

PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10cm 分解能 Brillouin 分布計測の実現

李 哲賢, 津田 勉, 岸田 欣増

ニューブレクス(株) 〒650-0045 兵庫県神戸市中央区港島 9-1 KIO315

E-mail: li-z@neubrex.jp

あらまし パルス・プリポンプ方法 (Pulse-PrePump) を用いた高分解能 Brillouin 分布計測 (BOTDA) の理論検討についてすでに発表し, その高距離分解能測定, 高ひずみ / 温度測定精度の可能性を示した. 本論文は, その内容に基づいて高距離分解能 (10cm) かつ高ひずみ測定精度 ($\pm 25 \mu$) で光ファイバの性能を測定する可能な PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) を開発したことについて述べたものである. 本論文では, まず理論検討の結果と実測データの結果とを比較し, PPP-BOTDA の利点を明らかにした. 次に PPP-BOTDA の構成について述べ, 実現可能な距離分解能, Brillouin 周波数シフト測定精度, 測定範囲について明らかにする. 最後に開発したポータブルタイプな PPP-BOTDA を使って, 実際に測定した 10cm 空間分解能, $\pm 25 \mu$ ひずみ測定精度の結果を報告し, PPP-BOTDA の実用性の高さを示した.

キーワード パルス・プリポンプ方法, PPP-BOTDA, Brillouin 分布計測, 高距離分解能, 高ひずみ測定精度

PPP-BOTDA method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique

LI Che-Hien, Tsutomu TSUDA, Kinzo KISHIDA

Neubrex Co., Ltd KIO315 9-1 Minatojima, Chuou-ku, Kobe, Hyougo 650-0045 Japan

E-mail: li-z@neubrex.jp

Abstract Principle of Pulse Pre-Pump (PPP) method was published in our previous work. The possibility of access both high spatial resolution and good precision was illustrated. These double specs have been the target of Brillouin distributed measuring technique (BOTDA) for more than 10 years. This paper reports the experimental results of PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) based on the published theory. In this report, we describe the system of PPP-BOTDA. The results of theoretical prediction and experimental data are compared. PPP-BOTDA method shows a unique advantage over other existing plans. The topics of spatial resolution, Brillouin frequency shift precision, and measurement range are discussed. Based on these new understanding, a commercial portable type system of PPP-BOTDA is developed. The spatial resolution of 10cm and the strain measuring precision equivalent to $\pm 25 \mu$ are successfully achieved, as well as kilometers order of sensing distance. This was not reported before to our knowledge. We believe this system has a high utility in the future.

Keyword PPP-BOTDA, Pulse-PrePump Method, Brillouin, Highly spatial resolution

1. はじめに

パルス・プリポンプ方法を用いた高分解能 Brillouin 計測の理論検討 [1] の中に, センチオーダーの高分解能 Brillouin 分布計測を実現する方法を提案した. その方法を要約すると, 次のようになる. (1) システムの基本構成は, BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) である. (2) 歪測定精度に影響する誘導 Brillouin・ゲイン・スペクトル (BGS) の幅が広がらないようにパルス光 (D) が通過する前にフォノンを十分に励起するパルス・プリポンプ幅 (D_{pre}) を供給する. (3) 位置情報を影響するパルス幅の応答が拡散しないよう

にパルス光の平均パワー (A_p と D) とプリ・ポンプ光の平均パワー (C_p と D_{pre}) はある一定の比例を供給する.

本報告では, まず PPP-BOTDA の基礎理論について説明し, 予備実験で前回報告したシミュレーションの結果 [1] を検証し, さらに各々のレベル (レリー後方散乱光, 誘導 Brillouin 散乱光 [3], パルス・プリポンプした誘導 Brillouin 散乱光) を計算し, その結果を使ってシステムの最小受光レベルに合わせてシステムのダイナミック・レンジを試算した. 次に, PPP-BOTDA のシステム構成について説明し, Brillouin 周波数シフトを発生する方法, 階段状のパルス光を発生する方法, 安定した誘導 Brillouin 散乱光を得る方法などについて述べ

る.最後に,開発したポータブルタイプな PPP-BOTDA (NEUBREScope NBX-6000) を使って,10cm 分解能、±25 μ 測定精度が達成されたことを報告する.

2.PPP-BOTDA の原理と予備実験による検証

2.1.計測の基礎理論

ポンプ光に階段状のパルス光を用いることが PPP-BOTDA の特徴であり,その計測概念図を図 1 に示す.

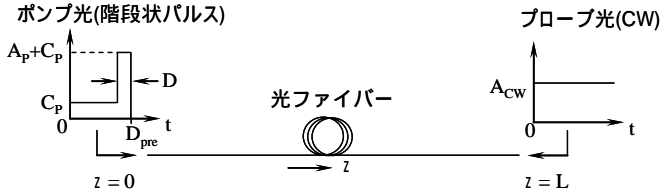


図 1 計測概念図

パルス・プリポンプ光として用いる光を

$$A_p(t) = \begin{cases} A_p + C_p, & D_{pre} - D \leq t \leq D_{pre} \\ C_p, & 0 \leq t \leq D_{pre} - D \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

と表わす.ここで A_p と C_p はそれぞれポンプ光とプリポンプ光の振幅を表す. $A_p(t)$ の消光比は(2)式で表す.

$$R_p = \left(\frac{A_p + C_p}{C_p} \right)^2 \quad (2)$$

光ファイバの誘導散乱光の振幅は, Brillouin 誘導散乱方程式系を摂動法で解くことにより

$$E_{CW}(z,t) = A_{CW} [1 + \beta H(t,\Omega)] \quad (3)$$

と表わされる[2].ただし,ここで $E_{CW}(z,t)$ は cw 光の振幅、 β は摂動パラメータで、 $H(t,\Omega)$ は後述するような時間と周波数の関数である.これらの意味は文献[2]に示した.誘導 Brillouin 散乱の利得は散乱がない場合のプローブ光のパワーからの増加分として次のように表わされる.

$$V(t,\Omega) = \frac{1}{2} \beta A_{CW}^2 H(t,\Omega) + c.c. \quad (4)$$

(1)式のポンプ光を用いた時,(4)式の右辺に含まれる成分は次のように 4 つの項に分解される.

$$H(t,\Omega) = H_1(t,\Omega) + H_2(t,\Omega) + H_3(t,\Omega) + H_4(t,\Omega) \quad (5)$$

ただし、

$$H_1(t,\Omega) = A_p^2 \int_{v_g(t-D_{pre})/2}^{v_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-D_{pre}+D-2z/v_g} h(z,s) ds dz \quad (6.1)$$

$$H_2(t,\Omega) = A_p C_p \int_{v_g(t-D_{pre})/2}^{v_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-2z/v_g} h(z,s) ds dz \quad (6.2)$$

$$H_3(t,\Omega) = A_p C_p \int_{v_g(t-D_{pre})/2}^{v_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-D_{pre}+D-2z/v_g} h(z,s) ds dz \quad (6.3)$$

$$H_4(t,\Omega) = C_p^2 \int_{v_g(t-D_{pre})/2}^{v_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-2z/v_g} h(z,s) ds dz \quad (6.4)$$

$$h(z,s) = \Gamma e^{-[\Gamma + i(\Omega_B(z) - \Omega)]s} \quad (7)$$

であり, L は光ファイバの長さを、 $\Omega_B(z)$ は Brillouin 散乱の中心周波数を表わす.また、 $\Gamma = \Gamma_B/2$ であり、 Γ_B はスペクトルの半値全幅 (FWHM: full width at half maximum) に等しく、フォノンの寿命とは式(8)で関係付けられる

$$\tau_B = 1/\Gamma_B \quad (8)$$

2.2.予備実験による検証

(6.1)式から(6.4)式によってポンプ光からプローブ光へのエネルギーの転移に関して(6.1)式と(6.2)式では局所的(D)に行われ,局所的な位置情報が保持されるようになる.一方,(6.3)式と(6.4)式ではエネルギーの転移が長時間(D_{pre})にわたって行われ,位置情報が拡散されてしまう.今回提案した階段状のパルス光は D_{pre} の部分が短いパルス ($D_{pre} - D$) を用いることにより H_2 を上手く強調し、 H_4 を上手く抑えることによって局所的な情報が拡散されないようになる.

前節で述べた PPP-BOTDA の原理を検証するために,図 2 に示すような実験系を用いて検証を行った.ポンプ光は(a)パルス幅 $D=1\text{ns}$ の短いパルスのみ,(b)プリ・ポンプパルスに相当する $D_{pre}=13\text{ns}$ の長いパルスのみ,(c)の階段状のパルスが PPP-BOTDA で用いられるパルスになる.ここでは消光比は $R_p=25\text{dB}$ とした.BGS の測定は図 2 の中の Position A,B,C で行なった. Position A はその近傍も含めて歪のない位置であり, Position B と C は幅 20cm の歪区間のそれぞれ境界と中心の位置にある.

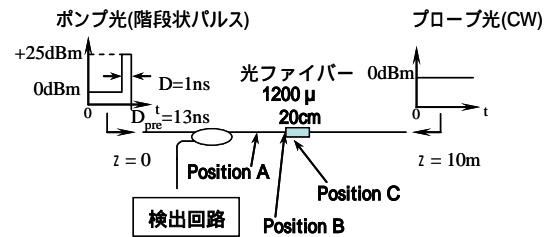


図 2 基礎理論を検証する実験系

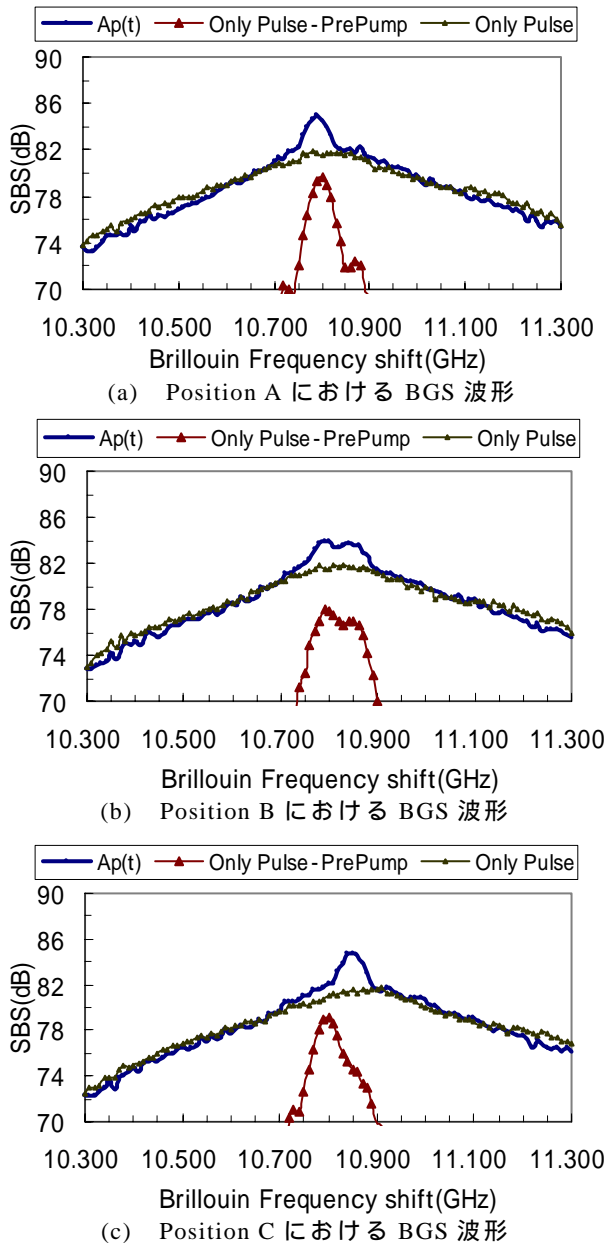


図3 PPP-BOTDAによる予備実験の測定結果

図3の(a)は3種類のポンプ光に対するPosition AでのBGSを測定した結果である。パルス光のみ(図中のOnly Pulse)の場合はフォノンが完全に立ち上がっていないのでBGSの帯域幅は500MHz以上に広がっている。一方、パルス・プリポンプ光のみ(図中のOnly Pulse-PrePump)の場合はフォノンが50%までに立ち上がっているため、BGSの帯域幅は80MHz以下に抑えられていること。階段状のパルス光(図中の $A_p(t)$)の場合には、短いパルスの前のパルス・プリポンプ光の通過によってフォノンが先に励起されるために、パルス・プリポンプの場合と同様の尖っているBGSが得られる。そのBGSの帯域幅はおよそ80MHzになり、高歪測定精度が得られる。

図3の(b)は歪の変化境界のPosition Bにおける3種類のポンプ光に対するBGSを測定した結果である。この場合には、長いパルスと階段状のパルスに対しては、この位置の両側の異なる歪量に対応してBGSには2つのピークが現われていることがわかる。

図3の(c)は歪区間の中央のPosition Cにおける3種類のポンプ光に対するBGSを測定した結果である。パルス光のみの場合はBGSの帯域幅は500MHz以上となり、ブリルアン周波数シフトの変化は観察しにくい。一方、パルス・プリポンプ光のみの場合は長いパルスであるため空間分解能が悪く、そのため幅が20cmの区間の歪に対応するブリルアン周波数シフトは観察できない。これらに対して、階段状のパルス光を用いた場合はパルス・プリポンプ光の通過によってフォノンが先に励起され、短いパルスの1nsは距離にすると10cmに相当するため、短いパルスが通過する時に歪量に合うブリルアン周波数シフトがシフトし、かつ尖っているBGSが得られる。そのBGSの帯域幅もおよそ80MHzになり、高距離分解能が達成できることがわかる。

2.3.SBS レベルの検証

図2に示すような実験系を用いて各々のレベル(レリー後方散乱光、誘導ブリルアン散乱光、パルス・プリポンプした誘導ブリルアン散乱光)を計算し、その結果を表2にまとめた。ブリルアン利得係数 g を $2.5 \times 10^{-11} (m \cdot W)$ とする。フォノンの立ち上がりによる g の減衰は(4)式によって換算された。表2からわかるようにレリー後方散乱光の影響は少なく、受光側にレリー散乱光を取り除く光フィルタを入れなくても全体に影響しないことを確認した。

今回設計した10cm分解能の受光系の最小受光レベル(P_D)は-37dBm(BW:1GHz)で、システムのダイナミックレンジ(DR)は式(9)によって計算ができる。

$$DR = (P - P_b(z) - P_D - L_C + SNR_{AV}/2 - SNR) / 2 \quad (9)$$

- $P - P_b(z)$: 階段状なパルス光のSBS(-29dBm)
- P_D : 受光系の最小受光レベル(-37dBm)
- L_C : 受光側の結合損失(1.5dB)
- SNR_{AV} : 平均加算によりSNRの改善率(9dB:2¹²)
- SNR : 曲線近似に必要なSNR(3dB)

各数値を式(9)に代入すると、10cm分解能のDRは約4dBになる。

表2 各々のレベルの計算結果

レリー後方散乱光(dBm)	-57
誘導ブリルアン散乱光(dBm) (フォノンの立ち上がりによる影響ない場合)	-21
フォノンの立ち上がりによる g の減衰(dB)	12
$P_b(z)$: Pulse光のみの誘導ブリルアン散乱光(dBm)	-33
Pulse-PrePumpがあった時の g の減衰(dB)	8
階段状なパルス光の誘導ブリルアン散乱光(dBm)	-29

3.PPP-BOTDA の構成と設計

3.1.システムの基本構成

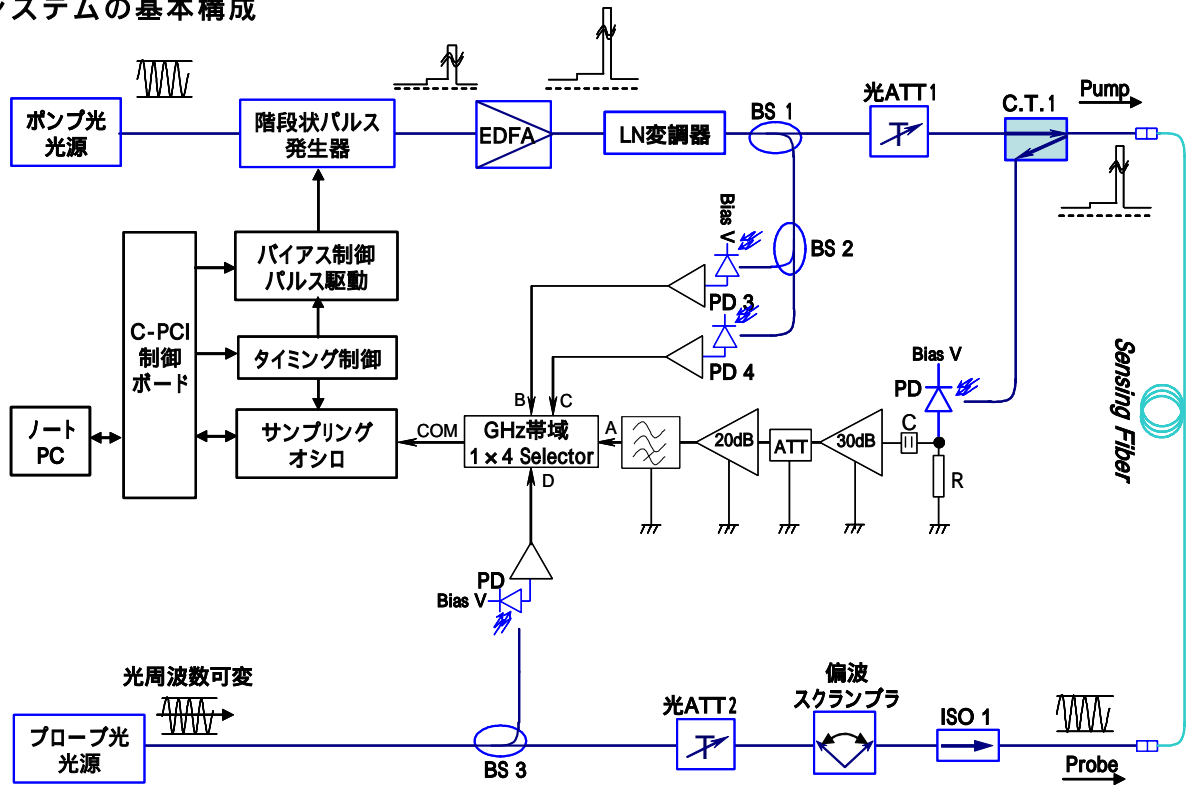


図4 PPP-BOTDAの基本構成図

図4にPPP-BOTDAの基本構成図を示す。

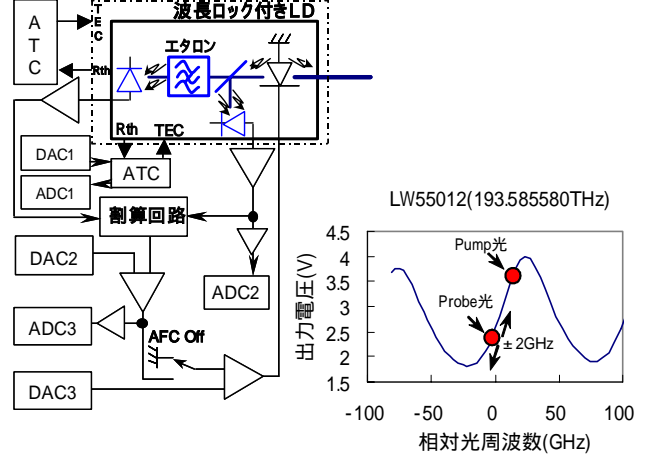
PPP-BOTDAは、開発の効率を向上するために全体を操作・解析部（ノートPC）、信号処理・制御部（本体）、光源部（光源ユニット）に分割し、ノートPCと本体との間にC-PCIバスで接続し、C-PCI制御ボードを通して本体と光源部を接続した。

操作・解析部は市販のノートPCを使用するので、いつでもバージョンアップができ、CPUの処理速度がアップすることにより、解析速度の向上も簡単に改善される。本体にCPUを持たせない設計をしているので、将来のバージョンアップも簡単に行える。信号のサンプリングと信号処理は市販のC-PCIバス用のサンプリング・オシロ（1GHz, 2Ga/s）を採用し、メモリも4Mwに設けたので、信号処理速度が大幅に向上することができる。光源部は市販の波長ロック付きLDを採用し、温度制御と周波数制御で絶対周波数管理を行った。そのため二つの光源を使用しても相対周波数の安定度が向上することができた。

3.2.光源の設計

ポンプ光とプローブ光の光源は市販の波長ロック付きの半導体DFB・LDを採用し、図5(a)に示すように波長ロック付きLDの筐体をさらに温度制御を施し、環境温度の影響を最小限にした。図5(b)は光周波数を

掃引する方法を示し、エタロン特性の傾斜にロックされた波長ロック付きLDから+方向と-方向に光周波数制御をかける。



(a) 光源の制御 (b) エタロンの特性
図5 光源の光周波数制御

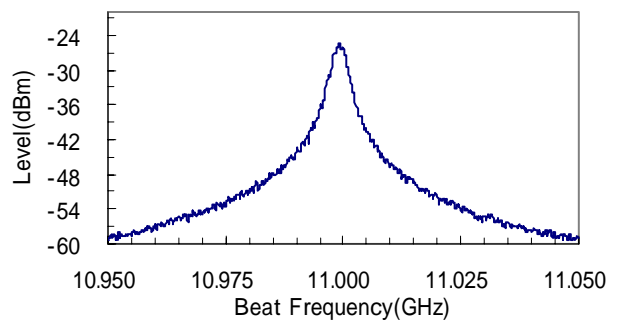
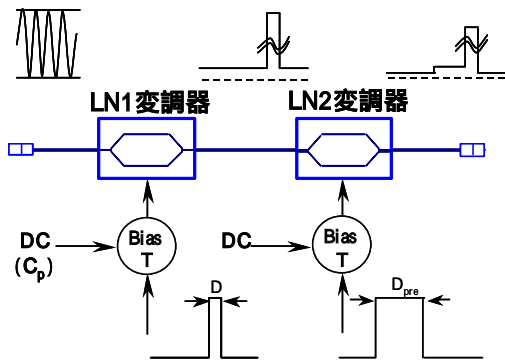


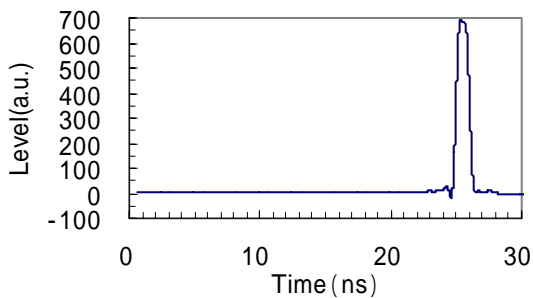
図6 ポンプ光とプローブ光のビート周波数波形ける方法を採用した. その制御された光周波数の安定度は $1\text{MHz}/30$ 分に達成している. 両方光源のビート周波数の線幅は合わせて 2.5MHz 以下になり, その波形を図6に示す.

3.3. 階段状なパルス光の生成

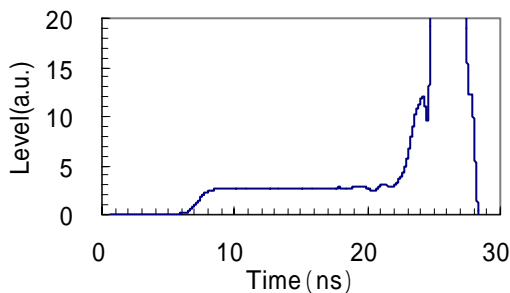
階段状なパルス光の生成はLN1, LN2変調器を使う. 図7(a)に示すように, まずLN1変調器の動作点の制御(DCバイアスの制御)により C_p のレベルを決め, 次にパルス幅の制御によりDの幅を決定する. 最後にLN2変調器のパルス幅を制御することにより D_{pre} の幅が決める. 図7(a)は $D=1\text{ns}$ の出力波形で, 図7(b)は $D_{pre}=13\text{ns}$ の出力波形である. A_p と C_p のレベルはP3とP4によってモニタされ, その結果でEDFAとDC(C_p)を制御し, A_p と C_p は所定なレベルまでに制御が行われる.



(a) 階段状なパルス光の発生



(b) 階段状なパルス光(1ns)の出力波形



(c) D_{pre} 部分の拡大波形

図7 階段状なパルス光の生成回路と出力波形

4. 実験の構成

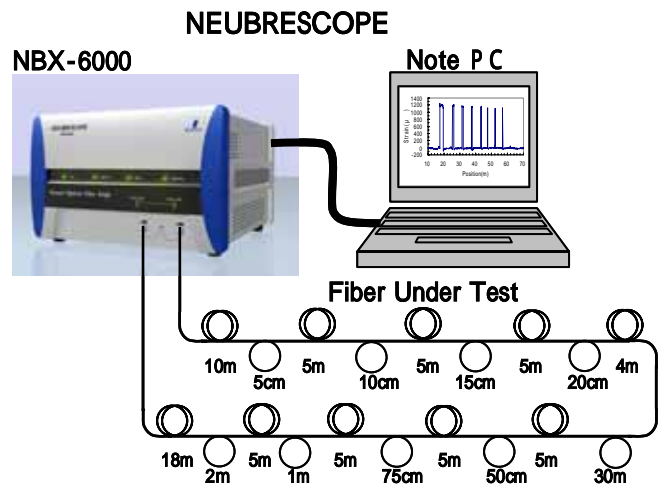


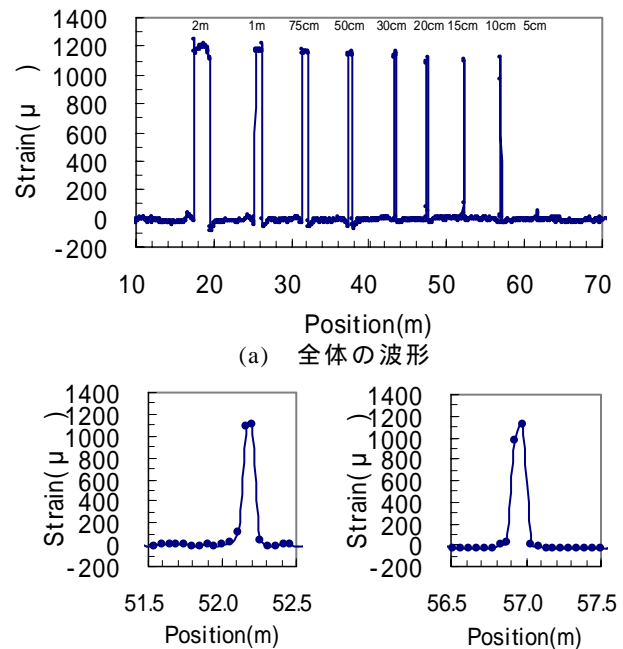
図8 実験の構成

図8は今回の実験系を示す. 全長は約 75m で, 二種類の異なるブリルアン周波数シフト・ファイバで構成した. 二重丸にした種類と一重丸にした種類とのブリルアン周波数シフト差は 51.6MHz (約 1200μ ($51.6\text{MHz}/0.0493\text{MHz}/\mu$)) である. その間は全数に融着で接続を行った.

条件として, $A_p=+25\text{dBm}$, $R_p=25\text{dB}$, $D=1\text{ns}$, $D_{pre}=13\text{ns}$, $CW=0\text{dBm}$, 掃引光周波数のステップ= 5MHz で行った.

5. 実験結果と検討

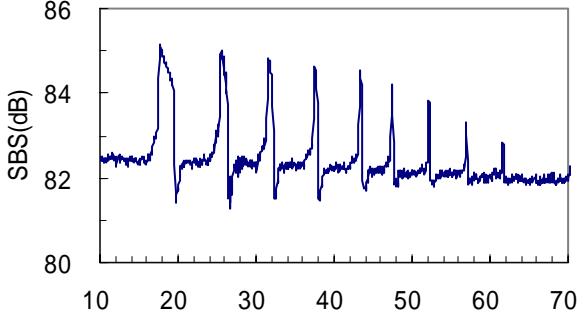
図9は測定した結果であり, (a)は全体の波形で, (b)は 15cm の場所を拡大した図で, (c)は 10cm の場所を拡大した図であり, 10cm の分解能を示した.



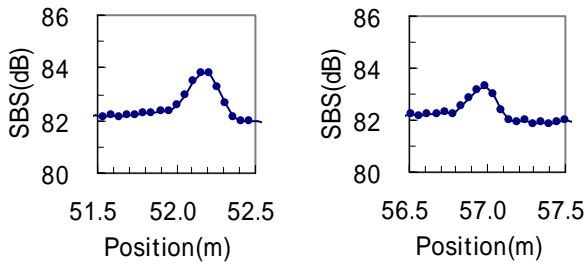
b) 15cm の場所 (c) 10cm の場所

図 9 測定結果

図 10 と図 11 は時間軸の波形と周波数軸の波形を示し、図 10(c)は 10cmファイバの場所にSBS波形を拡大した波形である。つまり、 $D=1ns$ 、 $D_{pre}=13ns$ の階段状なパルス光で局所的な情報を得た立証である。図 11(c)は 15cmファイバの場所にBGS波形が拡散されていない立証である。

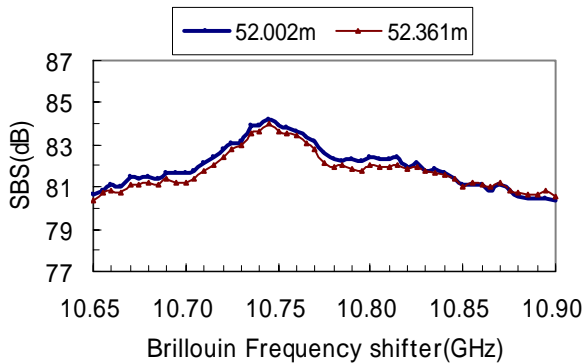


(a) 全体の波形

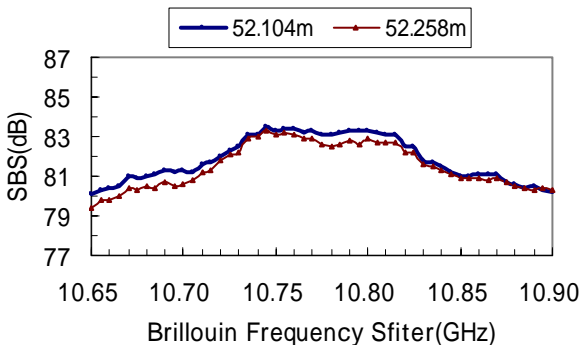


(b) 15cm ファイバの拡大 (c) 10cm ファイバの拡大

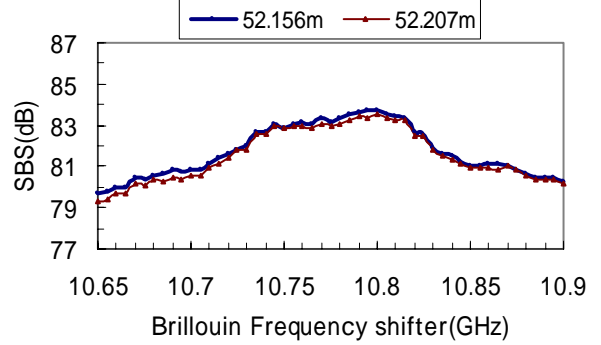
図 10 一重丸ファイバのブリルアン周波数シフトに設定した SBS 波形



(a) 52.002m と 52.361m との BGS 波形



(b) 52.104m と 52.258m との BGS 波形



(c) 52.126m と 52.207m との BGS 波形

図 11 15cm のファイバ近辺の BGS 波形

図 12 の結果は 10cm の場所に BGS 波形も拡散していないかったことを証明した。

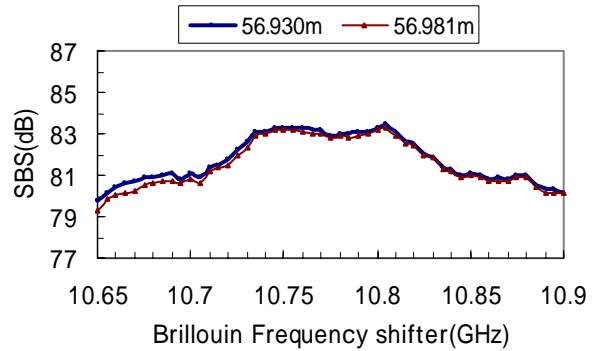


図 12 10cm のファイバの BGS 波形

6.まとめ

高分解能(10cm)と高精度($\pm 25 \mu m$)の PPP-BOTDA のポータブルタイプを開発した。手軽に持ち運べることができるので、ファイバセンシングへの貢献が期待できそうである。今後も PPP-BOTDA に合うシステムを図ると共に、システムに適合するファイバセンサの開発、施工、解析などへ力を注ぐ予定である。

謝辞 本研究を進めるうえで有益な助言を頂いた三菱電機 西口憲一博士と OTTAWA 大学 X.BAO 教授に深謝致します。

文献

- [1] 西口憲一, 岸田欣増, "光ファイバにおける漏れ光を考慮した誘導ブリルアン散乱の摂動解析", 信学技報 OFT, Oct. 2004
- [2] 岸田欣増ら, "パルス・プリポンプ方法を用いた高分解能ブリルアン計測の理論検討", 信学技報 OFT, Oct. 2004
- [3] T.Horiguchi, T.Kurahima, and M.tateda, "Nondestructive measurement of optical-fiber tensile strain distribution based on Brillouin spectroscopy," Trans. IEICE Japan, vol.J73-B_1,no.2,pp.144-152,1990