

分解能1THzでアイダイアグラム測定を実現した 光サンプリングオシロスコープSJE9203A

SJE9203A Optical Sampling Oscilloscope with 1THz resolution for Eye Diagram Measurement

UDC 617.317.75 : 681.586.732

大谷 昭仁
尾坪 利信

Akihito Otani

Toshinobu Otsubo

研究所 光短パルス技術プロジェクトチーム

研究所 光短パルス技術プロジェクトチーム

1 まえがき

光ファイバを用いた大容量伝送として、波長多重（WDM）通信および時間多重（TDM）通信の研究開発が盛んに行われており、高符号速度（40Gbit/s以上）での光伝送が行われようとしている。このため、伝送品質評価に必要なアイダイアグラムを高い時間分解能で評価できる波形測定装置の必要性が強まってきた。また、この高符号速度化に伴ない、光スイッチ・光変調素子等の立ち上がり・立ち下がりの動的特性も重要視され始め、デバイスの研究開発の観点からも、パーストモードで特性が評価できる時間分解能の高い波形測定装置が必要となってきた。

しかしながら、現在まで、電気回路・電子デバイスの帯域制限の問題や、能動制御ができる低ジッタな超短パルス光源がないことなどから、市場の要求を満足する測定器は開発できなかった。今回、我々は従来の問題点を解決する技術の開発とともに、低繰り返しのパルス光を利用して光波形を評価できる光・光サンプリング方式¹⁾という新しい測定方式を採用することにより、市場の要求を満足する光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの開発に成功した。SJE9203Aは、1ps（1THz）という極めて高い時間分解能でアイダイアグラムを評価することができる今までにない光波形測定器である。本稿では、SJE9203Aの設計方針、原理、構成、性能および測定例を紹介するとともに、同時に開発を行った短パルス光源SJG9503C/SJG9551Aについて説明する。図1にSJE9203Aの外観を示す。

2 設計方針

2.1 従来の測定器との比較

既存の測定器で、光波形評価ができるものには大別して、自己相関器、ストリークカメラ、フォトディテクタ（PD）と電気のサンプリングオシロスコープの組み合わせの3種類がある。光サンプリングオシロスコープを含めた比較を表1に示す。

光サンプリングオシロスコープは、時間分解能1psを維持し、かつ、アイダイアグラム測定を可能としている。また、ジッタも入力クロックとほぼ同等な値を維持することができる性



図1 光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの外観図
External view of SJE9203A Optical Sampling Oscilloscope

表1 光波形測定器の比較
Comparison of optical waveform measurement instruments

測定器	時間分解能	アイダイアグラム	長所	短所
自己相関器	10fs	×	高分解能	非対称性, パルス列およびアイダイアグラム測定が不可能
ストリークカメラ	1ps	×	非対称性, パルス列波形測定が可能	アイダイアグラム測定が不可能
PDと電気サンプリングオシロスコープ	20ps		アイダイアグラム測定が可能	時間分解能に制限がある ジッタが大きい
光サンプリングオシロスコープ	1ps		非対称性, パルス列波形およびアイダイアグラム測定が可能	被測定光のクロックが固定

能を有している。

2.2 光サンプリングオシロスコープの設計方針

本器を開発するにあたり、以下の点に留意して設計を行った。

- (1) アイダイアグラム測定が可能なこと
- (2) 高い時間分解能を有すること (1ps 以下)
- (3) 測定感度が高いこと (最小入力光強度; +20dBm 以下)

上記の設計方針を満足させるために、以下の技術を採用した。

(1) 光 - 光サンプリング技術

被測定光を低繰り返しの超短パルス光でサンプリングする技術を採用した。詳細は3の原理で説明する。

(2) 低ジッタのサンプリング用超短パルス光 (パルス幅 0.5ps) 発生技術

電界吸収型 (Electro-absorption; EA) 変調器による共振器を持たない短パルス発生技術と分散減少ファイバ (Dispersion Decreasing Fiber; DDF) によるパルス圧縮技術を採用した。

(3) 和周波光発生技術

光 - 光サンプリングを行うために、非線形光学結晶 (KTP) を用いた和周波光の発生技術を採用した。

3 光 - 光サンプリングの原理

光 - 光サンプリングの原理図とタイミングチャートを図2に示す。繰返し周波数 f_0 の被測定光 (光周波数 f_0) に対して、低い繰返し周波数 f_s のサンプリングパルス光 (光周波数 f_s) を用意する。

$$f_s = f_0/n - f \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 n は整数、 f はシフト周波数である。被測定光とサンプリングパルス光は偏波合波器を介して、互いの光の偏波方向が直交するように非線形光学結晶に入射される。結晶内では、非線形光学効果により、互いの光強度の相互相関で

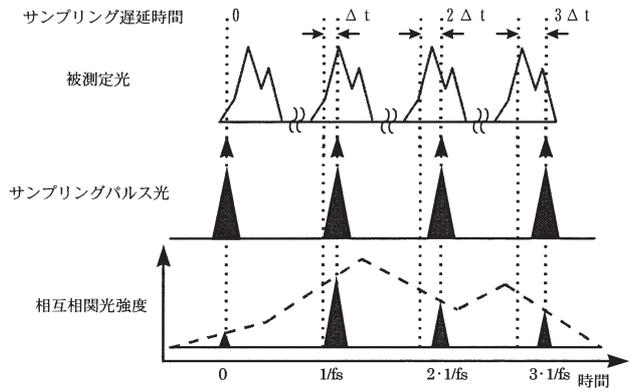
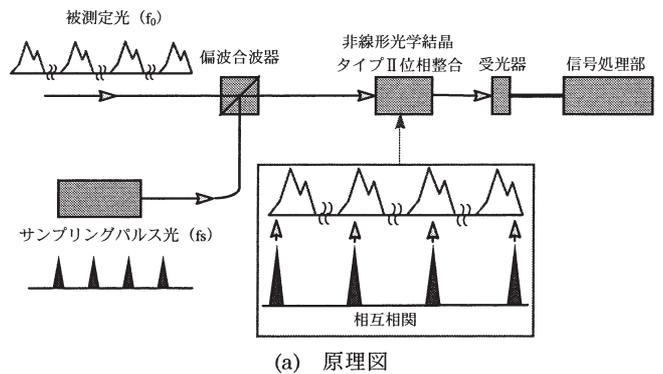


図2 光 - 光サンプリングの原理図とタイムチャート
Principle diagram and timing chart of optical-optical sampling method

あるタイプ 位相整合の和周波光 (光周波数 f_{sg}) を発生する。 f_{sg} は

$$f_{sg} = f_0 + f_s \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。タイプ 位相整合を採用することにより、それぞれの単一の光のタイプ 位相整合および同一偏波方向の時に発生するタイプ 位相整合による第2高調波光を抑制でき、信号対雑音比 (SN比) を向上することができる。また、和周波光強度は互いの光強度の積に比例するため、この現象は、互いの光が同時に非線形光学結晶内に入射した時のみ生じる。タ

イミングチャートからわかるように f_s は、 f_0/n から f ずれた周波数となっているため、サンプリングするポイントは、毎回 t だけずれていく。

$$t = 1/f_s - n/f_0$$

$$n^2 f/f_0^2 \dots\dots\dots(3)$$

サンプリングした和周波光である相互相関光強度の包絡線は、被測定光の光波形を時間軸上に

$$= (1/f_s) \int t$$

$$= f_0/n f \dots\dots\dots(4)$$

拡大した形状となる。 n と f の選択により、サンプリングポイントの時間のずれ、被測定光の時間軸上への拡大率およびサンプリング周波数を決定できる。受光器は、サンプリングパルス光の繰返し周波数 f_s によって発生する和周波光を光-電気変換するので、 f_s を低い繰返し周波数にすることにより受光器の応答速度への要求を低くでき、したがって、電気回路の負担も軽減できる。光 - 光サンプリングの最終的な時間分解能はサンプリングポイントの時間ずれ t 、サンプリングパルス光のパルス幅およびジッタにより決定される。

4 構成および各部の機能

光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの構成を図3に示す。本器は、以下の6筐体から構成されている。

- (1) シンセサイズド信号発生器 MG3633A
- (2) 遅延信号発生器 SJW9205A
- (3) 相互相関器 SJW9204A
- (4) 短パルス光源 SJG9501B
- (5) EDFA SJA9301B
- (6) コンピュータ

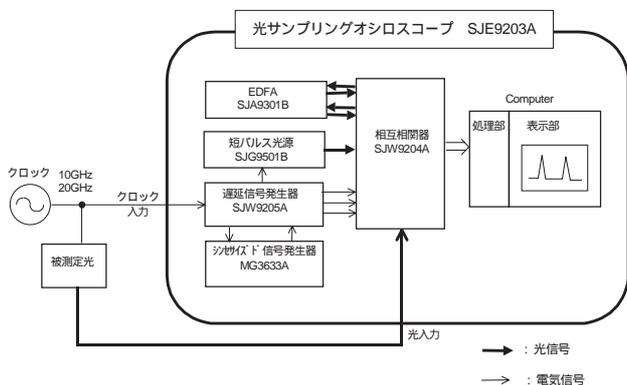


図3 光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの構成図
System diagram of SJE9203A Optical Sampling Oscilloscope

機能別に大きく分けると、図4に示すように、電気部、光学部、信号処理・表示部の3ブロックになる。ここでは、この3ブロックの機能について説明する。

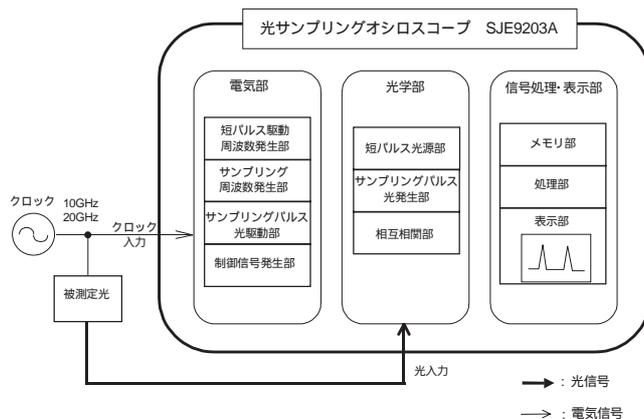


図4 光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの構成ブロック図
Block diagram of SJE9203A Optical Sampling Oscilloscope

4.1 電気部

電気部は、短パルス光源を駆動する周波数発生部、サンプリング周波数の発生部、サンプリングパルス光駆動部、サンプリングした電気信号をデータ処理するための制御信号発生部からなっている。

外部からクロック f_0 を入力することにより、短パルス駆動周波数発生部とサンプリング周波数発生部で、 f_0 からわずかにシフトした繰返し周波数 f_d (約10GHz) および f_d を分周した低繰り返しのサンプリング周波数 f_s (約10MHz) を生成している。前者は短パルス光源SJG9501Bを駆動するための、後者は実際にサンプリングするための周波数である。 f_d は、VCO (Voltage Controlled Oscillator) であるMG3633Aから出力される信号と、入力クロック f_0 の分周信号をPLL (Phase Locked Loop) 回路で位相比較することにより低ジッタでさらにオフセット周波数が一定となるように制御されている。また、サンプリング駆動部は、 f_d で駆動した短パルス光源から、実際にサンプリングに用いる f_s のサンプリング光を生成するためのダウンコンバート用電気パルス発生回路を備えている。さらに、制御信号発生部では、 f_s と同期してデータ処理を行うために制御信号を発生している。

4.2 光学部

光学部は、サンプリング光の光源である短パルス光源部、実際にサンプリングするための超短パルス光を生成するサンプリングパルス光発生部、和周波光発生を行う相互相関部か

らなっている。

サンプリング光源である短パルス光源SJG9501Bを、入力クロック f_0 からわずかにシフトした繰り返し周波数 f_d で駆動する。出力されるパルス幅は10数psである。その後、サンプリングパルス発生部で、 f_s の周波数でパルス駆動している消光比特性の良い光強度変調器によって、実際にサンプリングする周波数 f_s にパルス光をダウンコンバートする。ただし、このままでは、パルス幅が広いために、分解能1psを実現できない。そこで、細いパルス光を得るためサンプリング光発生部には、分散値がファイバの長手方向で減少していくDDFにより、非線形効果の断熱ソリトン圧縮を利用したパルス圧縮を行う構成を設けている。ここでは、断熱ソリトン圧縮をベDESTALなく行うために、入力パルス光のチャープを取り除き、ソリトンしきい値に光強度を合わせている。最終的に得られるDDF通過後のパルス光は、繰り返し周波数が f_s で、パルス幅0.5ps以下である。相互相関部は、生成したサンプリングパルス光と被測定光を偏波合成後に、非線形光学結晶であるKTP内に入射し、和周波光を発生させる構成となっている。和周波光は、780nm前後の波長であるため、受光器は受光感度の良いSi-APDを使用している。

光学部で用いている短パルス光源SJG9501Bは、約10GHzの繰返して、パルス幅15ps以下の短パルス光を発生する。この光源は、電源入力時に、調整することなく安定なパルスを発振することができ、モードロックレーザーと比較し容易にターンキーオペレーションが可能である²⁾。原理的に、単一モード連続発振した半導体レーザーを、消光比特性の良いEA変調器を非線形回路を擁したドライバで光強度変調することによりパルス光の発生を実現しているため、共振器がなくほとんど外乱の影響を受けないという特長がある。この技術は、

6.1.2で説明する短パルス光源SJG950Xシリーズにも応用されている。

4.3 信号処理・表示部

信号処理・表示部は、和周波光を光-電気変換後、データを蓄積するメモリ部と、データにより光波形を成形する処理部、ディスプレイに表示する表示部からなっている。

変換された電気信号は、A/D変換後にメモリに逐次貯えられる。このデータは、1掃引後に電気部で生成された制御信号により、加算または転送されることになる。転送されたデータによって、光波形の成形を行い、ディスプレイに表示する。表示には、パーシストモード、アベレージモードの2種類が選択できる。また、光波形の半値幅、立ち上がり・立ち下がり時間、ヒストグラム等のデータ処理および表示を行うことができる。

5 光サンプリングオシロスコープの機能および主な規格

5.1 機能

光サンプリングオシロスコープSJE9203Aはアイダイアグラム測定を行うために、パーシストモードでの測定機能を備えている。このモードでは、ヒストグラム測定も可能であり、データからQ値を算出する場合に利用できる。パーシスタンス時間は300ms～無限時間まで選択可能で、またパルス幅測定、立ち上がり・立ち下がり測定および低い光強度の信号でも測定を可能とするためにアベレージモードによる測定機能も備えている。アベレージ回数は1回～1024回まで選択できる。なお、アベレージ1回は各サンプリングポイントでのデータ数256個の平均値に相当する。保存方法としては、CSVファイルによる測定データの保存およびwfmファイルによる測定波形の保存の2種類がある。

表2 光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの主な規格

Specifications of Optical Sampling Oscilloscope SJE9203A

項目	規格		備考
波長範囲	1,535nm ~ 1,565nm		
測定感度 (typical) (被測定光のピークレベル)	+ 20dBm	表示画面でS/Nが 3dBになるレベル	パーシストモード
	+ 10dBm		アベレージ回数: 1回
	- 5dBm		アベレージ回数: 1,024回
被測定光基本クロック	9.95328GHz ± 1MHz		外部クロックが必要 9 ~ 11GHzの間で指定可能
ジッタ	入力クロックのジッタ + 0.2ps		
クロック入力レベル	+ 8dBm		正弦波
パルス分解能	1ps (3dB幅)		サンプリング光のパルス幅 とジッタの2乗和平均値

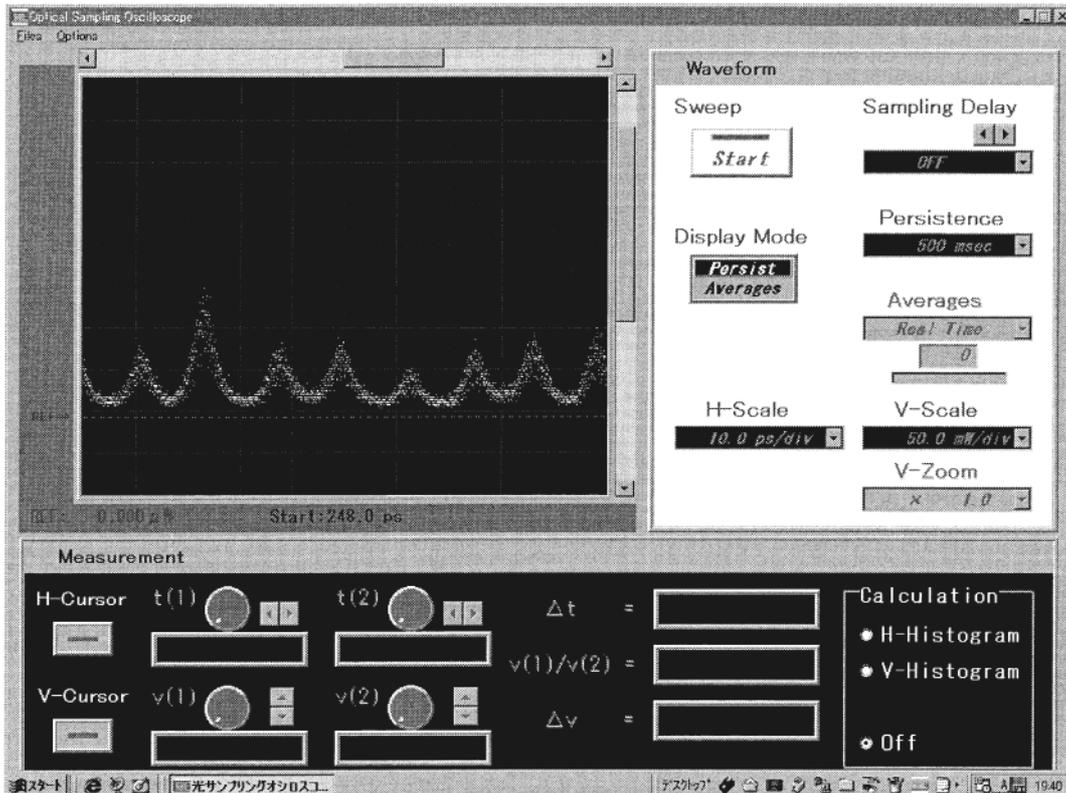


図5 光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの測定画面の一例
Measurement display of Optical Sampling Oscilloscope SJE9203A

5.2 主な規格

光サンプリングオシロスコープSJE9203Aの主な規格を表2に示す。低ジッタおよび高い時間分解能を保つために入力されるクロックは固定となっている。また、表示上のSN比を3dBと定義したときの測定感度は、パーシストモードで+20dBmである。測定画面の一例を図5に示す。

6 測定例

6.1 高繰り返し光パルス測定

光サンプリングオシロスコープの基本的な測定例として、

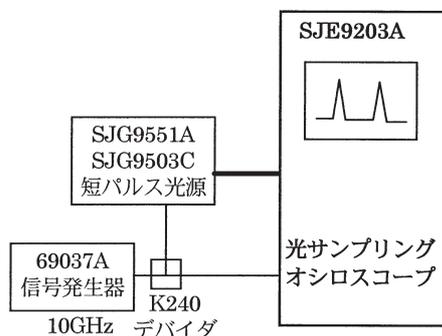


図6 パルス波形測定構成図
Experimental setup of optical pulse measurement

STM-64 (約10GHz)のクロックによる短パルス光源のパルス波形測定について紹介する。図6に測定構成図を示す。被測定光源として、短パルス光源SJG9551AおよびSJG9503Cを用いた。

6.1.1 短パルス光源SJG9551A

SJG9551Aは、エルビウムファイバを用いたモードロックリングレーザである。特長として波長が1535～1565nmまで変換することができ、パルス幅5ps以下の短パルス光を出力することができる。出力パルスは、ソリトンパルスと言われている。



図7 短パルス光源SJG9551A外観図
External view of SJG9551A Optical Short Pulse Generator

るほぼトランスフォームリミットなパルスとなっている。調整および制御はコンピュータから行う。

用途として、ソリトン伝送用光源、WDM/TDM伝送用光源、波長分散測定用光源などがある。外観図を図7に示す。

6.1.2 短パルス光源 SJG9503C

SJG9503Cは、光サンプリングオシロスコープでも使用している単一モード発振半導体レーザとEA変調器を組み合わせた光源である。CタイプはDDFを内蔵し、ファイバ内の非線形効果を利用したパルス圧縮も取り入れているため、繰り返し周波数10GHzでパルス幅0.5psの極めて狭い超短パルス光を出力することができる³⁾。

用途として、TDM伝送実験、デバイス評価用光源などがある。また、数種類の発振波長を持つSJG9501を用意することにより、WDM/TDM伝送用光源に用いることもできる。SJG9503Cの外観図を図8に示す。

また、開発した短パルス光源の主な規格を表3に示す。

6.1.3 測定結果

図9は、各短パルス光源のパルス波形をパーシストモード



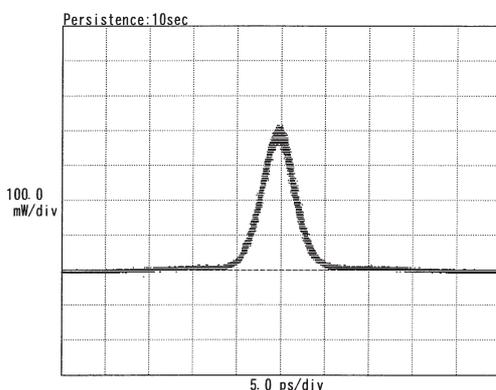
図8 短パルス光源 SJG9503C 外観図

External view of SJG9503C Optical Short Pulse Generator

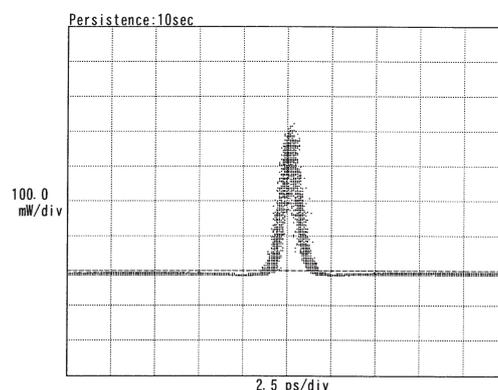
表3 短パルス光源の主な規格

Specifications of Optical short pulse generators

項目	規格				備考
形名	SJG9551A	SJG9501A/B	SJG9502B	SJG9503C	
パルス中心波長	1,535 ~ 1,565nm		1,555nm ± 5nm		
パルス繰り返し周波数	8 ~ 11GHz		9 ~ 11GHz		外部クロックによる制御
パルス幅	< 5ps	< 15ps	< 5ps	< 0.5ps	
パルスピークレベル	> + 13dBm	> + 10dBm	> + 15dBm	> + 25dBm	
時間帯域積 (typical)	0.4				
光パルス偏光状態	単一偏波 消光比 15dB		無偏波		
光出力コネクタ	SC/SPC型				
ジッタ	外部クロックのジッタ + 0.2ps				10Hz ~ 100kHz
クロック入力レベル	+ 8dBm ± 1dB				正弦波
付属品	制御用PC		なし		



(a) SJG9551A



(b) SJG9503C

図9 短パルス光源のパーシスト波形

Persist waveform of optical short pulse generator

で測定した結果である。比較のために、PD (32GHz) と電気
のサンプリングオシロスコープで測定した波形を図10に示
す。SJE9203Aで測定した波形は、真のパルス幅5psを表示で

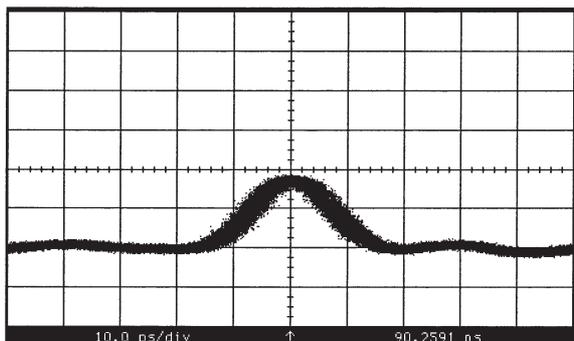
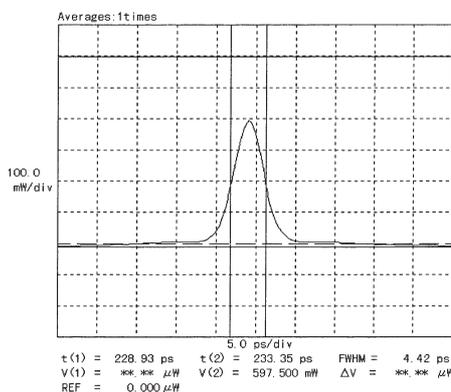
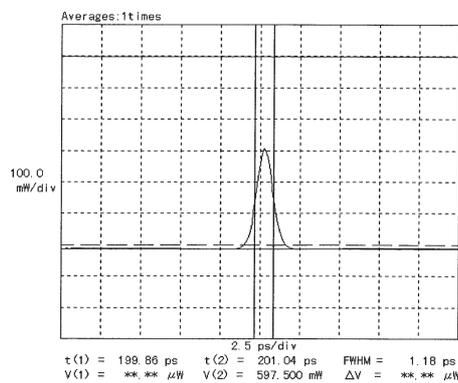


図10 PD (32GHz) と電気
のサンプリングオシロスコープによる
波形測定 (SJK9551A)
Waveform measurement of SJK9551A with PD and electrical
sampling oscilloscope

きるのに対し、PDを用いた方法では波形がなまりパルス幅が
広がってしまう。また、タイミングジッタもSJE9203Aでは抑
えられているのに対し、電気
のサンプリングオシロスコープ
では数ps存在してしまう。図11にアベレージモードで測定し
た結果を示す。パルス幅測定機能により、被測定光のパルス
幅はそれぞれ4.4ps, 1.2psであることがわかる。比較のために
自己相関器での測定結果を図12に示す。SJK9551Aはほぼ一致
しているのに対して、SJK9503Cのパルス幅は相関器の値より
も2倍以上広く表示されている。これは、測定分解能が1psで
あることに起因している。パルス幅が狭い光に対しては、サ
ンプリング光のパルス幅およびタイミングジッタ量を考慮し
て算出する必要がある。サンプリングパルス幅約0.8ps, ジッ
タ量約0.4psであることから、2乗和の平方根から算出すると、
SJK9503Cのパルス幅は0.5psとなり、自己相関器によるパル
ス幅と一致する。

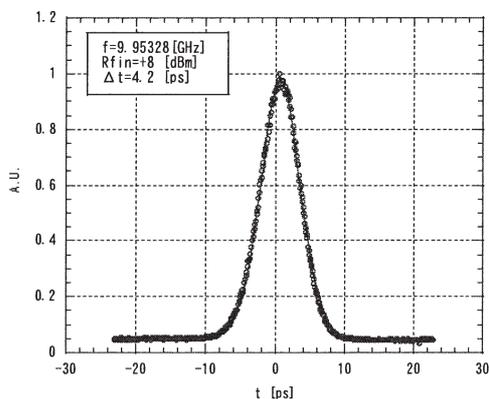


(a) SJK9551A

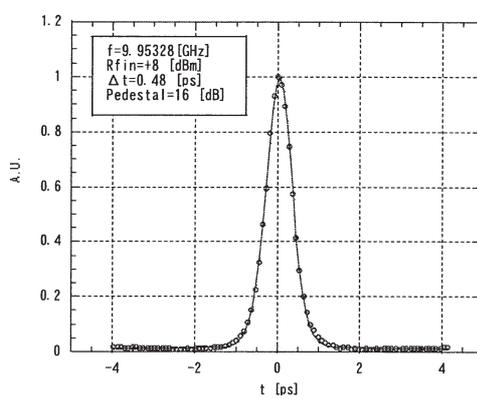


(b) SJK9503C

図11 短パルス光源のアベレージ波形
Average waveform of optical short pulse generator



(a) SJK9551A



(b) SJK9503C

図12 パルス光の自己相関波形
Autocorrelation trace of optical pulses

上述の結果より、光サンプリングオシロスコープSJE9203Aが、低ジッタかつ分解能1psでリアルタイム測定ができていることが明らかである。

6.2 伝送実験による波形測定

短パルス光源SJG9551Aを用いて40Gbit/sに時間多重した光信号の40km伝送後の波形測定を紹介する。伝送実験の構成を図13に示す。短パルス光源SJG9551AはSTM-64のクロックでパルス発振しており、パルスパターン発生器により、パルス光をランダム変調した後、偏波多重により40Gbit/sに時間多重している。時間多重された信号は、分散シフトファイバ(DSF)を40km伝送後、光サンプリングオシロスコープで波形測定される。ファイバアンプAは、ファイバ内の波長分散によるパルス幅の広がりを抑えるためのものであり、ファイバアンプBは被測定光の光強度を増すためのものである。測定した波形を図14に示す。

図14から、25ps間隔(40GHz)で、RZ信号のアイダイアグラムが測定できていることがわかる。PDと電気のサンプリングオシロスコープによる測定では、PDの帯域制限のためパルス光の分離が不十分となり、観測される波形が三角波状にな

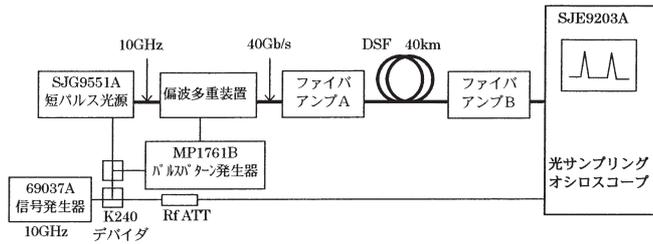


図13 時間多重伝送実験構成図 (40Gbit/s x 40km)
Block diagram of TDM transmission experiment
(40Gbit/s x 40km)

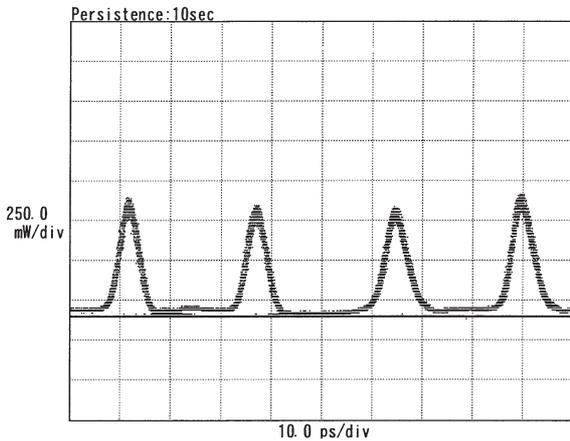


図14 SJG9551Aの40Gbit/s時間多重・40km伝送後の光波形測定
Eye diagram measurement of SJG9551A through 40km DSF with 40Gbit/s TDM

ってしまう。光サンプリングオシロスコープで測定した場合、時間分解能が1psなので、パルス光が十分に分離され、伝送波形を忠実に評価できる。

6.3 波長分散測定

ファイバ内およびデバイス内の波長分散による光パルスへの影響は、高符号速度化が進むにつれて問題視されてきている。光サンプリングオシロスコープSJE9203Aと短パルス光源SJG9551Aとを用いることにより、応用測定として被測定物の相対的な遅延時間を測定することができる。

図15に波長分散測定の構成を示す。SJG9551Aから出力されるパルス光はファイバコブラによりリファレンス光とプローブ光に分かれる。プローブ光は被測定物を伝送した後ファイバコブラで再びリファレンス光と合波する。一方、リファレンス光は何も介さずに、プローブ光と合波する。SJG9551Aから出力されるパルス光の波長を変化することにより、被測定物の波長分散による遅延時間がリファレンス光との相対的な時間差となって光サンプリングオシロスコープで測定できる。

図16に測定結果の一例を示す。被測定物として100mの

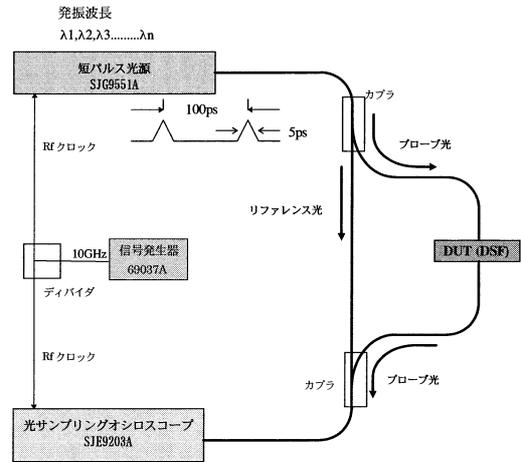


図15 波長分散測定の構成図
Block diagram of chromatic dispersion measurement

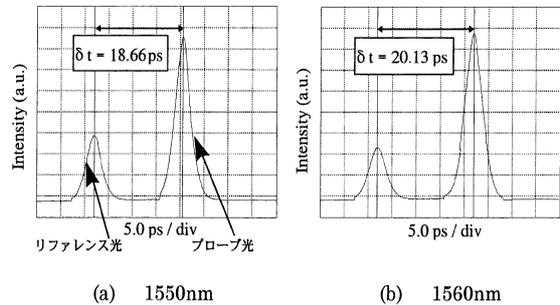


図16 相対遅延時間測定の一例
Examples of relative delay time measurements

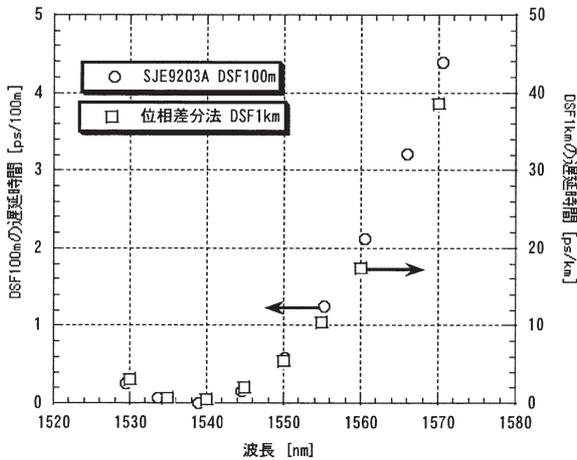


図17 相対遅延時間の測定結果
Relative time delay of 100m DSF and 1km DSF

DSFを用いた。通常、100m程度のDSFは群遅延時間が小さいために測定が困難であった。図16では、入力波長1,550nmと1,560nmに対して相対遅延時間約1.5psが観測できている。この方法を用いることにより、DSFの群遅延時間を測定すると、図17のようになる。比較のため、同じロットの1kmのDSFを位相差分法で測定した結果と一緒に示す。位相差分法は、比較的遅延時間の大きいものを測定するのに有効な方法であるが、遅延時間の少ない100m程度のDSFを測定することはできない。図17から、光サンプリングオシロスコープを用いた波長分散測定法が、時間分解能1psで相対的な遅延時間を測定できることがよくわかる。この方法を用いることにより短尺なエルビウムファイバの波長分散測定も可能である⁴⁾。

7 むすび

高符号速度光伝送の波形測定器として、時間分解能1psでアイダイアグラム測定が可能な光サンプリングオシロスコープSJE9203Aを開発した。SJE9203Aを用いて、今まで測定のできなかった40Gbit/sの伝送光波形、0.5psの短パルス光をパーストモードで評価することができることを確かめた。今後は、高感度測定、繰返し周波数の可変性、小型化、低価格化など多岐にわたる課題を解決するために更なる開発を進めていく。

謝 辞

本器の開発を進めるにあたり、ご助言、ご教示頂いた、日本電信電話株式会社未来ねっと研究所フォトニクスポートネットワーク研究部の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 高良, 川西, 山林, 猿渡: “和周波光発生を用いた光サンプリングによる超高速光波形測定法”, 電子情報通信学会論文誌B- , Vol.75-B- , No.5, pp.372-380 (1992.5)
- 2) T. Otani, A. Otsubo and H. Watanabe: “A turn-key-ready optical sampling oscilloscope by using electro-absorption modulators”, ECOC'99, P3.2 (1999.9)
- 3) T. Otsubo, A. Otani and H. Watanabe: “Timing Jitter of Optical Pulse using Electroabsorption Modulator with Dispersion Decreasing Fiber”, ECOC'99, P1.7 (1999.9)
- 4) A. Otani, T. Otsubo and H. Watanabe: “Chromatic dispersion measurement of EDFA using optical sampling oscilloscope”, OFC'98 ThA4 pp. 255-256 (1998.2)