

超遠距離歪測定用 FBG センサモニタの開発

Development of SF3241A Ultra-long-distance FBG Sensor Monitor

斉藤崇記 Takanori Saitoh, 中村賢一 Kenichi Nakamura, 飯田廣幸 Hiroyuki Iida, 高橋良文 Yoshifumi Takahashi

[要 旨] 120 km 以上の超遠方の歪や温度を高精度に測定できる FBG センサモニタを開発した。従来の FBG センサモニタでは、FBG と FBG センサモニタ間を接続する光ファイバの長さは、30 km 程度が限界であった。これは、光ファイバ内で発生するレイリー散乱光が FBG センサからの光信号の S/N を低下させるためである。そこで、発生したレイリー散乱光を回避し、高 S/N に FBG センサからの光信号を観測できる新方式を開発した。この方式を採用した FBG センサモニタ SF3241A は、120 km の遠方の歪を 1μ ストレイン以下の精度で検出可能であり、津波の早期検知等への利用が期待できる。

[Summary] Anritsu has developed a new Fiber Bragg Grating (FBG) sensor system for detecting changes in wavelengths reflected from FBGs up to 120 km from the monitoring position. Usually, the monitoring distance is limited to about 30 km due to Rayleigh scattered light from the fiber. The new method decreases Rayleigh scattering using a power-controlled, wavelength-swept laser source. The SF3241A can be used for practical remote detection of landslides, tsunami, etc.

1 まえがき

Fiber Bragg Grating (FBG) の反射スペクトルの中心波長変化から、FBG に印加された歪、温度を観測する FBG センサシステムは、大規模構造物の監視、河川水位監視、侵入者検知、崖崩れ検知等に利用が進められている。FBG とセンサモニタで構成される FBG センサシステムでは、FBG への給電の必要がなく、FBG とセンサモニタ間は、光ファイバで接続するのみである。したがって、従来のストレインゲージ等の電気式歪センサと比較して、防爆性に優れ、電磁ノイズに強く、10 km 以上の遠隔測定が容易等の特徴がある。

当社コアテクノロジー R&D センターでも 2004 年から FBG センサシステムの研究を進めており、2007 年から「FBG センサモニタ SF3041A/3011A」の販売を開始した^{1, 2)}。この製品は、波長掃引光源と受光器を内蔵しており、波長掃引された光を光ファイバを通して FBG に入射し、FBG から反射される光を受光器で検出することによって、FBG 反射スペクトルを観測している。毎秒 700 回の波長掃引が可能であり、各掃引ごとに FBG 反射スペクトルの中心波長を算出することにより、これまでにない高速な歪測定が可能である。また、白色光を FBG に入射し、その反射スペクトルを光スペクトラムアナライザで検出する方法と比較して、光エネルギーを一つの波長に集中できることから、高感度な測定が可能である。これにより、長さ 10 km 以上の光ファイバの先にある FBG からも、十分に強い FBG 反射スペクトルを得ることができる。

FBG 反射スペクトルを観測する際の光のノイズの主因はレイリー

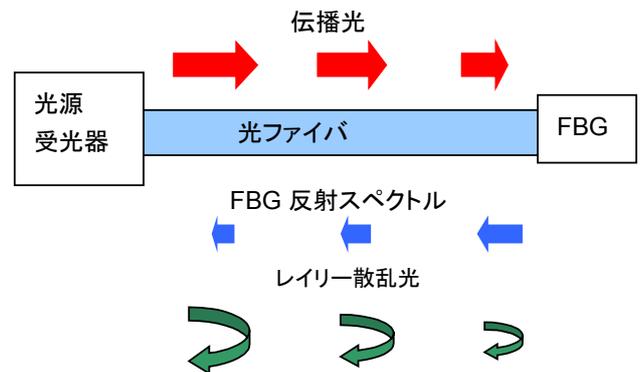


図 1 伝播光、FBG 反射スペクトルとレイリー散乱光
Schematic of propagation light, FBG reflection spectrum, and Rayleigh scattered light in fiber

散乱光である。レイリー散乱光は光ファイバ内の屈折率の不均一性が原因で発生する散乱光であり、光が伝播している光ファイバの至るところで発生している。FBG センサシステムでは、Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) と同様に光の入射端と受光端が同じである片端測定であるため、レイリー散乱光の影響を大きく受ける。図 1 に光ファイバ内の伝播光、FBG 反射スペクトルおよびレイリー散乱光を示した。レイリー散乱光は伝播光強度に比例した強度で発生する。したがって、伝播光があまり減衰されていない入射端近傍では強く、光ファイバの終端近くでは弱く発生する。片端測定における FBG 反射スペクトルは、伝播光が光源から FBG に到達するまでの減衰と、FBG から受光器に到達するまでの往復の減衰を受けた光である。一方、入射端近傍で発生した強いレイリー散乱光は、ほとんど減衰されずに受光器に到達する。受光

器で観測される FBG 反射スペクトルとレイリー散乱光の比が FBG 反射スペクトルの S/N とみなせる。

レイリー散乱光強度について考察する。光源から距離 z と $z+dz$ の間の光ファイバで発生したレイリー散乱光が、光ファイバを伝播し、受光器まで到達した際の強度 dP_{RS} は、

$$dP_{RS} = P_0 \cdot e^{-2\alpha z} \cdot R \cdot dz \quad (1)$$

と表すことができる。ここで P_0 は光ファイバへの入射光強度、 α は光ファイバの伝送ロス、 R はレイリー散乱光の発生率であり、通常の光通信用ファイバの場合、それぞれは、 $\alpha = 0.046/\text{km}$ ($= 0.2 \text{ dB/km}$)、 $R = 0.0022$ である。したがって、長さ L の光ファイバ全領域から発生し、受光器に到達するレイリー散乱光の総和は、

$$P_{RS} = \int_0^L P_0 \cdot (\alpha R) \cdot e^{-2\alpha z} dz = \frac{P_0 R}{2} (1 - e^{-2\alpha L}) \quad (2)$$

と表すことができる。

これに対して、FBG 反射スペクトルの強度 P_{FBG} は、伝播光が FBG に到達するまでの減衰と、FBG 反射スペクトルが受光器に到達するまでの減衰を考慮し、

$$P_{FBG} = R_{ref} \cdot P_0 \cdot e^{-2\alpha L} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで R_{ref} は FBG の反射率である。したがって、FBG 反射スペクトルの S/N は、

$$S/N = \frac{P_{FBG}}{P_{RS}} = \frac{2R_{ref}e^{-2\alpha L}}{R(1 - e^{-2\alpha L})} \quad (4)$$

となり、入射光強度に依存しない。つまり、光源の光量を増加させても FBG 反射スペクトルの S/N を改善させることはできない。

図 2 に FBG 反射スペクトル強度とレイリー散乱光強度の光ファイバ長依存性を示した。図からわかる通り、FBG 反射スペクトルの S/N は光ファイバが長い程、低下し、70 km で 0 となる。実際には、FBG スペクトルの変動を高精度に観測するためには 10~20 dB 程度の S/N が必要であることから、現実的な光ファイバ長の限界は 30 km 程度に制限されていた。

近年、FBG を海底に沈めて沿岸で発生した津波や海底地震を陸上から観測する計画や、都道府県内の崖崩れを 1 箇所集中監視する計画が提案されている。どちらにも、100 km 前後の遠方から FBG に印加された歪を観測する必要があり、従来方式による FBG センサシステムでは対応が不可能であった。

この問題を打破するために、分布ラマンアンプを利用した方法^{3, 4}や、光源と FBG 間でリングレーザーを構成させる方法^{5, 6}が開発さ

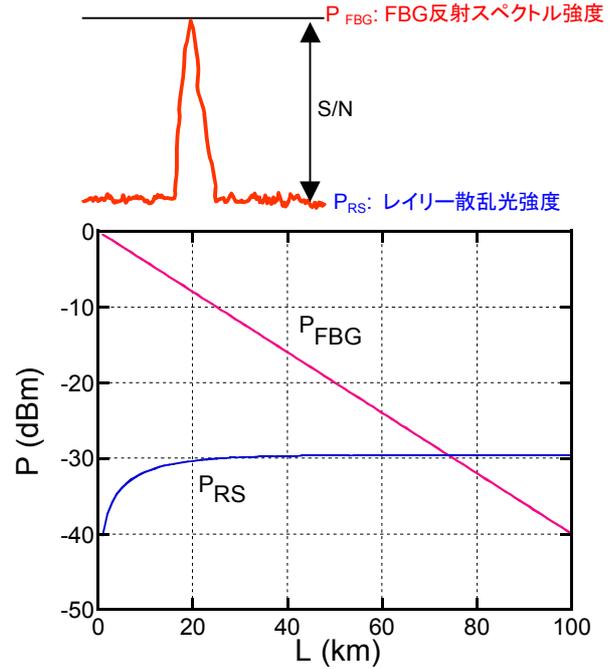


図2 FBG スペクトル強度とレイリー散乱光強度
Intensities of FBG reflection spectrum and Rayleigh scattered light

れた。しかしながら、これらの方法をもってしても、光ファイバ長は 50 km 程度が限界であった。

今回、我々は、波長掃引光源と受光器から構成される FBG センサシステムにおいて、波長掃引直後にレーザーパワーをシャットダウンさせてレイリー散乱光の影響を低減させ、光ファイバ長 120 km の長距離 FBG センシングを可能にした FBG センサモジュール SF3241A を開発したので報告する⁷。

2 原理

長さ L の光ファイバの先に反射スペクトルの中心波長 λ_{FBG} の FBG が接続されている場合、掃引光源が λ_{FBG} の光を出射してから、受光器が FBG 反射スペクトルを受光するまでには $\tau = 2nL/C$ の時間遅れが生じる。ここで、 n 、 C は光ファイバの屈折率と光速である。たとえば光ファイバ長が 50 km の場合は 0.5 ms となる。

3 本の FBG (FBG1, FBG2, FBG3) を接続した FBG センサシステムを考察する(図 3 参照)。それぞれの反射スペクトルの中心波長と光源からのファイバ長を λ_i 、 L_i ($i=1, 2, 3$) とし、波長掃引光源の近傍に FBG1 を ($L_1 \doteq 0$)、さらに、長さ L の光ファイバを通して FBG2, FBG3 を接続したとする ($L=L_2 \doteq L_3$)。この場合、FBG1 の反射スペクトルは、波長掃引光源が λ_1 の波長を出射した直後に受光されるが、FBG2, FBG3 の反射スペクトルは、該当波長出射から $2nL/C$ 後に受光される。従来の波長掃引光源では、C バンドを

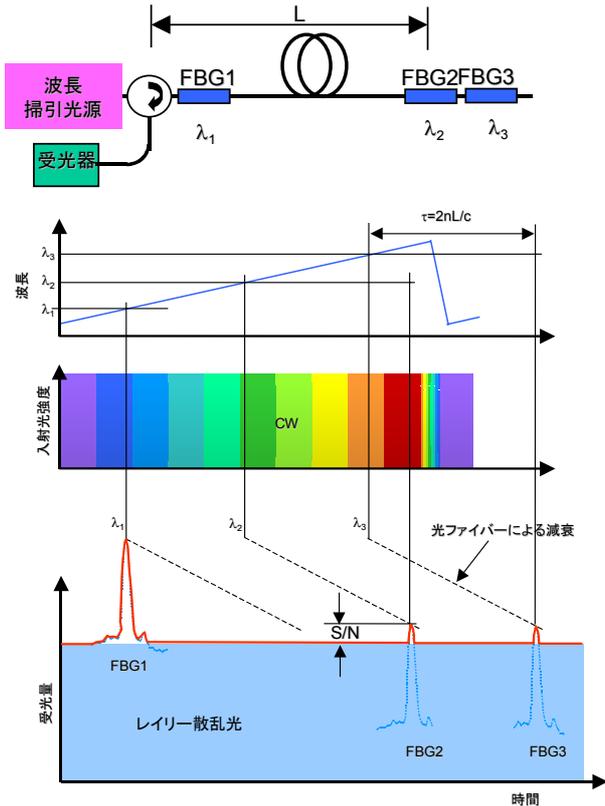


図3 従来方式での波長掃引光と受光量の関係
Schematic of detected light power measured by conventional method

掃引する時間は数百 ms 程度であった。そのため、掃引時間内に FBG 信号を受光することになる。この際、レイリー散乱光も同時に受光される。

しかしながら、MEMS スキャナーを利用した高速掃引光源を内蔵した SF3041A/3011A では、C バンドを 0.3 ms で掃引可能である。したがって、掃引終了後に FBG 反射光を受光できる(図4 参照)。そこで、波長掃引終了後にレーザー出力をシャットダウンした場合のレイリー散乱光強度の変化について考察する。

時刻 $-w/2$ から $+w/2$ の間だけ、強度 P_0 の光が光ファイバに入射されたとする。光源から距離 z と $z+dz$ の間の光ファイバで発生し、時刻 t で受光器に到達するレイリー散乱光 $dP_{RS}(t)$ は、

$$dP_{RS}(t) = \begin{cases} 0 & t - 2nz/c < -w/2 \\ P_0 \cdot \alpha R \cdot e^{-2\alpha z} dz & -w/2 < t - 2nz/c < w/2 \\ 0 & w/2 < t - 2nz/c \end{cases} \quad (5)$$

となる。つまり、時間を遡って考え、時刻 $t - 2nz/c$ の時点で光源が発光していないのであれば、時刻 $t - nz/c$ において z から $z+dz$ の領域には伝播光は存在せず、レイリー散乱光が発生しない。したがって、時刻 t に受光器に到達したレイリー散乱光は、式(5)を

全ファイバ内で積分することにより、

$$P_{RS} = RP_0 \sinh\left(\frac{\alpha c}{2n} w\right) \cdot e^{-\frac{\alpha c}{n} t} \quad (6)$$

と表させる。この式から、レイリー散乱光は時間とともに減衰することがわかる。これは、光パルスを入射させた際のレイリー散乱光強度の減衰を測定する OTDR の原理と同じである。

光ファイバの先に反射波長 λ_{FBG} の FBG を取り付けただけの場合、 λ_{FBG} の波長を掃引光源が出射する時間を T_{FBG} とすれば、この FBG の反射スペクトルを検出する時刻 T_{DET} は、

$$T_{DET} = T_{FBG} + \frac{2nL}{c} \quad (7)$$

となる。

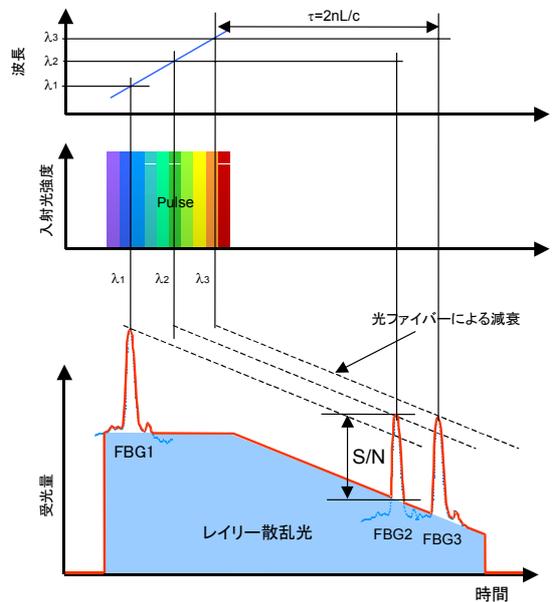


図4 新方式での波長掃引光と受光量の関係
Schematic of detected light power measured by new method

式(6)、(7)から、FBG 反射スペクトルを受光する時刻に受光器で検出されるレイリー散乱強度は、

$$P_{RS} = RP_0 \sinh\left(\frac{\alpha c}{n} w\right) e^{-\frac{\alpha c}{n} T_{FBG}} e^{-2nL} \quad (8)$$

となる。したがって、式(3)、式(8)から S/N は、

$$S/N = \frac{R_{ref}}{R \sinh\left(\frac{\alpha c}{n} w\right) e^{-\frac{\alpha c}{n} T_{FBG}}} \quad (9)$$

となる。この式から、S/N は、入射光量と光ファイバ長に依存しないことがわかる。 $R_{ref}=100\%$ 、 $w=0.3$ ms の場合、S/N は約 24 dB と計算される。

3 実験結果

従来器 SF3041A の一部に改良を施し、上記原理の検証を行った。図 5 にシステムの略図を、図 6 に波長掃引光源の射出波長、光出力と時間の関係を示した。SF3041A に内蔵されている波長掃引光源は、本来は定電流で駆動されており、その射出光量も一定値である。また、発振波長は、1.4 ms 周期の正弦波状に 1500~1600 nm の範囲で掃引されている。この波長掃引光源の駆動電流源に矩形波信号を重畳させることにより、射出光は、矩形波が ON の時に発光、OFF の時に消光するパルス光となる。

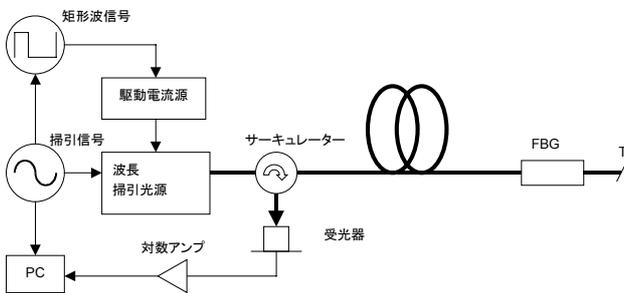


図 5 構成図
System configuration

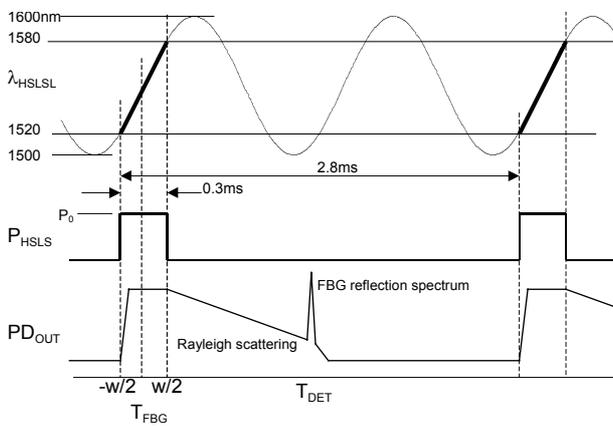


図 6 光源の波長と出力および受光量の関係
Relationship between wavelength, power of light source and power of detected light

矩形波信号は、掃引信号に同期されており、発振波長が短波から長波に掃引される際の 1520 nm に差し掛かった時点で発光が始まり、そのまま 1520 から 1570 nm まで波長掃引が完了した時点で発光が終了する。矩形波は、周期が 2.8 ms であり、ON の状態の時間は 0.2 ms である。したがって、波長掃引光源が 2 掃引する間に 0.2 ms の時間だけ発光され、その時間内に波長は 1520 から

1570 nm まで掃引される。

SF3041A では、受光器に InGaAs 系の PIN フォトダイオードを使用しているが、光ファイバの伝送損失により光量の低下した FBG 反射スペクトルを高感度に測定するために、実験では増幅率 10 倍のアバランシェフォトダイオードを使用した。

長距離化の効果を確認するために、光ファイバで 20 km 間隔に直列に接続された 7 本の FBG の反射スペクトルを観測した。FBG センサモナから最遠の FBG までの光ファイバ長は 120 km となる。FBG の反射率は 90%，反射スペクトルの半値幅は 0.3 nm である。FBG 反射スペクトルの中心波長は、FBG センサモナから近い順に 1535, 1540, 1545, 1550, 1555, 1560, 1565 nm である。

観測された FBG スペクトルを図 7 に示した。図の横軸は、パルス光が出射された時点(発振波長 1520 nm)からの経過時間である。光ファイバ長が長くなるに従って、FBG 反射スペクトルの強度とノイズフロアが減衰しているが、FBG 反射スペクトルの S/N は、ファイバ長に依存せず一定に保たれていることが分かる。FBG 反射スペクトルの右側に見られる信号の落ち込みは、受光器の直後に接続されている対数アンプの帯域不足によるものである。

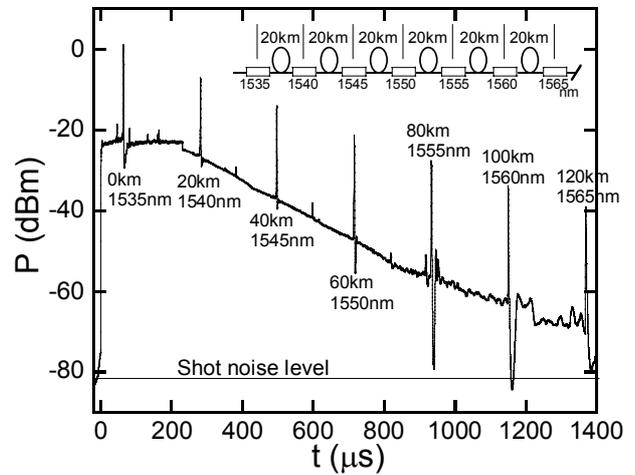


図 7 新方式で観測された FBG 反射スペクトル
FBG Reflection spectrum measured by new method

比較のために、同じ FBG を、レーザー出力をパルス化しない従来方式で観測した際の FBG 反射スペクトルを図 8 に示した。従来方式では、ノイズフロアは時間に依存せずほぼ一定であるが、FBG 反射スペクトルの強度は、光ファイバ長が長くなるに従って弱まり、そのため遠方に配置された FBG の反射スペクトルほど、S/N が低下していることがわかる。

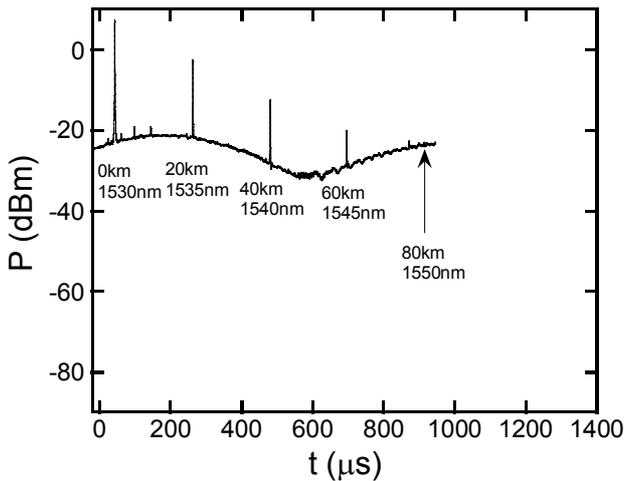


図8 従来方式で観測されたFBG反射スペクトル
FBG Reflection spectrum measured by conventional method

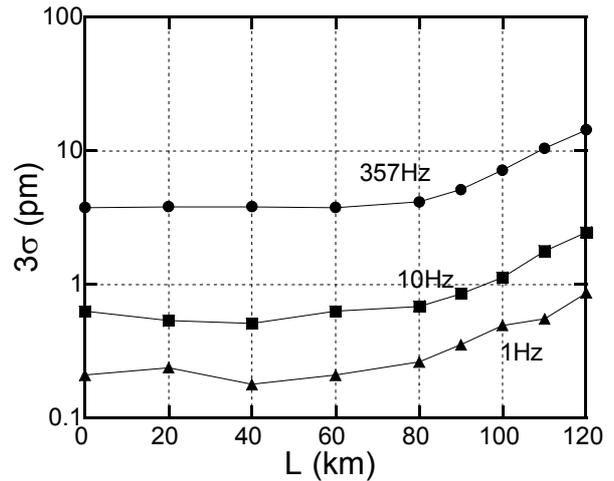


図11 測定精度の光ファイバ長依存性
Relationship between repeatability and fiber length

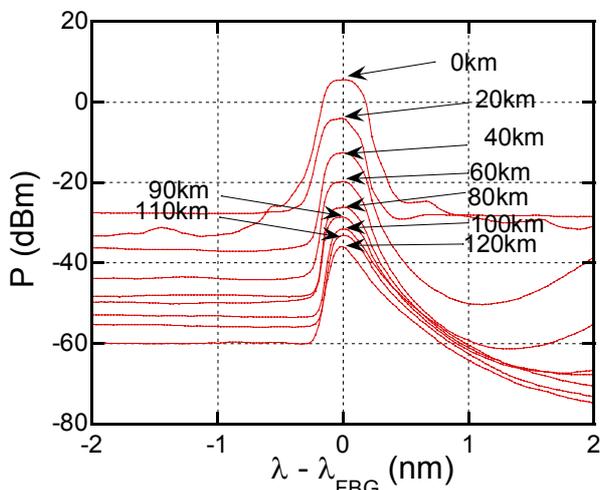


図9 重ね書きしたFBG反射スペクトル
FBG Reflection spectra

図9に新方式で観測されたFBG反射スペクトルを中心波長を一致させて重ね書きしたものを示した。対数アンプの帯域不足のために、遠方の微弱なFBGの反射スペクトルほど、信号の立ち下りのスロープが裾をひいて半値幅がブロードとなっているが、すべて十分なS/Nで観測できていることがわかる。

図10にFBG反射スペクトルのS/Nの距離依存性について、新方式(○)と従来方式(■)による違いを示した。点線と実線は、それぞれの理論値(式(4)、式(9))である。従来方式では、光ファイバ長が40kmでS/Nが15dB程度まで低下してしまうのに対して、新方式では、光ファイバ長120kmにおいても理論値とおりの約24dBのS/Nを維持できることが確認できた。

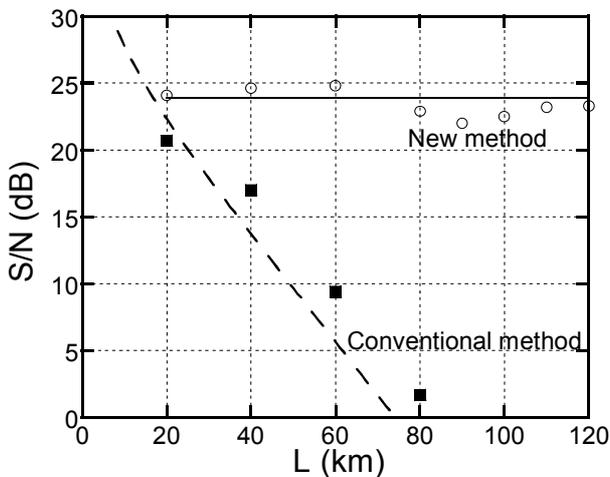


図10 FBG反射スペクトルのS/Nの光ファイバ長依存性
Relationship between signal-to-noise ratio and fiber length

外力を印加しない状態のFBGを観測することにより、今回のFBGセンサシステムの波長測定精度を測定した。観測されたFBG反射スペクトルの中心波長を検出し、その変動の標準偏差 σ の3倍値を図11に示した。●は357Hzで測定した際の結果、■と▲は、それぞれ、357Hzのデータを36回平均と357回平均をさせて、帯域を10Hzと1Hzに制限させたときの結果である。光ファイバ長80kmまでは距離によらず一定であるが、それ以上の長さでは、徐々に分散が大きくなっている。この原因は、対数アンプの帯域不足からFBG反射スペクトルの半値幅が広がり、中心波長が曖昧になったためである。しかしながら、120kmの場合でも、1Hzの帯域で測定すれば、 3σ が1pmの精度でFBG反射スペクトルの中心波長を測定できることがわかる。

4 結論

波長掃引光源の出射パワーをパルス化することにより、FBG 信号観測の S/N 低下を起こさせるレイリー散乱を低減させることができた。この方法により、光ファイバ長に依存せずに高 S/N に FBG 反射スペクトルの中心波長を観測できる。120 km の光ファイバの先に FBG を接続させた場合でも、帯域 1 Hz において、 $3\sigma = 1$ pm の精度で FBG 反射スペクトルの中心波長を観測できた。この精度は、歪であれば、FBG に印加された歪を 0.8 μ ストレイン(1 m の物体が 1 μ m 伸縮すると 1 μ ストレイン)の精度で、また温度であれば、FBG の温度を 0.1 度の精度で測定できることを意味する。

光ファイバ長 120 km は、FBG センサシステムとしては現時点で世界最長である。

今回の新方式を取り入れた機種である SF3241A の外観写真を図 12 に示した。サイズは SF3041A と同じであるが、矩形信号源が内蔵されており、また、アバランシェフォトダイオードのバイアス電圧調整用トリムが正面パネルに配置されている。



図 12 SF3241A 外観写真
External view of SF3241A

参考文献

- 1) 高橋, 中村, 斉藤, 飯田:
“高速 FBG センサモニタの開発”, アンリツテクニカル 84 号, pp.28-33(2007.3)
- 2) T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, and K. Miyagi, “High-speed MEMS swept-wavelength light source for FBG sensor system,” 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proceedings of SPIE Vol. 5855, pp.146-149, 2005.

- 3) Chris R. S. Fludger and Robert J. Mears, “Electrical Measurements of Multipath Interference in Distributed Raman Amplifiers,” *J. Lightwave Technol.* vol. 19, No.4, pp.536-545, April 2001.
- 4) Y. Nakajima, Y. Shindo, and T. Yoshikawa, “Novel concept as long-distance transmission FBG sensor system using distributed Raman amplifier,” in Proc. 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Th1-4, pp.530-533, 2003.
- 5) Zeng-Ling Ran, Yun-Jiang Rao, Ning Nie, and Rong-Rue Chen, “Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System Based On Hybrid Raman/Erbium-Doped Fiber Amplification,” 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proceedings of SPIE Vol. 5855, pp.583-586, 2005.
- 6) Peng-Chun Peng, Kai-Ming Feng, Wei-Ren Peng, Hung-Yu Chiou, Ching-Cheng Chang, and Sien Chi, “Long-Distance FBG Sensor System using Fiber Ring Laser with Hybrid Amplifier,” 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proceedings of SPIE Vol. 5855, pp.860-863, 2005.
- 7) Takanori Saitoh, Kenichi Nakamura, Yoshifumi Takahashi, Hiroyuki Iida, Yoshimitsu Iki and Koichiro Miyagi, “Ultra-Long-Distance Fiber Bragg Grating Sensor System,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.19, No.20, pp1616-1618, Oct. 2007.

執筆者



斉藤 崇記
コアテクノロジーR&D センター
光計測技術開発部



中村 賢一
コアテクノロジーR&D センター
光計測技術開発部



飯田 廣幸
コアテクノロジーR&D センター
事業化推進部



高橋 良文
R&D 本部企画部