

光パルス相関信号を利用した 広域分布型光ファイバセンサの最近の進展

野中 弘二

(受領日: 2010年5月6日)

高知工科大学工学部システム工学群

〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: nonaka.koji@kochi-tech.ac.jp

要約: 筆者は半導体レーザによる光パルス発生技術と、それを利用した光パルスの相関測定技術を活用した、ユニークな広域環境の光ファイバセンシング技術を提案している。最近、このセンシング技術のかつての課題であった偏光変動に対する不安定性を解消し、感度・分解能も向上した。領域分割分布計測機能の付与など性能/機能の進歩的改善の現状を報告する。

1. はじめに

光ファイバセンシングは、光ファイバが伝送路として優れた特性を有していること、光計測技術が物理原理に基づく計測であるため電磁ノイズや化学汚染に対する干渉性、非侵襲性を確保できることから遠隔で安全に変化を計測するセンシング手段として有望視されてきた。その種別としては、光ファイバ伝送路にFBG(ファイバブラッグ回折格子)等点計測型の光センサを配置するポイントセンサ [1] と、BOTDR (Briluan Scattering Optical Time Domain Reflectometry) の様に、異なる領域からの情報をあまねく採取する分布型センサに分けられる [2]。

筆者らは、センサ本体や光源に周波数や波長の安定性の高度な制御が要求される従来の光ファイバセンサから発想を転換して、光パルスの相関値を用いることにより、普通のファイバで高分解能と観測距離の長さ、測定範囲の広さを両立する光ファイバセンサを提案してきた [3][4]。しかし、その簡便さと高感度性能の両方を有しているが故に、いくつかの不安定要因や利用可能範囲の限界も有していた。ここ数年、新たな着想や機能を導入することによりこれらの課題を克服し、さらに分解能やダイナミックレンジなど基本性能も改善してきた。本稿で、この基本原理と進歩の過程を報告する [5][6][7]。

2. 光パルス相関を利用した広域光ファイバセンシング

電子計測の高速測定領域では到底評価しきれない極短時間の変化現象を、光パルスを用いて測定する手法は物理学の領域では古くから用いられてきた。これはピコ秒レベルの短光パルスを生成したり、その時間幅を計測することが比較的容易であったからである。この短光パルスの時間波形を簡便に評価する手段のひとつとして時間相関測定法がある。これは、基準パルスと評価すべきパルス (多くは元々同一のパルスを分割したものであることが多い) をある光学結晶上で重ね合わせ、その重なり具合を式 1 の様な強度相関値として計測する。この重なり状態を一方の光パルスの到達時間 (光路長差 τ) を変化させることによって、元の波形を推計する手法である。

$$I_{correlation}(\tau) \propto \int I(t)I(t-\tau)dt \quad (\text{式 1})$$

重なり率を評価する光学素子は非常に高速で高感度に応答する 2 倍高調波 (Second Harmonic Generation: SHG) 素子が利用できるためフェムト秒の時間レベル、光の速度でマイクロメートルレベルの空間的变化もキャッチできる。この分時間分解能は、基準となる光パルスが短くシャープなほど、性能が高度化できる。使用するファイバの品質が一定以上なら、干渉性を用いていないため数 10km 以上の遠隔より飛来した光パルスでも計測

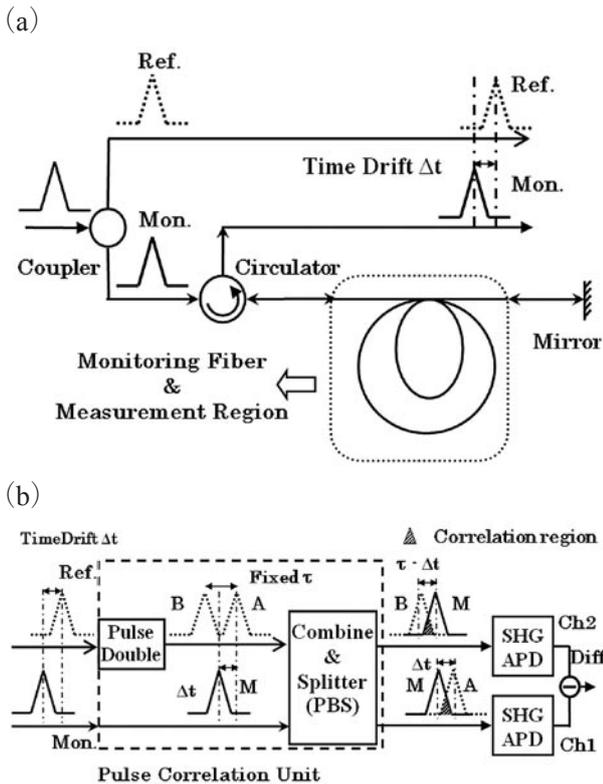


図1：光パルスを活用したファイバセンシング技術の概要

(a) 計測環境の長尺光ファイバを通過した観測光パルスと、基準パルス列との時間位置の関係の変化を計測

(b) 基準パルスと観測パルスの重なりを計測する技術：時間位置をずらしながらパルスを重ね、その重なり率の変動を2チャンネルのSHG素子と光受信機で観測して、電気信号として処理する。

APD: アバランシェホトダイオード光受信機

PBS: 偏光ビームスプリッター

可能である。

通常、この技術は光パルス自身の波形品質を評価することに良く用いられているが、筆者はこの高分解能かつ簡便な特性に着目して、ファイバ伝送路の外部環境変動による信号品質/情報到達タイミングの観測とその光路ゆらぎの補正に用いることができることを提案し、実験的に証明した[3]。

この考え方の発想を逆転させ、ファイバ伝送路自体を外部環境をとらえるセンサと考えると、計測ファイバ部分の伸び ΔL と媒質中の光速 c/n 、時間差 ΔT は以下のような関係が得られる。

$$\Delta T = \frac{n}{c} \Delta L \quad (式2)$$

広域の環境変化をあまねくとらえるファイバ

センサとして活用することができる。図1にこの考え方に基づく光ファイバセンシングの構成を示す[4]。このような計測では、環境検知すべき光ファイバ部分L(図1(a)中の破線で枠囲みされた部分)が長尺であればあるほどわずかな変動率でも積分されて ΔL は大きくなり高感度にキャッチできる。光パルスの時間幅が短いほど高感度となるが、パルス時間幅より大きな変化はとらえがたい。ファイバ接続は図に示すような反射型でも、前方に計測器を設置する透過型でも良いが、反射型の方が同じ環境を往復するため同じ領域の変動を計測する場合信号変化を大きくとらえることができる。

光パルスの時間相関値をとる手段としては、前述のように重なった光パルスの瞬時強度値を非線形に計測するSHG現象が利用可能である。光源から入力した光波長の2倍の周波数(半分の波長)の高調波が、強度の2次に比例して発生する。これを2倍高調波のみを受信可能な光検出器で計測すると、時間相関値が受信強度値として電圧に変換できる。しかしパルス間の時間位置が変化しなくても、長距離を伝送してきた入力パルスの強度が伝送路の損失低下などの外部要因で変化すると、受信強度値が変化する場合も考えられる。このような要因による誤検知を避ける手段として図1(b)に示すように、2つの異なる時間基準との相関値を同時にとってそれを比較することにより、信号パルスの強度揺らぎと時間揺らぎを分離する手法を採用した。この場合、時間位置の変動、つ

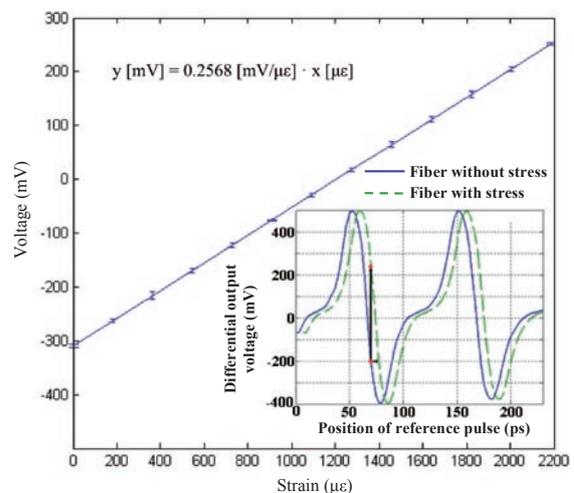


図2: 光パルスの時間相関による、計測出力電圧と観測パルス時間位置の関係(枠内)パルス列の周期性と2チャンネルの差分検知に伴う出力周期性(枠外)中心部分の線形性の高い相関関係

まりファイバ伝送路の環境変化による遅延時間の変化は、図2 枠内実線で示すような、パルス相関形状の微分波形に対応した時間位置と計測信号電圧の関係で表すことができる。この波形が計測パルスの時間位置変動により、破線のように変化する。この変化による定点での計測信号電圧の変化を観測すると、注目する計測パルスの時間位置の変動が推計できる。差分信号が0点を横切る、相関中心付近（基準パルスと計測パルスの時間位置差0近傍）では変動の大きさだけでなく、前方移動か後方移動かなど変動の方位も同時に把握できる。約50cmの光ファイバに引っぱり歪みを与えた場合の印加歪み量と計測信号出力の関係を図2に示す。複数回の試行においても非常に再現性よく、歪み量と計測信号電圧は線形に対応していることがわかる。

2つのチャンネルで相関をとることにより、非常に線形で高確度な計測を可能としているが、その2チャンネルへの分離手段として現在は副屈折による偏光分離法を用いている。これにより、計測信号パルスの偏光方向が変動すると、2つのチャンネルの光パワーの配分比が変動して、不安定要因になる。

またこの計測手法は、計測に用いる伝送路全体をセンサとして用いる。計測ファイバ部分が長尺であればあるほどわずかな変動でも積分されて高感度にキャッチできる。パルスの繰り返し間隔が疎で、パルス幅が広いほど広い時間領域の変動をとらえることができる。一方光パルスの時間幅が短いほど高感度となるというトレードオフの関係がある。さらに、領域全体の環境変動の総和値を観測する手段であるというこの手法の本質上、変動が全領域で平均的にとらえるため、局所的に起こった変動は、その場所の特定が困難であるとの課題も有していた。

3. 偏光の乱れによる信号不安定性を解消する往復計測型のファイバセンシング

差分検知に用いるため採用した光パルスの分離法は副屈折結晶と偏光ビームスプリッタを採用しているため入射パルスの変更方向の変化は分岐比の変動となって現れる。SHGに用いる光学結晶も感度の偏光依存性が大きい。そこで、基準パルスはもちろん、測定環境中を伝搬してきた光パルスにも入射時の偏光方向の安定性が要求される。一般的に既に実用線として敷設されている単一モードファイバをそのまま計測に用いるような広

域環境センシングを考える場合、環境の変化で伝搬時間だけでなく、偏光回転も多少生じてくる。これによる入射光パルスの偏光方向揺らぎの影響解消する手法を検討した。

偏光変動は理想的には全方位に均一なはずの同軸形状の光ファイバ中に残留応力などにより部分的副屈折が生じ、直行する2方向の偏光成分の光波間に位相差が生じて合成波の偏光回転が生じる。光強度に変動はないため、初期設定は偏光回転子で所望の偏光状態に設定するだけで狙った感度、分岐比が得られる。しかし、温度や日積応力による伸縮があった場合、効果の不均一性により時間位置と並列して位相の回転も生じる場合があるため、長期的に安定であるとは言いがたい。このような不確定要素を解消するには、位相変動を隔離して伝搬できる偏波保持光ファイバを用いる方法が先ずある。この場合、高価な偏波保持ファイバは一般的ではないため計測線路は新しく敷設する必要がある。既に各地でセンシングの通信線として敷設されている単一モードファイバをそのまま利用する場合、特性が敷設時期により異なるため、接続が難しい。次に、2光子吸収法など偏光依存性の小さい素子を用いる手段もあるが、現状では感度等の点で性能が不十分である。

筆者らは反射型の計測線路において、ファイバ伝送路中の位相変動が起こりうることは許容した上で、往復伝搬経路全般の平均としては同じ位相揺らぎを受けて直行する偏光方向相互間の位相関係が変動しない手法を採用した[5]。

これを実現するには、あらゆる光波の向きを往路と復路で直交する異なる向きに切り替えて反射する機能が必要である。筆者は図3に示すように反射面にファラデー偏光回転子反射鏡(Faraday Rotation Reflector:FRR)を用いるという簡単な手法でこれを実現した。これによりX偏光で入射した光波成分は帰還時にY偏光成分となり、Y偏光入射成分はX偏光となり帰還する。ゆっくりとした環境変動やファイバの伸縮に比較して、光波は遙かに短時間で光ファイバ伝送線路を往復する。ある光波が往路時に受けた位相揺らぎと同じものを復路でも受けると、その揺らぎ量は2倍となる。X軸方向の揺らぎとY軸方向の揺らぎが異なる場合、その差分が位相差となり偏光回転の原因となる。もし往路で受けたX軸方向の位相揺らぎの影響を受けた光波が復路でY軸方向の揺らぎの影響を受ける。また往路でY軸方向の位相揺らぎの影響を受けた光波が復路でX軸方

向の揺らぎの影響をうけるとすると、往復でいずれも同じ変動量となる。このように配置してやることによって、どちらの軸方向で入射した光波も往復で同じ位相揺らぎを受けるため、相互の関係に変動はなくなり揺らぎ情報が偏光成分比が変動するという不安定性の結果につながらない。

図3に示す実験ではモード同期レーザから発生した光パルスを一モードファイバで接続された光増幅器(EDFA)や分岐装置(Coupler)光サーキュレータ(Optical Circulator)、光遅延調整線(Optical Delay Line)、観測用ファイバ(Monitoring Fiber)で接続しているため、伝送線路の不均一な歪みが生じた場合、計測信号電圧が偏光揺らぎにより大きく変動する恐れがあった。しかし、通常のミラーからFRRにする構成により理論的には偏光揺らぎは完全に解消することができる。実験的には、激しいねじれなどの現象を付与した場合、最大17dBあった不安定性が1.1dB以下まで抑圧することに成功した。残留する揺らぎは、FRR個々で固定されたばらつきがあるので、FRRの作成段

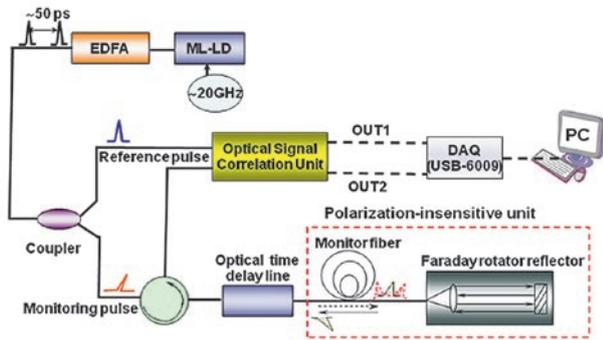


図3: 計測領域(赤破線内)の反射端にFRRを用いた偏光揺らぎ無依存のパルス相関ファイバセンサ

階のばらつきにより直交偏光回転が不完全であったことに起因すると考えている。

4. 高計測時間分解能と広いダイナミックレンジを両立する計測法

光パルス相関を用いた計測手法は、計測に用いる伝送路全体をセンサとしてパルス相互の重なりの変動を計測情報として用いる。よってファイバ部分が長尺であればあるほどわずかな変動でも積分されて高感度にキャッチできる。パルスの繰り返し間隔が疎で、パルス幅が広いほど広い時間領域の変動をとらえることができる。一方光パルスの時間幅が短いほど高感度となるというトレードオフの関係がある。

光ファイバセンサの長所である安全な遠隔監視が必要となる環境観測領域は過酷な環境が多い。例えば、高压高温下の油井での温度観測、深海の水温計測などである。計測すべき環境温度は過酷で変動幅が大きく、かつわずかな変動もキャッチする必要がある。よって高精度な測定と広い計測ダイナミックレンジを両立する計測手段が必要となる。本計測法では光パルス幅、繰り返し周期を変更することで各々の要求に個別に対応することは可能である。しかし両者の条件を同時に満たすことは難しい。そこで、図4に示すように長さの異なる観測用ファイバ2本を併用し、長尺ファイバに高分解能を、短尺ファイバに広ダイナミックレンジを分担させる手法を考案した[6]。長尺ファイバの相関信号は図5(a)の点線に示すように、わずかの温度変化で大きく信号値が変動するが、伸縮量が大きすぎて次の繰り返しパルスとの相関で周期的に信号値が上下する。一方短尺ファ

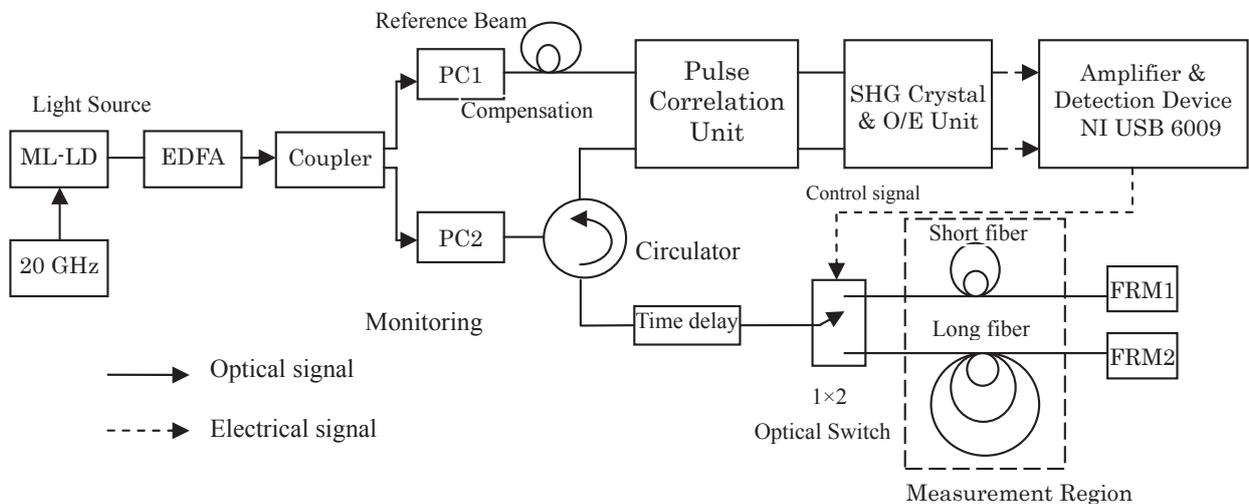


図4 高分解能・広計測範囲温度変動計測器

イバは大きな温度変化でも、伸縮による時間位置の変動は小さいため図5(a) 実線の様に温度変化につれてゆっくり信号値が変化する。2つのファイバ伝送路を光スイッチで切り替えて異なる挙動の計測値をほぼ同時に取得する。得られた情報がちょうど物差しを目盛りの様に詳細で広い領域の温度変化を詳細に計測できる。図5(b)に実測データを示す。理論にほぼ沿った結果が得られている。

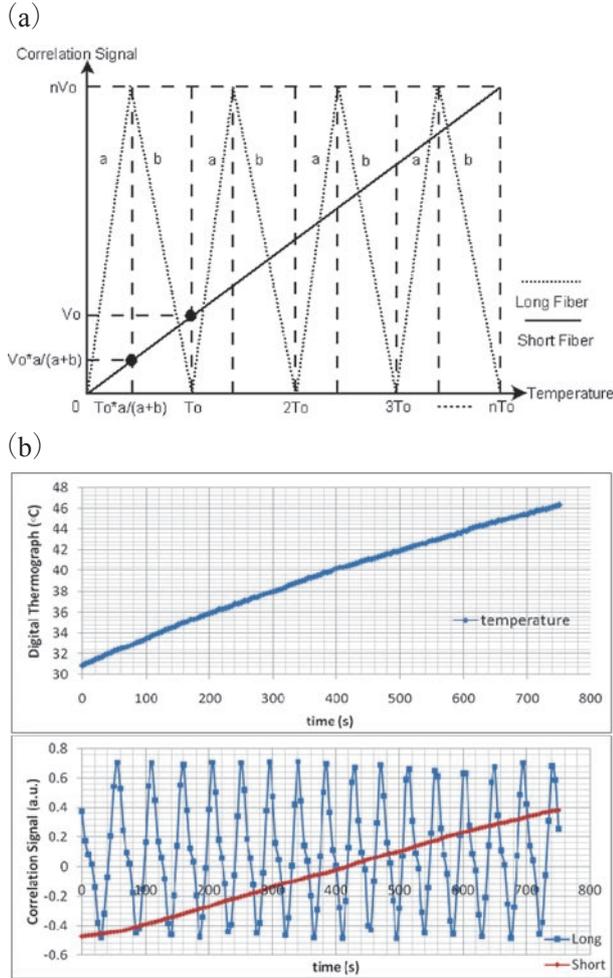


図5: 2つの異なる長さのファイバによる相関値の変動による高精度、広ダイナミックレンジの温度計測手法による観測値

- (a) 理論的予想値 (点線: 長尺ファイバ、実線: 短尺ファイバによる計測値)
 (b) 実験値 下段 青: 長尺、赤: 短尺ファイバによる計測値
 上段: 結果より解析した温度の変化過程の測定値

5. 領域を分割可能な広域分布計測法

遠隔や広域を測定する手段として、FBG など

の点計測の場合、計測点が離散的となりどこで変動が起こるかわからないインフラストラクチャや自然環境の計測では、変動や劣化を見逃す恐れがある。それを避けるために測定領域が連続的な OCDR や OTDR などの分布型の光計測手段が開発されてきた。しかし、干渉を利用する BOCDR の場合コヒーレント長で計測距離が数 km 以下に制限される。パルスの時間を電気的にはかる BOTDR では帰還信号が非常に弱く、感度や分解能が不十分であった。筆者が提案する手法は通常のファイバ敷設線をそのままセンサとして活用でき、分布型の計測で感度も高い。しかし、伝送線路全体の変動の積分値を拾ってしまうため、変動の発生した領域を特定することが困難である。しかし元来、数 km 以上にわたる広域の環境センシングで、変動発生ポイントをセンチメートル単位で特定することはあまり必要性が高くない。むしろ大枠として、どの辺りに問題があるかを領域として特定できれば十分である。

そこで、分布型の本方式の特徴を生かしながら、領域を分割して現象を特定できる機能を付与した広域センサの実現を目指した。その方法としては、反射端を複数設け、各々から帰還するパルス列を分離して相関信号をとることによって、各々の反射端より内側の領域の情報を選択して観測する手法である。各領域からの帰還パルスを区別する手段としては、部分反射ミラーをファイバ接続部に設け、各部分反射ミラーから帰還する光路長の大きな差による帰還タイミングのずれを利用する手法 [7] と、各領域に設けるミラーを FBG を利用した波長選択型の反射端にすることにより、入射光パルスの発光波長を選択することが、領域に対応することにつながる手法がある [8]。図6に、部分反射ミラーをファイバコネクタ端に付与した場合の動作確認実験系の例を示す。重ね合わせる基準パルスの位置を光遅延線 (Optical Delay Line) を前後させることにより選択し、注目する領域を通過して反射帰還した計測パルスの時間位置の変動を追跡する。

$$\Delta t_i = \frac{n}{c} \Delta L_i + T_{delay} - k_i T_m \quad (式 3)$$

で示される時間位置変動 Δt は通過する領域 i, j 長により異なる時間に帰還するが、パルスの繰り返し周期 T_w の周期で基準パルスと重なるため光遅延線の時間 T_{delay} を調整することによりいずれの帰還パルスも相関をとることができる。図7に示すように、異なる時間位置に複数のピークの

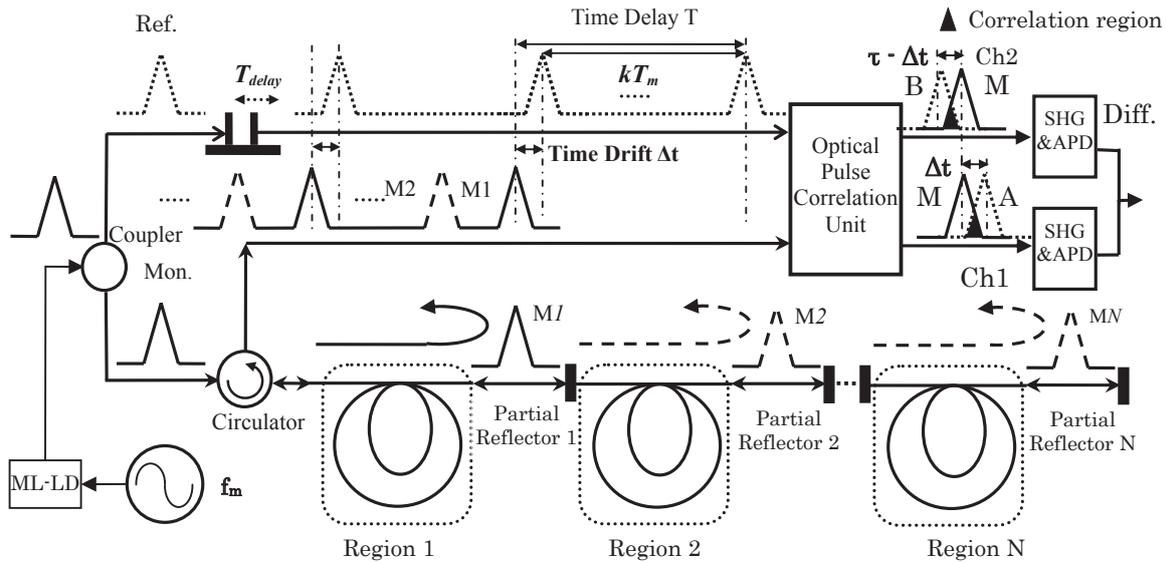


図 6. 測定領域を分割可能な光パルス相関光ファイバセンシングシステム

ある計測データが得られるが、変動する領域によって移動するピークと移動しないピークがある。この関係をデータ採取して解析することによって、複数の領域の中から特定の領域の変動の影響を観察することが可能となった。領域は、パルス列の時間空き領域があれば増設可能であり、パルスの繰り返し周期やパルス幅により現実的には 6 ~ 100 領域ほどが縦列接続可能である。波長選択ミラーを用いる場合は、パルス光源の波長可

変性で性能が制限されるがだいたい 50 領域程度は十分設置可能であると考えている。

6. まとめ

光パルスの時間相関計測法を利用した広域光ファイバセンシング法を提案した。インコヒーレントな計測法であるため遠距離の計測が可能である。パルスの重なりを利用するため高時間分解能（光路長変化 = 温度や歪み変化の分解能が高い）であることなど、様々な利点がある。しかし、パルスの入射偏光方向の揺らぎに対応した計測の不安定性、高分解能と広いダイナミックレンジの両立、変化の起こった領域の特定の困難さなどいくつかの課題があった。しかし、本論文に記載した比較的簡単な改良により、これらの課題を克服できる手法を提案し、実験的に効果を証明した。遠隔性、安定性、分解能、ダイナミックレンジ、領域特定性を併せ持った高機能な光ファイバセンサとして、今後様々な環境モニターの手段として活用が期待できる。

謝辞

本論文の研究成果は筆者研究室の学生との実験、一部は東京農工大学黒川研究室との研究協力・議論を経て得られたものである。博士過程の徐勳健氏をはじめとした筆者研究室卒業生、東京農工大学黒川隆志教授に感謝する。

本研究の一部は JST 育成研究、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 B の補助を得て行われた。

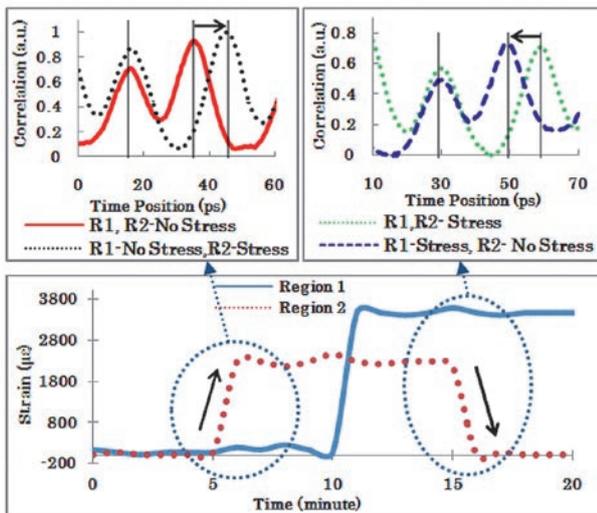


図 7. 複数の反射端 PR1、PR2 から帰還した光パルス相関信号の時間位置と信号ピークの関係、異なる領域 R1、R2 の変動情報を有する。赤線：領域 R2 に引っぱり歪みを加えた場合の変動、青線：R1 を引っ張り続け R2 の引っぱり歪みを解放した場合の変動、領域ごとに独立した変動を分離して抜き出すことができている。

文献

- (1) J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.* 8 pp. 355-375 (1997).
- (2) L. Thevenaz "Review and progress in distributed fiber sensing", OFS-18 Conf. (Cancún, Mexico) paper Thc-1 (2006).
- (3) K. Uchiyama, K. Nonaka, and H. Takara "Sub-picosecond timing control using optical double pulse correlation measurement", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.16, No.2 pp. 626 -628 (2004).
- (4) H.B. Song, T. Suzuki, M. Sako and K. Nonaka "High time resolution fiber optic sensing system based on correlation and differential technique" *Meas. Sci. Technol.* vol.17 pp.1-4 (2006).
- (5) H.B. Song, T. Kurokawa and Koji Nonaka "Polarization fluctuation suppression and sensitivity enhancement of an optical correlation sensing system", *Meas. Sci. Technol.*,vol.18 pp. 3230-3234 (2007).
- (6) X. Xunjian and K. Nonaka, "High -Sensitivity Fiber-Optic Temperature Sensing System Based on Optical Pulse Correlation and Time-Division Multiplexer Technique", *Japanese Journal of Applied Physics* 48, 102403, (2009).
- (7) X. Xunjian and K. Nonaka, "Regional Selectable Distributed Fiber-Optic Sensing System Based on Optical Pulse Correlation and Partial Reflector", *Meas. Sci. Technol.*, Accepted (2010).
- (8) A. Bueno, K. Nonaka and S. Sales, "Hybrid Interrogation System for Distributed Fiber Strain Sensors and Point Temperature Sensors Based on Pulse Correlation and FBGs", *IEEE Photonic. Technol. Lett.* VOL21, NO.22, p1671-1673, (2009).

Recent improvements of wide region optical fiber sensor using optical pulse correlation technique

Koji Nonaka

(Received : May 6th, 2010)

Faculty of Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami City, Kochi 782-8502

E-mail: nonaka.koji@kochi-tech.ac.jp

Abstract: We have proposed unique technique of high quality optical pulse generation laser diode and fiber sensing technique using optical pulse correlation. Recently, several break through were carried out using new ideas and technique for fiber sensing. Innovative improvements such as reduction of polarization fluctuation instability, higher resolution, and region selectable distributed sensing are experimentally demonstrated. We report these recent evolutions of this sensing systems.