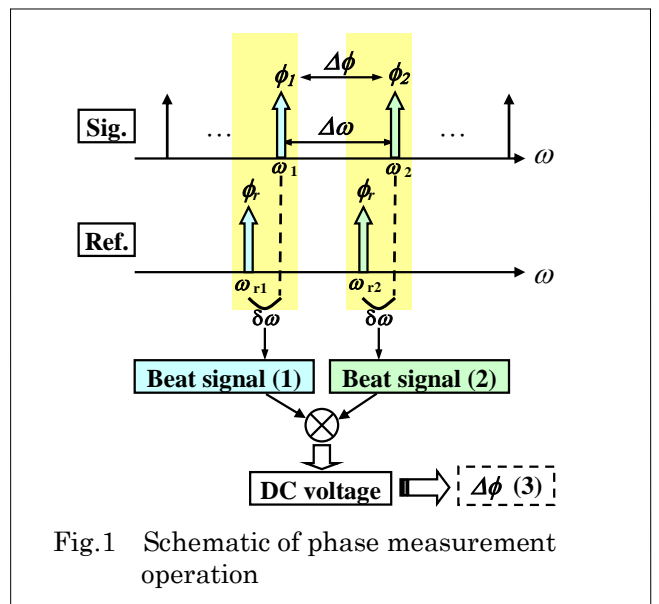


Fig.1 Schematic of phase measurement operation

2. 2 時間領域波形の合成

電界の時間波形は各周波数成分の重ね合わせにより、次式の波動関数で表される。

$$E(t) = \sum_n a_n \exp\{-j(\omega_n t + \phi_n)\} \dots(4)$$

計測によって得られる縦モード周波数 ω_n 毎の振幅/位相スペクトルを式(4)により重ね合わせ、電界の時間波形を合成する。

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

2. 3 シングルショット波形計測

我々の提案している位相スペクトルの計測方法は Fig.1 に示すように、離散的なスペクトルに対する計測を前提としている。したがって、計測される波形は周期的に繰り返されるものとなる。一方で、光情報通信分野ではパケットごとに異なる信号パターンとなり繰り返し波形とならないのが一般的である。そのため、パケットごとに切り出して計測するシングルショットの計測技術が必要となる。繰り返しのない単一波形を周波数領域で考えると Fig.2 に実線で示すような連続した振幅・位相スペクトルとなる。これを離散的に計測する場合、積算される時間窓が広がっていくが、時間窓を1パケットの時間として計測を行うことで、計測対照の1パケットが繰り返された波形が得られる。そして得られた繰り返し波形のうちの1周期を抜き出せばシングルショット計測と同等の波形情報を得ることが可能となる。

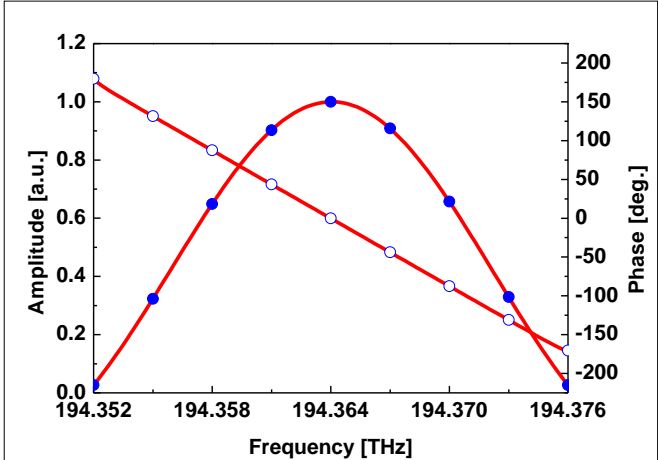


Fig.2 Amplitude and phase spectra of Continuous (line) and comb like (plot)

DFB-LD を種光源として、10 GHz の RF 信号(26.5 dBm)で駆動した光周波数コム発生器(OFCG)により、10 GHz 間隔の光周波数コムを発生し、これを信号光とした。光コムは 3 dB 幅を最大(220 GHz)となるように調整した。一方、参照光には 5 GHz の RF 信号で駆動した強度変調器の 2 通倍駆動により 10 GHz 間隔の二波長のピークを発生して用いた。参照光の周波数は信号光に対して周波数差 200 MHz となるように、計測対照のピークに合わせて設定した。信号光と参照光を合波して、PD でヘテロダイン検波し、250 MHz のローパスフィルタで必要な信号のみを抽出した後に乗算して、発生した DC 電圧を測定した。

3. 実験

今回は、(I) 高速パルスの内部位相解析、(II) 3.2Tbit/s 16bit デジタル光信号の生成・計測、(III) シングルショット計測の実現へ向けた検討の 3 項目について実験し検討を行ったので、以下にそれを報告する。

(I) 高速パルスの内部位相解析

実験方法

Fig.3 に実験系を示す。

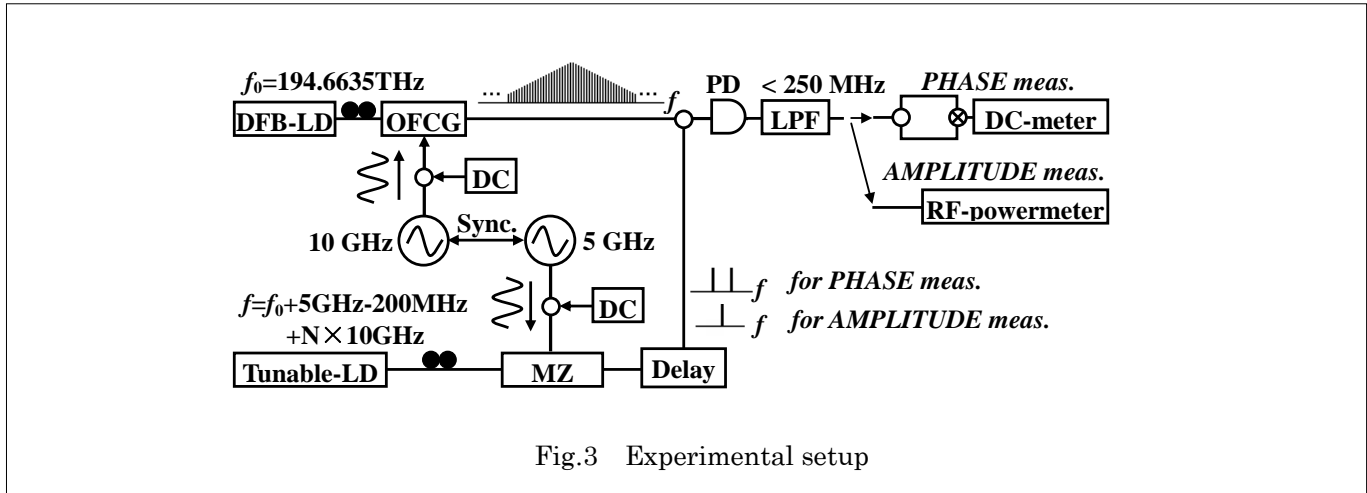


Fig.3 Experimental setup

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

ここで、DC 電圧は式(3)で示したように光路長 L の関数でもあり、 L を変化したときの周期信号波形の観測から位相情報 $\Delta\phi$ を得た。振幅計測では、波長可変レーザーの出力そのものを参照光としたヘテロダイン検波により、振幅情報を得た。計測の周波数帯域は中心周波数から ± 1 THz (± 100 次) とし得られた縦モード周波数毎の振幅/位相スペクトルから式(4)により波形を重ね合わせて合成した。

結果・考察

信号光として発生した光コム全体を光スペクトラムアナライザ(OSA)で観測したものおよび一部を拡大して観測したものを Fig.4 に示す。また提案手法により計測した振幅/位相スペクトルを Fig.5 に、スペクトルの計測結果から合成した時間領域での電界波形を Fig.6 に、それを自乗した光強度波形を Fig.7 にそれぞれ示す。今回は Fig.6 の計測結果のうち 50 ps 付近のパルスに注目して解析を行い、パルス内での位相変化の様子を解析した。解析は、時間軸で分割したそれぞれの区間をフーリエ変換することで行った。具体的には 46 ps~56 ps の範囲で 100 fs ごとに 100 区間に分割し、各区間をフーリエ変換した。ここで、フーリエ変換する区間以外は振幅 0 とおいて 46 ps~56 ps の範囲で計算した。

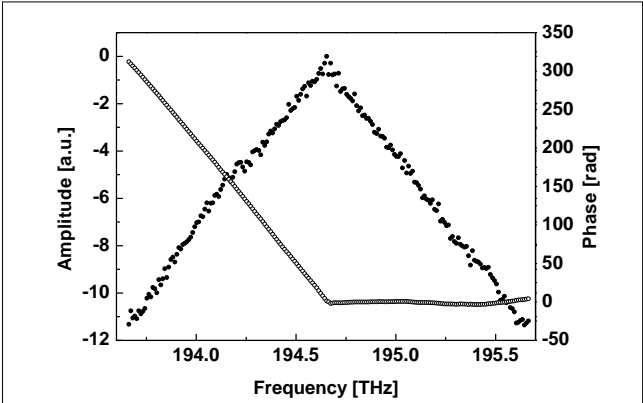


Fig. 5 Amplitude and phase spectrum of optical frequency comb measured by proposed system.

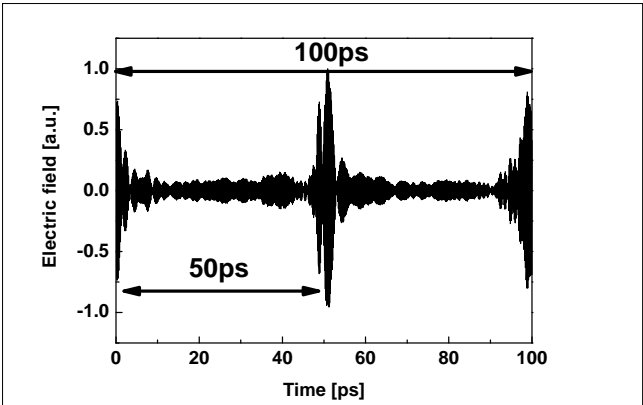


Fig. 6 Electric field profile obtained by experiment.

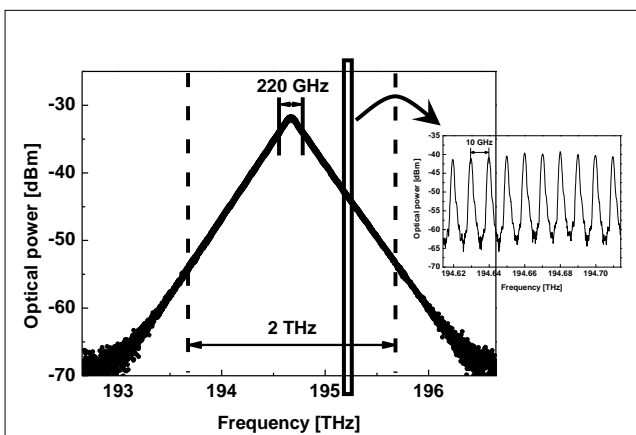


Fig. 4 Optical frequency comb spectrum measured by an optical spectrum analyzer (200 GHz resolution). The expanded spectrum was measured with 2 GHz resolution.

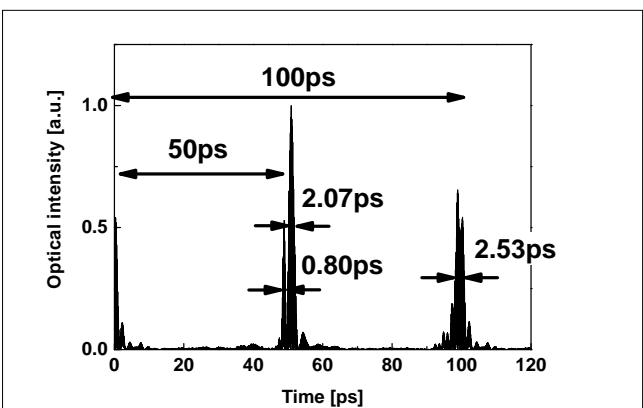


Fig. 7 Intensity profile obtained by experiment.

また、群遅延の影響を除くため 51 ps を中心に補正した。フーリエ変換して得られた振幅・位相スペクト

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

ルを時間周波数軸上にマッピングした結果をそれぞれ Fig.8 a),b)に示す。また Fig.8 a)の中心周波数近傍を拡大し振幅がピークをとる周波数をプロットしたものを Fig.9 に、Fig.8 から同一周波数 (194.6635 THz)の位相・振幅を抽出し、時間軸上にプロットした結果を Fig.10 に示す。

また、Fig.10 から特に中央のパルス内部では位相がほぼ変化せず同様にチャープの影響がないことを示唆する結果が得られ、振幅0の点で位相の大きく変化するなどのパルス内の時間的位相変化の様子が読み取れた。

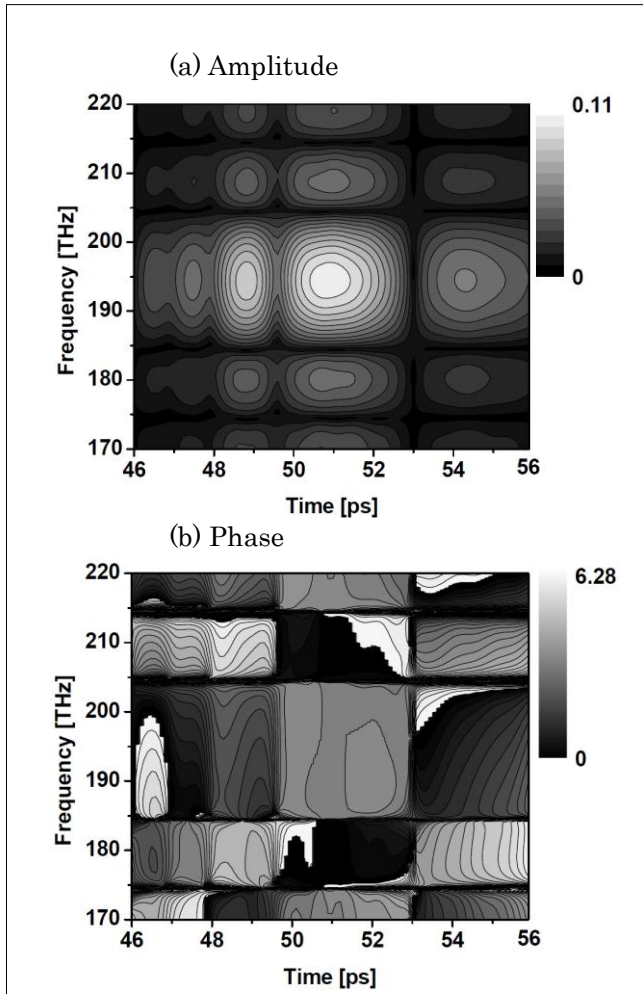


Fig. 8 Dual-heterodyne mixing trace of (a) amplitude and (b) phase spectral evolution.

Fig.9 から振幅のピークとなる周波数は、特に各パルスの内部でほとんど変化がなく振幅が小さくなる部分でわずかに変動する程度であり、チャープの影響を受けていないことが推測された。

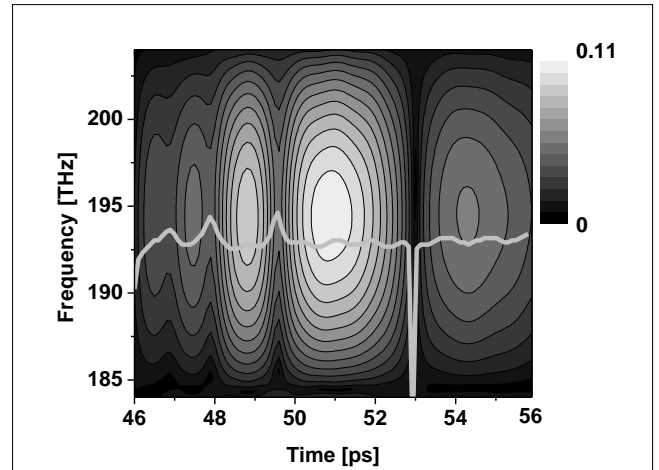


Fig. 9 Dual-heterodyne mixing traces of expanded amplitude evolution with a locus of the zeniths in spectral sections.

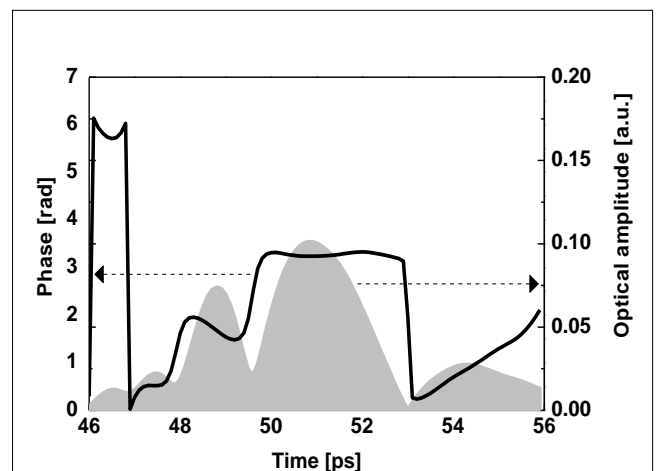


Fig. 10 Intensity and phase evolution at center frequency of 194.6635 THz.

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

(II) 3.2Tbit/s 16bit デジタル光信号の生成・計測

実験方法

Fig.11 に実験系を示す。

Tbit/s 16 bit のパケットパターン 3 種類

(“1000000000000000”, “1000100000100000”, “101100110011110”)を生成し計測した。

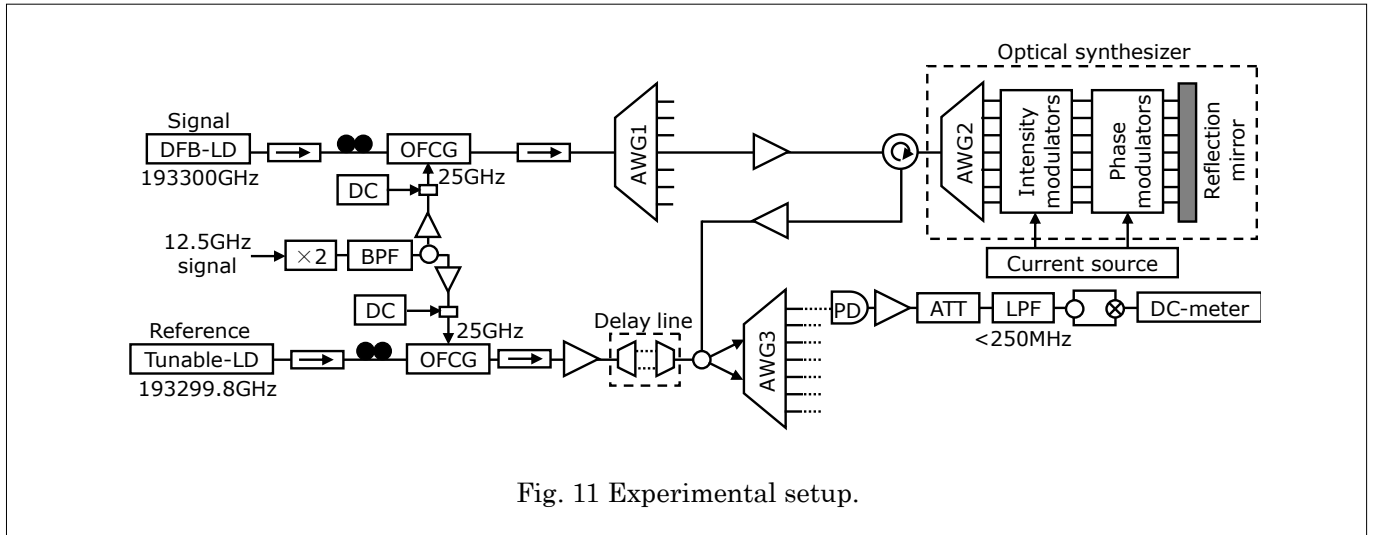


Fig. 11 Experimental setup.

信号光には 25 GHz の RF 信号で駆動した OFCG により発生した光周波数コムを利用した。発生した 25 GHz 光コムは AWG1(FSR 200 GHz)に入射し、その周回性を利用して 200 GHz 間隔でピークを抽出した。AWG1 入射前後の光コムのスペクトルは Fig.12 a),b) にそれぞれ示した。Fig.12 b)のスペクトルに示したように 200GHz 間隔に 32 波のピーク(6.4 THz 帯域)が得られ、これを光シンセサイザに入射して、強度・位相をそれぞれ変調した。ここで、200GHz 間隔のピークはシンセサイザ内の AWG2(チャンネル間隔 200 GHz)により、それぞれ別のチャンネル(全 32ch)に展開され、各周波数成分で独立した強度・位相変調が可能となる。強度変調の深さは、OSA で観測しながら設定した。一方、位相変調の深さは、25 GHz 間隔の光コムを参照光として、多波長同時ヘテロダイン検波法の出力をモニターしながら設定した。ここで、参照光とした光コムは信号種光源の出力と 200 MHz だけ周波数の異なるレーザー光を種光に用いて発生した。光シンセサイザによる制御は PC 上で作成した理想的なデジタル信号の時間波形をフーリエ変換により算出した強度・位相スペクトルを基に設定した。今回の実験では 3.2

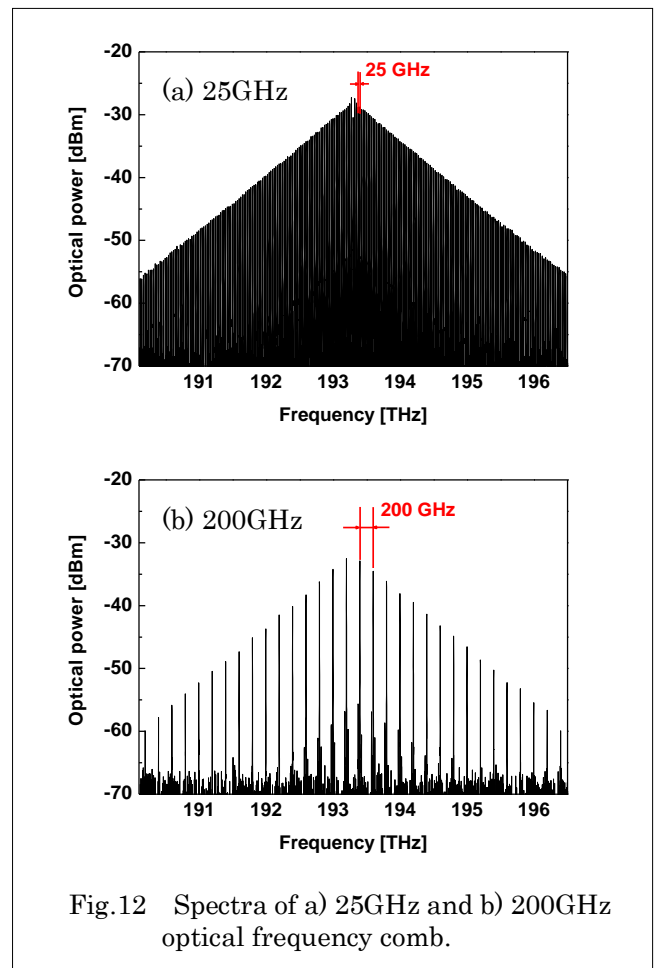


Fig.12 Spectra of a) 25GHz and b) 200GHz optical frequency comb.

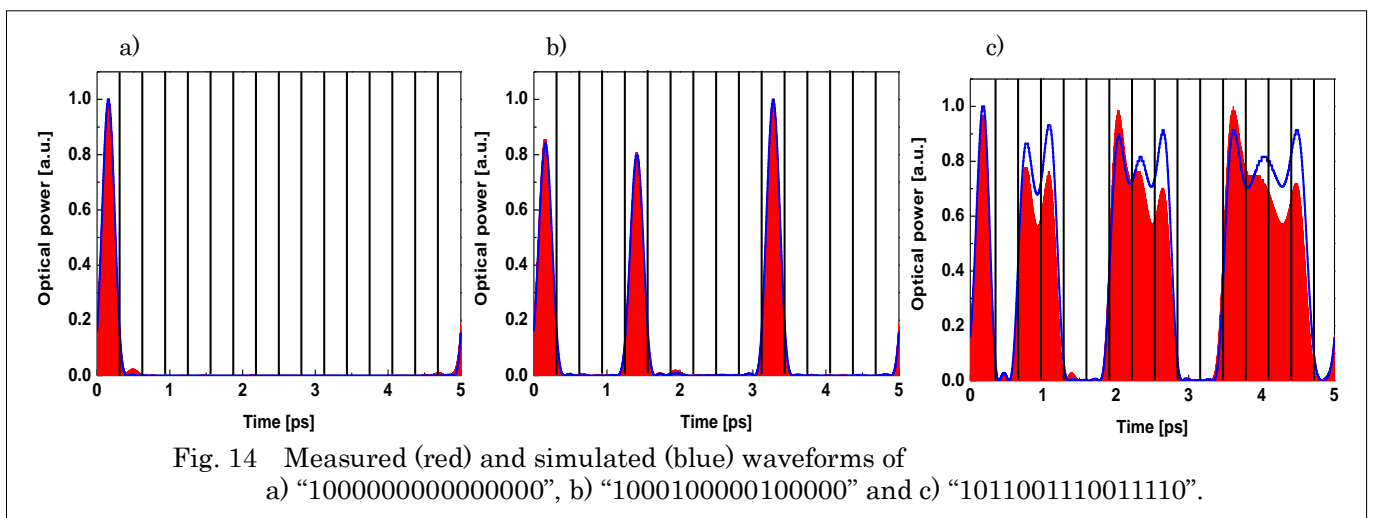
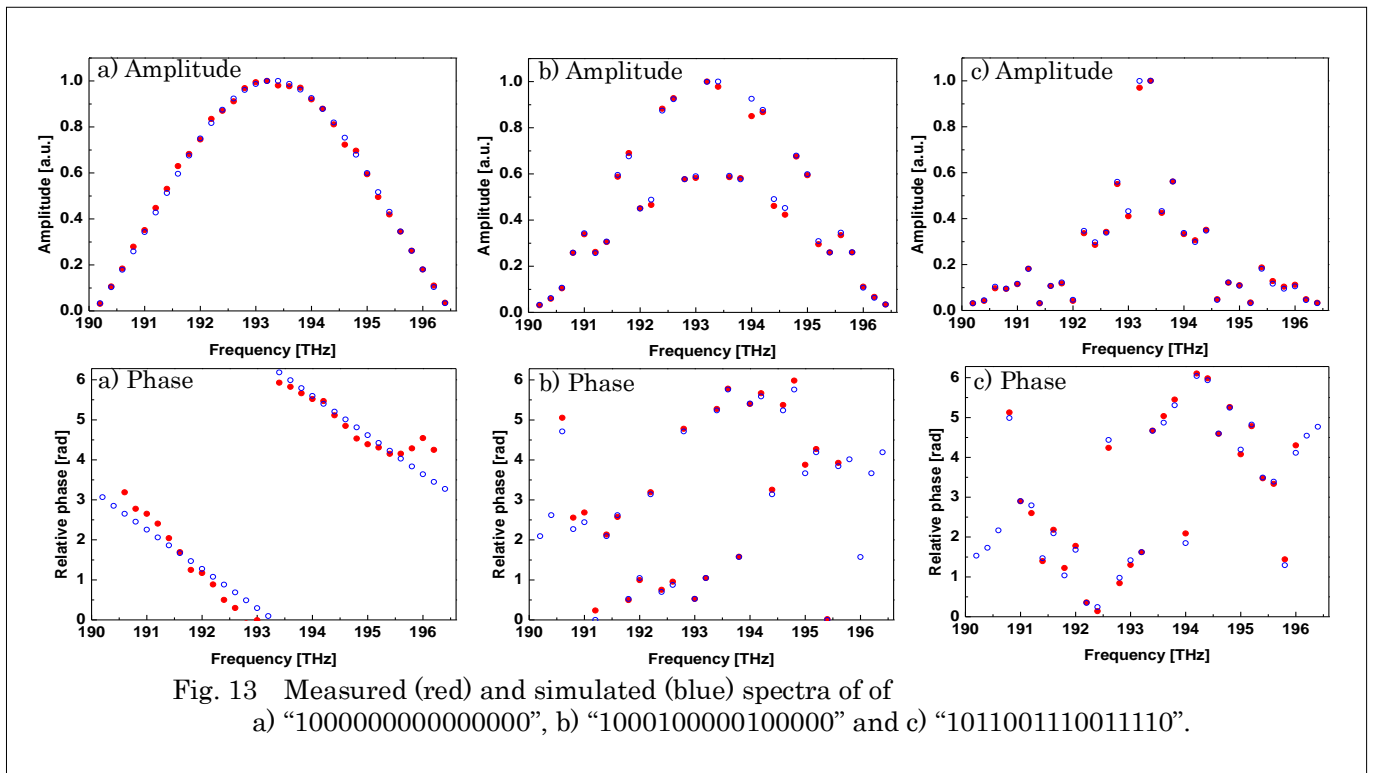
振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

結果・考察

光シンセサイザを用いたスペクトル制御により生成した信号光に光コムの参照光を合波し、AWG3により200 GHz間隔の隣接2モードを抽出して提案手法に適用して位相スペクトルを計測した。また、振幅スペクトルはシンセサイザの出力をOSAにより計測した強度スペクトルから求めた。Fig.13に強度・位相スペクトルの計測・計算結果を示す。

また Fig.13のスペクトルを基に合成した時間波形を Fig.14に示す。スペクトルは振幅・位相ともに計算結果とよく一致したものが得られ、その結果として生成されたデジタル波形も設定した3.2 Tbit/s 16-bitのパケットパターン3種類が得られていることが観測され明らかになった。



振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

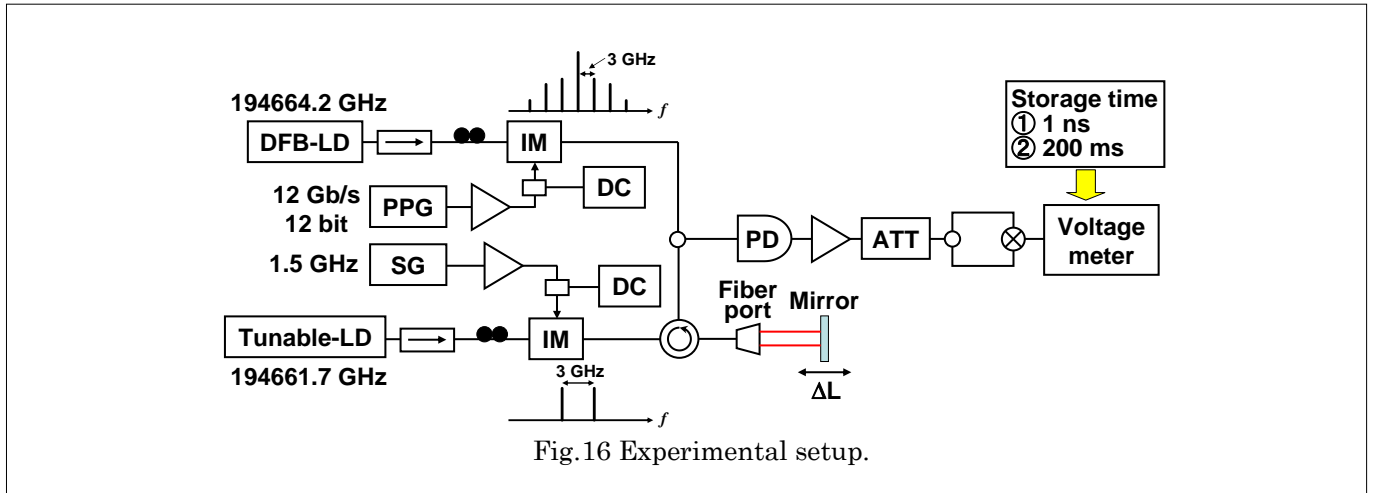
Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

(Ⅲ) シングルショット計測の実現に向けた検討

実験方法

Fig.16 に実験系を示す。

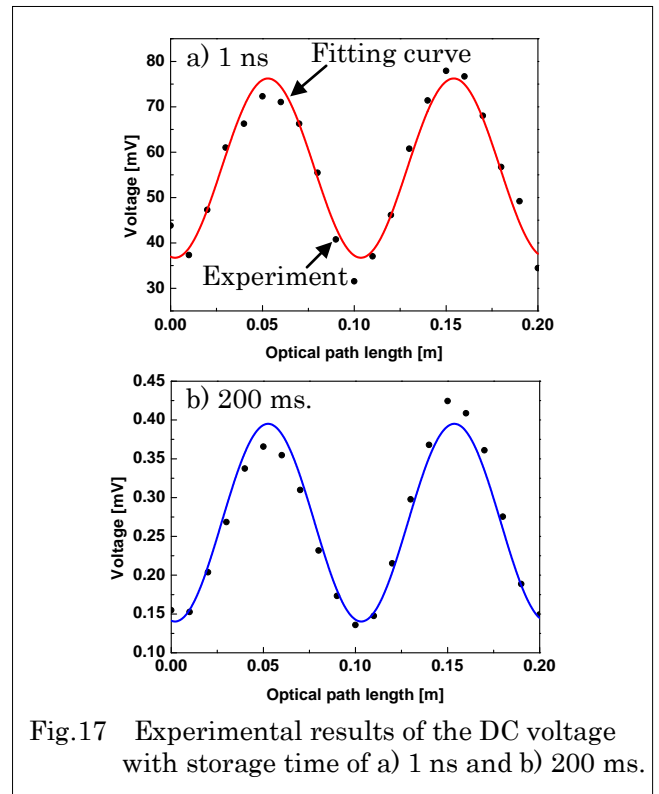
た計測結果の比較対照として用いるため、PD 前のカプラに入射する直前の信号光の時間波形を 20 GHz 帯域の光サンプリングオシロスコープにより計測した。



信号光は DFB レーザーの出力を、12 Gb/s 12 ビットパケットのデジタル信号で駆動した強度変調器に入射することで 3 GHz 間隔のコム状のスペクトルを得た。パケットパターンは”100010001000”とした。一方で、1.5 GHz のマイクロ波で駆動した強度変調器に、周波数可変光源の出力を入射して 2 通倍駆動することで 3 GHz 間隔の一对の参照光を発生させた。ここで、信号光と参照光の変調に用いた両信号源は同期させ、参照光源の周波数は信号光ピークと参照光ピークの周波数間隔が 1 GHz となるよう設定した。その後、信号光と参照光を合波して、PD に入射した。さらに、PD で発生した 2 つのビート信号を乗算して得られる信号の DC 成分を計測した。ここで、DC 電圧の検出に高速デジタルタイザを用い、サンプリング時間 1 ns で検出した。また比較のため、200 ms のサンプリング時間での計測も行った。その際、ディレイラインにより光路長を掃引して、得られる正弦波状の変化から位相情報を得た。またサンプリング時間 1 ns での計測では、18 GHz の帯域にわたり位相スペクトルの計測を行った。振幅スペクトルの計測では参照側の強度変調器を駆動せず通過した周波数可変光源の出力をローカルオシレーターとして用いて、信号光の各周波数成分とのビート信号の強度を計測することで振幅情報を得た。ま

結果・考察

提案手法による位相計測をサンプリング時間 1 ns, 200 ms で行った結果をそれぞれ、Fig.17 a), b)に示した。



振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

Fig.17 a)では1万回測定したデータを平均した。Fig.17 a), b)ではいずれも光路長に対して正弦波状のDC電圧の変化が観測された。また、得られたDC電圧の計測結果を正弦波でフィッティングすることで求めた位相の差は1波長の250分の1となり、非常に近い計測結果が得られた。

次に光波形計測に関して、提案手法による計測結果との比較の対照として光サンプリングオシロスコープにより計測した変調波形をフーリエ変換することで得られる振幅・位相スペクトルを用いた。提案手法により18 GHzの帯域にわたりサンプリング時間1 nsで計測した位相スペクトルを Fig.18 a)に示した。また、ビート信号の強度計測から求めた振幅スペクトルを Fig.18 b)に示した。同時にオシロ波形のフーリエ変換結果であるスペクトルを Fig.18 a),b)内に示した(白抜きのプロット)。

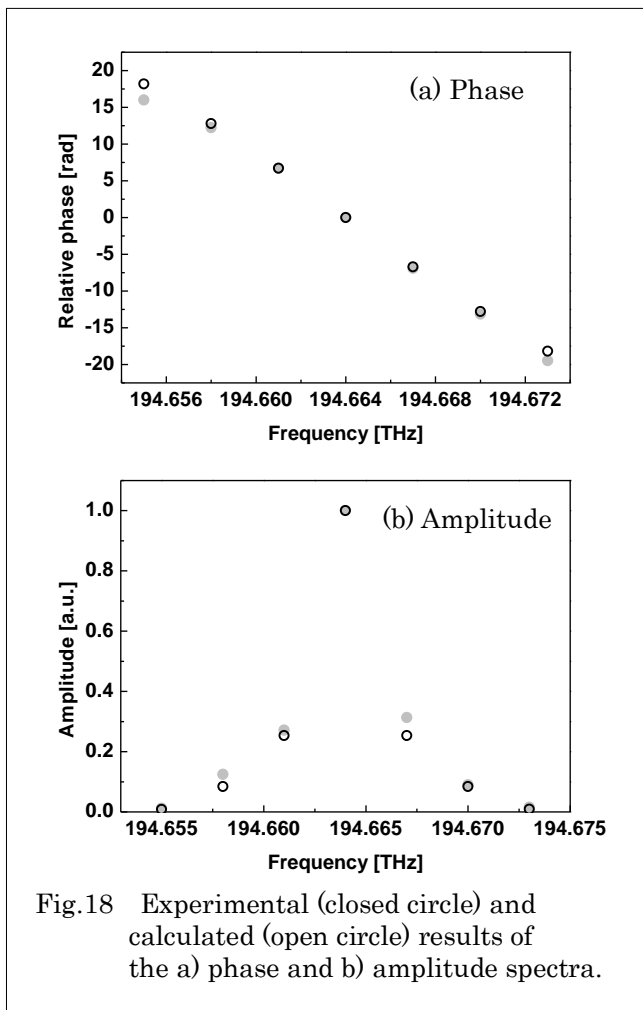


Fig.18 Experimental (closed circle) and calculated (open circle) results of the a) phase and b) amplitude spectra.

Fig.18の結果からオシロスコープの計測により得たスペクトルと提案手法により計測したスペクトルが同様の形状を示していることがわかる。また、各周波数において、オシロスコープと提案手法の結果の差をとってその標準偏差を求めると、振幅スペクトルは2.2%、位相スペクトルは10%となった。光サンプリングオシロスコープで計測した信号光の時間領域での強度波形を Fig.19に示す。また、計測した振幅・位相スペクトルを用いて、式(4)による重ね合わせを行い、波形を合成した結果を Fig.20に示す。

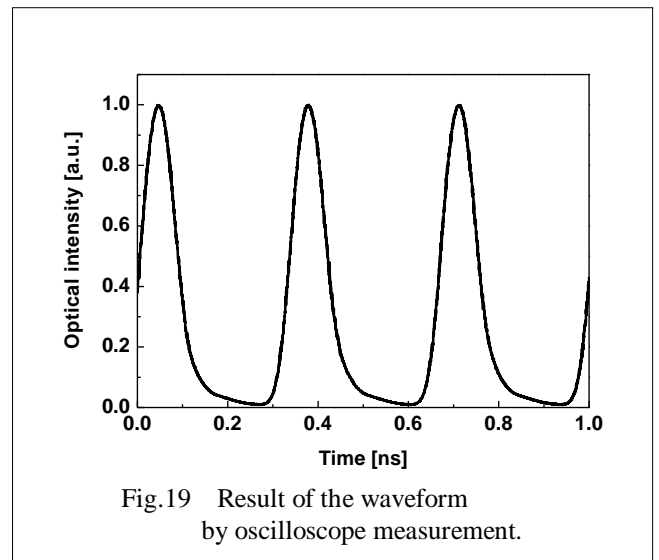


Fig.19 Result of the waveform by oscilloscope measurement.

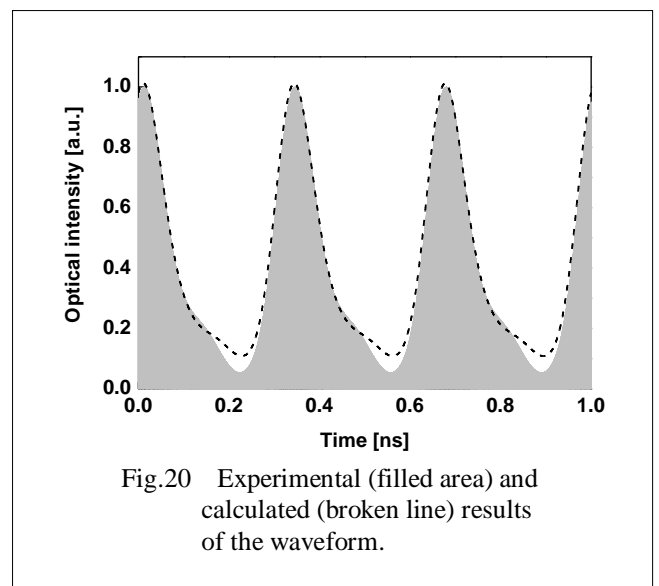


Fig.20 Experimental (filled area) and calculated (broken line) results of the waveform.

振幅・位相計測による光パルス/パケット任意波形計測

Optical amplitude and phase detection enables ultrafast optical arbitral waveform analysis

Fig.19 と Fig.20 の比較から発生した信号とよく一致した波形が観測できていることが確認できる。ここで、オシロスコープと提案手法による計測における計測帯域が異なることを考慮するため、オシロ波形をフーリエ変換して得た振幅・位相スペクトルからのうち提案手法と同帯域となる 18 GHz の範囲のみを取り出して、同様に式(4)により合成した波形の包絡線を Fig.20 に示した。Fig.20 より提案手法による計測結果とオシロスコープの計測を基に合成した波形との比較でよりよく一致したものが得られていることが確認された。これらの結果により、提案手法における高速サンプリングによる計測の適用が実証され、光波形計測の高速化への可能性が示された。

4. おわりに

光シンセサイザによる強度・位相制御に、提案手法による位相スペクトルのモニターを用いて、光波形を生成しそれを計測した。その結果、3 種類の 3.2 Tbit/s 16 bit のデジタル光信号が観測され、いずれも計算結果とよく一致したものであった。以上の結果から、提案手法の高速任意光波形の生成・計測への有効性が実証された。また、フーリエ変換を用いた解析を行うことで、計測した時間波形のパルス内位相変化を評価し、パルス内でのチャープが少ないことなど位相情報が得られた。シングルショット計測の実現へ向け高速サンプリングによる位相スペクトルおよび信号波形の観測を行った。過去の結果およびオシロスコープによる計測との比較から、妥当な結果が得られていることが確認され、シングルショット計測実現への可能性が示された。

参考文献

- [1] T.Shioda, *et al.* Opt. Commun. **23**, pp.4733-4740 (2010).
- [2] T.Yamazaki, M.Kuzuwata, T.Shioda, J. Opt. Soc. Am. B **29** (7), pp.1707-1711 (2012).
- [3] T.Shioda, T.Yamazaki, Opt. Lett., doc. **37**, pp.3642-3644 (2012).

この研究は、平成 20 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 21 ~ 23 年度に実施されたものです。