

ホワイトペーパー

ファイバーの断線と弱点の予測

長距離空中ケーブルにおけるブリルアンベースの光ファイバーひずみ測定を用いたひずみ B-OTDR のフィールドトライアル

空中ケーブルの特性をプロトタイプブリルアン OTDR を用いて評価しました。ファイバーの伸びは、152km のケーブルにわたって10mの空間分解能で測定され、最大標準偏差は0.0015% で、ほとんどの通信回線に適用可能なテストソリューションを初めて実証しました。

はじめに

ネットワーク事業者は、ケーブルの過度のひずみや弱さによって生じるファイバーの断線をプロアクティブに予測する方法を必要としています。これは、ファイバーケーブルにかかるひずみや温度の圧力を常に変化させる天候や地質条件によって引き起こされます。メンテナンスオペレーションチームは、予測測定を使用し、伝送が失われる前に、プロアクティブにひずみを軽減したりケーブルを交換したりすることで、ケーブルを維持することができます。全誘電体ケーブルソリューションは、近年、光ファイバーネットワークで急速に普及しています。それらは、メタルアーマードケーブルに比べ、低コスト、軽量、取り扱いの容易さ、アースが不要という利点を兼ね備えています。ただし、構造が軽いということは、多くの場合、機械的な保護が低いことを意味し、最も過酷な環境へのこれらのケーブルの適用性については評価する必要があります。公正な比較のために、ロステレコムは10年前に、イルクーツク北部に ADSS と OPGW を設置しました。その地域の気温は -57°C から +40°C まであり、写真1-a のように 10cm の氷の層ができることもあります。時間の経過とともに、写真1-b に見られるように、ケーブル構造が薄い層に裂ける場合があります。

著者

ヴァンサン・ルクーシュ、VIAMI ソリューションズ
 ファビアン・サウロン、VIAMI ソリューションズ
 ジャン＝ポール・カテラ、VIAMI ソリューションズ
 ブノワ・モレル、VIAMI ソリューションズ
 アンドレ・シャンパヴェール、VIAMI ソリューションズ
 オリヴィエ・マセリン、VIAMI ソリューションズ
 ミシェル・サジェ、VIAMI ソリューションズ
 ドミトリー・パブロフ、PJSC «ロステレコム»

お問い合わせ

VIAMI Solutions
 34 rue Necker 42,000 Saint-Etienne, France

PJSC «Rostelecom»
 25 Dubovoi Roshchi Street, Russia, Moscow



写真1a: 氷の形成



写真1b: 破損した強度部材

脆弱化したケーブル構造では、内部ファイバーの伸びはファイバーメーカーが推奨する最大値の 0.2%をはるかに超える可能性があります。それでも、曲げに鈍感なファイバーの出現により、発生する損失は中程度にとどまり、データ伝送は障害なく動作する可能性があります。このことにより、グラスファイバー構造が機械的に強度があるわけではなく、4% の伸びで断線する可能性が依然として高いという事実が隠されてはなりません。ファイバー損失がもはや臨界レベルのひずみに影響されないのであれば、従来のトラブルシューティング技術を再考する必要があります。

ブリルアン分光分析は、正確な分布伸長測定を提供できる唯一の光学特性評価法です。ブリルアン散乱相互作用が、ファイバーの伸びに線形に依存する共振周波数を持つことはよく知られており、この測定は現在、ファイバーセンシングの目的で広く用いられています。通信リンクの主な難点は、それらが一般的に 100km を超えており、一方、すべてのひずみ事象を捕捉するために、高い空間分解能も期待されていることです。

適用できる可能性のある最初の測定方法は、B-OTDA と呼ばれています。この構成は、刺激された相互作用のおかげで最強の信号を提供しますが、ループ構成が必要なため、到達距離が制限されます。実際には、最長の到達距離は、最大 80km の片道リンクに相当します^{1,2}。回線上に分散した光アンプを追加することで、より長い距離を実現しましたが^{3,4}、複雑な非局所影響が発生することは言うまでもなく、アンプ間の最大距離である 75km は、通信リンクには適用できません⁵。B-OTDA は、代表的な通信ケーブルの敷設には拡張性がなく、80km を超えるケーブルを盗聴することなく測定値を取得するために挿入することは事実上できません。

第二のソリューションは B-OTDR で、リンクの片側から発射される単一のプローブ信号を使用します。B-OTDR は、レイリー散乱を伴う通常の OTDR と同様に、自発ブリルアン後方散乱光を取得します。この構成の利点は、バジェットロスが高すぎるリンク、あるいは断線のあるリンクにも対応する場合に明らかになります。B-OTDR は常にアクセス可能な区間に関する情報を提供します。実験室での実験では、コヒーレント検出とラマン増幅を組み合わせると 150km の距離をカバーした記録がありますが、50m の空間分解能と遠位端での測定精度は十分なものにはなりません。インライン光増幅器も BOTDR 用に提案されていますが、これも通信リンクには適用できるものではありません。



本論文では、バッテリー駆動のフィールド展開可能な計測器に統合された、コヒーレントブリルアン OTDR の斬新な実装について報告します。最初のプロトタイプは、10m の空間分解能を使って 152km で 34dB の総ロスバジェットの敷設された空中リンクの特性評価に使用されました。リンクの両端から2つの OTDR を取得する必要がありますが、これが敷設された通信回線の距離をカバーできる唯一の技術であると主張しています。

実験的セットアップ

我々の計測器は、後方散乱信号のレイリーまたはブリルアン分光成分を選択的に検出するためにコヒーレント検出を使用します。本計測器は、損失特性評価のために通常の OTDR トレースを生成し、ひずみ判定のために（温度が一定であると仮定して）ブリルアン周波数シフト情報を利用することができ、また、温度とひずみの両方を独立に決定するためにランダウ-プラツェック比 (LPR) も使用します⁸。このように、ユーザーは、測定対象ファイバーの健全性を判定するのに、信号損失、ひずみ、温度の 3 種類の OTDR 測定を自由に行うことができます。

結果

このテストキャンペーンでは、ウスト・クット、キレング、セベロバイカルスクの 3 つのサイトから 7 本のファイバーをテストし、大部分双方向のレイリーおよびブリルアン OTDR を 23 回完全に取得することができました。主な結果を図 2 に示します。

図 2-a) は、ウスト・クットからキレングまで回線の距離の関数としてのひずみを示しています。それは、完全なリンクとリンクの間中点での良好なマッチングを示すために、キレングからのトレースは元に戻し、両端からの 2 つの取得で構成されています。それぞれが特定の周波数シフトを持つプラトーの連続は、空中ケーブル敷設の代表的なもので、組み立てられたケーブル部分は 15km を超えることはなく、各ケーブルには異なるロットのファイバーが数本入っています。実際、ブリルアン周波数シフトの変化は、多くの場合、OTDR トレース上のスプライス減衰よりも検出しやすく、このことを利用することができます。あるファイバータイプのブリルアン周波数シフトは、 $\pm 0.04\%$ の伸びに換算される、ファイバーのバッチ 9 に依存する公称値付近で、 $\pm 20\text{MHz}$ 変動する可能性があります。これは、メーカーが推奨する最大 0.2% の伸びを厳密に適用した場合、かなりの不確実性をもたらします。その場合、ひずみ事象を周囲のプラトーからの相対的な偏差として特定して定量化する必要があり、分析を複雑にすることになります。しかし、過酷な条件下で運用される空中ネットワークを実際に経験すると、短時間であれば 3% までのひずみ事象を許容せざるを得なくなります。図 2-a) のような均質なファイバーの組み合わせを仮定すると、これらのファイバーに関連した変化を無視し、固定した絶対的なしきい値に基づいて、ケーブルが基準に合格しているかどうかを計測器に自動的に判定させることができます。

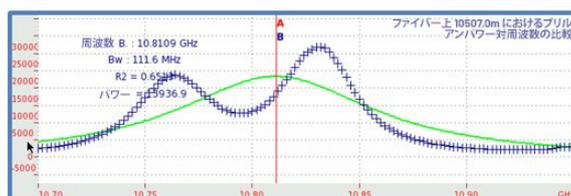
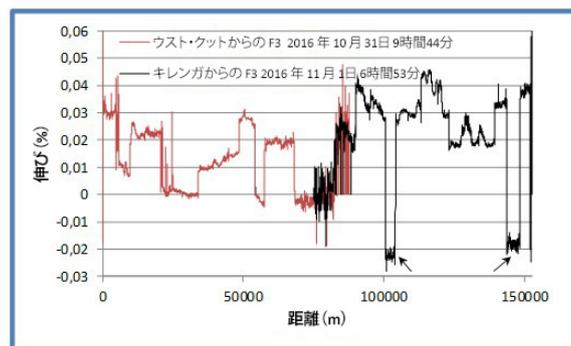


図2: a) 100ns / パルスによる 152km の双方向ひずみ測定。矢印は第 1 世代の SMF28e+ の部分を指しています。
b) 100ns (青) と 200ns (緑) のパルスで記録されたひずみ事象
c) SMF28e のデュアルモードブリルアンスペクトラム

計測器に関連する不確かさは、取得のイベントのないさまざまなプラトー上の標準偏差から評価することができ、これらは通常 0.0006% であり、17dB のリンク減衰後の中央接合点では最大 0.0015% です。

ひずみプロファイルの多くは、タワー間の距離である 350~500m の特徴的な周期性を持つ一連のピークを示します。ピーク振幅は通常 0.01% で、最高レベルは 0.03% です。リンクの現状を知る上で、このやや小さな値は心強いものでした。

事象は 150m から 400m のファイバー範囲で行われ、測定は10月に行われたことに注目する必要があります。おそらく、氷の負荷がかかるとひずみはより高いレベルに達し、より局所的になる一方、夏の間はケーブルの動きと熱サイクルの結果、ひずみが解放され、空間的に広がります。とはいえ、提示された取得の詳細は、夏の期間中であってもケーブルの弱点を浮き彫りにするのに十分分解されています。

図2-b) は、100ns と 200ns のパルスで撮影された 2 つ重ね合わせたデータ取得を示すひずみ事象の測定器のスクリーンショットです。精度とリーチは、平準化効果と長いパルスの高エネルギーの恩恵を受けていますが、明らかに最速の詳細は消えています。事象の範囲は多くのパラメータ(負荷の分布、正確なケーブル構造と設置、使用するゲル...)により異なるため、常に可能な限り最高の空間分解能を使用しなければなりません。

ブリリアンスpektrumは、ファイバータイプを認識することもでき⁹、図 2-c) は、第 1 世代の SMF28e+ に典型的なデュアルモードpektrumを示しています。このファイバーは、修理の際に使用されたもので、敷設時には通常のシングルピークの SMF28e が使用されていました。

説明したような測定キャンペーンは、敷設時やトラブルシューティングの際に実施される、ケーブルのメンテナンスサイクルの最初のステップに過ぎません。その後の測定はすべて同じように繰り返すことができますが、最初の測定を基準として、相対的なデータを作成することをお勧めします。これによって、リンク全体に渡ってさまざまな周波数シフトをもつ異なるファイバーの問題が排除されます。LPR によってもたらされる追加情報を使うと、測定器は 2 つの測定値の間の季節的な温度変化も説明することができます。これにより、温度範囲にわたって $\pm 0.1\%$ の変動が予想される、ブリリアン周波数シフトのみに基づく測定に比べ、精度がさらに向上します。相対的な温度補償測定により、測定器の再現性に至るまで非常に低い値に設定できるアラームしきい値を使用して、ひずみのわずかな変化を正確に示すことが容易になります。

まとめ

B-OTDR 技術は長い間利用可能でしたが、我々は、通信リンクの距離をカバーするのに十分なダイナミックレンジを備えた、初のフィールド展開可能な計測器を実証しました。我々のプロトタイプを使って、152km のリンク上で適切に動作することを実証しました。我々のラボテストでは、400ns のパルス幅 (40m の空間分解能) で 200km の到達が可能であることを示しています。本論文を書くまでに、相対測定、熱補償、そして現場で直接この計測器の可能性を完全に引き出すために必要なすべての機能を含む開発が完了しました。

このソリューションは、ポータブル型計測器に搭載された VIAVI Strain B-OTDR として市販されています。

謝辞

このトライアルを可能にしてくれたヤロスラフ・バラノフ氏と、シベリアでのデータ取得を実現してくれたミハイル・ニコラエフ氏に感謝したいと思います。

参考資料

1. L. Zou et al, "Long-term monitoring of local stress changes in 67km installed OPGW cable using BOTDA," Proceedings of the SPIE, Volume 9634, id. 963,461 4 pp. (2015).
2. X. Qian et al, "157km BOTDA with pulse coding and image processing," Proc. SPIE 9,916, Sixth European Workshop on Optical Fiber Sensors, 99162S (2,016).
3. Y. Dong et al "Extending the Sensing Range of Brillouin Optical Time-Domain Analysis Combining Frequency-Division Multiplexing and In-Line EDFAs," J. Lightwave Technol. 30, 1161-1167 (2012).
4. F. Gyger et al, "Ultra Long Range DTS (>300km) to Support Deep Offshore and Long Tieback Developments," ASME. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 6B: Pipeline and Riser Technology (2014).
5. L. Thévenaz et al, "Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system," Opt. Express 21, 14017-14035 (2013).
6. M. N. Alahbabi et al, "150-km-range distributed sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification," J. Opt. Soc. AM B 22, 1321-1324 (2005).
7. Y. T. Cho, et al, "100km Distributed Fiber Optic Sensor Based on the Coherent Detection of Brillouin Backscatter, with a Spatial Resolution of 10 m, Enhanced Using Two Stages of Remotely Pumped Erbium-Doped Fiber Combined with Raman Amplification," in Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest, ThC4 (2,006).
8. P.C. Wait et al, "Landau Placzek ratio applied to distributed fiber sensing", Optics Communications 122, pp 141-146 (1996).
9. Corning White Paper WP4259, "BOTDR measurement techniques and Brillouin backscatter characteristics of Corning single-mode optical fibers", (2015).