

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06108

研究課題名(和文)次世代光ファイバ評価のための超高時間分解能光サンプリング技術の研究

研究課題名(英文) Research on ultra-high temporal resolution optical sampling technology for next generation optical fiber characterization

研究代表者

伊藤 文彦 (Ito, Fumihiko)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号：40593596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：線形サンプリング法をベースに、2台の独立に発振するパルスレーザを信号パルス、ローカルパルスとして用いることにより、高時間分解能かつ高感度性を有するファイバインパルス応答測定技術を開発した。これを用いて、ピコ秒レベルの時間分解能と70～80dB以上のダイナミックレンジでモード多重伝送用光ファイバのインパルス応答測定が可能となる。本技術は、敷設した光ファイバにも適用可能で、上記に述べた時間分解能とダイナミックレンジを備えるインパルス応答測定技術としては、他に例を見ないものである。

研究成果の概要(英文)：Based on the linear optical sampling, fine time resolution and high dynamic range impulse response measurement of optical fibers are realized, by using two independently oscillating pulse lasers as the signal and local pulse sources. By the method, it is possible to measure the impulse response of multimode fibers with a few picosecond resolution and 70 to 80 dB dynamic range. Since this method is useful for various length of optical fibers including installed cables, it would be promising as the technology for characterizing multimode fibers.

研究分野：光ファイバ計測

キーワード：光ファイバ インパルス応答 光サンプリング

1. 研究開始当初の背景

シングルモード光ファイバ(SMF)をベースとした現在の光伝送路では、光ファイバ1本あたりの伝送容量が100Tb/sに達し、これ以上の大容量化はほぼ不可能な状況にある。これを打破すべく、近年では2~数個の空間モードを有する数モード光ファイバ(Few Mode Optical Fiber:FMF)の研究が推進されている。

このようなモード多重伝送路の設計においては、FMFの持つインパルス応答(短パルスを入力した場合のモードや波長の違いによる群遅延時間差)の把握が特に重要である。特に、受信方式の主流となりつつあるデジタルコヒーレント方式では、群遅延時間差を可能な限り小さく抑えることが要求され、広い波長範囲で1kmあたり100ピコ秒以下(特定の波長近傍ではほぼ0)という小さな群遅延時間差を持つ光ファイバが開発されている。また、異なる符号の群時間差を有する光ファイバをつなぎ合わせ、群遅延時間差をさらに低減させる方式も検討されている。

このようなFMF伝送路のインパルス応答は、いままでのSMFよりも複雑になる。このようなFMFおよびFMF伝送路を評価するための測定器に求められる要求は、次のようなものであると考えられた。

- (1)ピコ秒~サブピコ秒の時間分解能を持つこと:モード多重用に設計されたFMFのインパルス応答は、ピコ秒レベルの細かな構造を持ち、それを分解する時間分解能が求められる。
- (2)広範囲の距離レンジを持つこと:敷設されたケーブルの評価を行う場合は、測定ファイバ長は数十km以上に達する。これらの光ファイバケーブルに対応する広い測定距離レンジが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、数m~数十km以上の幅広い測定距離レンジに対応可能で、かつピコ秒レベルの時間分解能を有する、従来技術では不可能なファイバインパルス応答測定技術を開発・実現する。

3. 研究の方法

本研究では、2つの独立なパルスレーザにより構成した線形光サンプリング法をベースとして、高時間分解能・広距離レンジ測定システムを提案・実現する。本手法は、一方のパルスレーザをプローブ信号として、また他方のパルスレーザをローカル光として、それらの干渉信号を検出することにより、従来技術では不可能であった高時間分解能、広測定距離レンジの両立を目指す。

線形光サンプリング方式は、光パルスの瞬時的な干渉を観測することにより、光波の振幅と位相の高時間分解能測定を実現するものであり、2つのパルスレーザによる高精度距離計測技術が米国国立標準技術研究所

(NIST)により開発されている。しかしそこでは、長距離に渡ってパルスレーザの干渉信号を取得するために、レーザ間の位相同期を必要とし、かつレーザのスペクトル幅を1Hzまで極限的に安定化する手法を取ったが、このような技術は光ファイバ計測に汎用的に用いるわけにはいかない。また、光ファイバ伝送路のように、送信器と受信器が遠隔して配置される場合には、全く適用不可能である。

本研究では、今回新たに提案する位相雑音補償方法により、従来のような極限的なレーザの安定化を必要とせず、市販で入手可能なパルスレーザを用いて、高時間分解能・長距離測定を可能とする方式を提案・実現する。また、提案技術は送・受信器の遠隔配置にも対応可能であり、敷設光ファイバケーブルを測定可能な、唯一のピコ秒時間分解能インパルス応答測定技術であると考えられる。

4. 研究成果

4.1 線形サンプリング法の概要

図1に、本研究で提案する位相雑音補償線形サンプリングの測定系を示す。線形サンプリング法では信号パルスとそれよりも広いスペクトル幅を持つローカルパルスを光90度ハイブリッド内で干渉させる。2台のパッシブモードロックレーザの繰り返し周期はレーザ内の共振器の温度を調整することでわずかに離調している。こうすることで信号パルス毎にローカルパルスの干渉点がパルス毎にわずかに掃引され、これにより信号パルスの波形を再構築することができる。また、偏波ダイバーシティ光90度ハイブリッドを用いることで両偏波の同位相(In-phase)成分とそれに対して位相の90度異なる直交(Quadrature)成分を観測できるため信号パルスの振幅と位相を決定することができる。

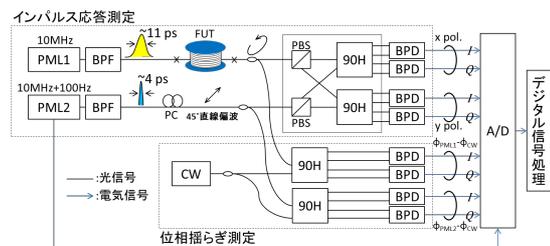


図1 位相雑音補償線形サンプリング法によるファイバインパルス応答測定装置

4.2 位相雑音補償法の提案

線形サンプリング法では2台の独立に発振するパルスレーザを信号パルス、ローカルパルスとして用いる。それらのレーザはそれぞれの位相揺らぎを持ち、平均化を行うような測定が長時間に及んだ場合には両者のコヒーレンスは維持されず、干渉信号の位相はランダムになる。このため、観測される干渉信号 $A(t)$ は

$$A(t) = a(t) \exp\{j(\phi_{PML1} - \phi_{PML2})\} \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで $a(t)$ は信

号パルスの振幅と位相を含む複素数であり、 ϕ_{PML1} と ϕ_{PML2} はそれぞれのパルスレーザの位相変化を表す。このように観測される干渉信号にはパルスレーザ間の位相変化が含まれているため、信号パルスの振幅と位相のみが含まれた干渉信号を得ることができない。

そこで、図1の測定系ではインパルス応答測定と同時に信号パルス、ローカルパルスそれぞれを分岐させたCW光とそれぞれの干渉計で干渉させることでパルスレーザ間の位相の動きをモニタする。位相揺らぎ測定部のそれぞれの干渉計で得られる干渉信号は次式のように表すことができる。

$$\exp\{j(\phi_{PML1} - \phi_{CW})\} \quad (2)$$

$$\exp\{j(\phi_{PML2} - \phi_{CW})\} \quad (3)$$

式(2)と式(3)の複素共役の積を求めると、

$$\exp\{j(\phi_{PML1} - \phi_{CW})\} \times \exp\{-j(\phi_{PML2} - \phi_{CW})\} \\ = \exp\{j(\phi_{PML1} - \phi_{PML2})\} \quad (4)$$

のようにパルスレーザ間の位相揺らぎを求めることができる。式(1)と式(4)の複素共役の積を求めれば、(1)のインパルス応答からレーザ間の位相雑音を取り除くことができる。

この結果、干渉信号、すなわちインパルス応答の複素振幅の振幅平均が可能となる。測定回数を N 回として平均化を行うと、平均化したパラメータの雑音の標準偏差が $1/\sqrt{N}$ になるということが知られている。つまり、パワー平均の SNR の改善率は \sqrt{N} 倍、振幅平均の場合のそれは N 倍となる。これにより、パワー平均よりも振幅平均の方がより短時間に、効率的にダイナミックレンジを改善することができる。

4.3 2モード光ファイバのインパルス応答測定

提案手法を用いて 2MF のインパルス応答測定を行った。測定を行った 2MF はファイバ長が 1 km でステップインデックス型の屈折率分布を持つ。被測定ファイバの入力端では、主として LP₀₁ モードが励起されるように軸ずれなく SMF と対向させた。出力端では SMF に LP₀₁ と LP₁₁ モードの両方が結合するようにわずかに軸ずれした状態で対向させた。

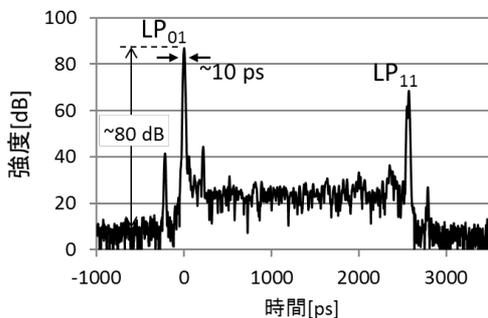


図2 2モード光ファイバのインパルス応答測定結果

図2に測定されたインパルス応答の強度波形を示す。ここでは、ファイバ入り口で励起された LP₀₁ モードと LP₁₁ モードのパルスが、それぞれ波形の先頭と後尾に観測されている。その間に見られる台地状の信号はモード間結合を表す。モード間結合の大きさは、LP₀₁ パルスの大きさよりも 60dB ほど小さいことがわかる。また、LP₀₁ パルスの大きさと雑音レベルとの比較により、この測定器のダイナミックレンジは約 80dB 以上であることが分かる。また、図からは判別しづらいが、測定されたパルスの 3-dB 幅は約 10ps であり、高い時間分解能でのインパルス応答測定が可能であることがわかる。以上のように、提案技術によって、きわめて高い時間分解能とダイナミックレンジにより、光ファイバのインパルス応答測定が可能であることがわかった。

4.2 マルチコア光ファイバのインパルス応答

位相雑音補償線形サンプリング法を用いてマルチコアファイバのインパルス応答の測定を試みた。図3は、弱結合4コア光ファイバの各コアの組み合わせ毎のインパルス応答を測定した結果である。対角に位置する赤い太く枠で囲った波形は同一コア間のインパルス応答波形であり、それ以外は異なるコアの入出力の組み合わせで観測されたインパルス応答である。ここでも、約 70dB 以上のきわめて高いダイナミックレンジと、1 ps 程度の時間分解能での測定が可能であることが実証された。それにより、コア間モード結合が明瞭に観測できている。また、同一コアでのインパルス応答波形には、スパイク状のパルスが見られ、これらは他のコアに結合することなく出力されたパルスであると考えられる。ここから、各コアの群速度を見積もることができる。

ここで注目すべきは、異なるコア間のインパルス応答波形のように、極めてランダムな信号波形においても、提案する位相雑音補償方式は問題なく動作することである。このことから、提案手法は、強結合型マルチコアファイバなどを含む、多彩なマルチモードシステムの測定に適用できると考えられる。

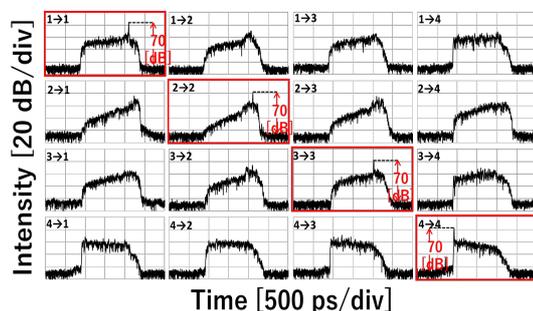


図3 測定された弱結合4コアファイバの各コア間のインパルス応答波形

4.3 モード合分波器の評価

モード合分波器の評価への応用を目的として、図4(a)に示すデバイス構成でインパルス応答を測定した。図のMCはKyria社製の位相板によるモード合分波器である。ピグテールとして、長さ約10mの4モードファイバ(4MF)が取り付けられている。この4MFよりパルス光を入射し、MCにより分波された各ポートにおけるインパルス応答波形を測定した。

図4(b)にその結果を示す。各ポートからのインパルス応答波形において、4つのピークを確認することができる。これらは、左側のパルスから順に、4MFの入力においてLP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂モードで励起されたものであると考えられ、約10mのピグテールのモード間群遅延時間差により時間的に分離されたものである。これは、開発した測定器の高時間分解能なインパルス応答測定により観測可能となったものである。

このインパルス応答波形より、MCの不完全性による各ポートへのモード結合量を見積もることができる。LP₀₁モードで伝搬したパルスの各ポートからの出力波形の強度を比較すると、LP₀₁モードで伝搬してLP₀₁ポートとLP_{11a}、bポートへ出力されたパルスの強度の比が約30dBあることが分かる。このことからLP₀₁モードからLP_{11a}、bポートへの結合量が約30dBであると言える。一方で、LP₁₁モードで伝搬したパルスより、LP₁₁モードで伝搬してLP₀₁ポートとLP_{11a}、bポートへ出力されたパルスの強度の比は約20dBであることが分かる。このことからLP₁₁モードからLP₀₁ポートへの結合量が約20dBであると言積もることができる。

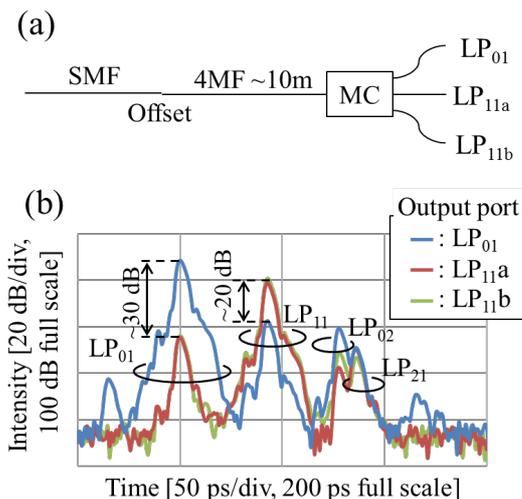


図4 モード合分波器のインパルス応答測定結果。

4.3 広帯域測定による高次分散の測定

開発した位相雑音補償線形サンプリング法の広帯域性と高い測定精度を実証するため、光ファイバの高次分散の測定を試みた。図5(a)は、パルス幅サブピコ秒の信号パルス

を用いて観測された複素インパルス応答波形であり、(b)はこれをフーリエ変換して得られたパワースペクトルである。約2THzの帯域でインパルス応答が観測されていることが分かる。

図6(a)は、この複素インパルス応答より算出した、光ファイバの伝達関数の位相スペクトルである。この結果は、ほぼ2次曲線で近似できることがわかった。これに対して(b)は、(a)の結果から2次成分を取り除き、3次以上の分散成分のみを表示したものである。この結果は、点線で示す3次曲線により極めてよく近似できることがわかる。この結果は、2次分散を除去した後の高次分散が主として光周波数に対して3次の依存性を持つことと整合しており、本測定器によって観測される位相スペクトルが極めて高い精度を持つことを実証している。

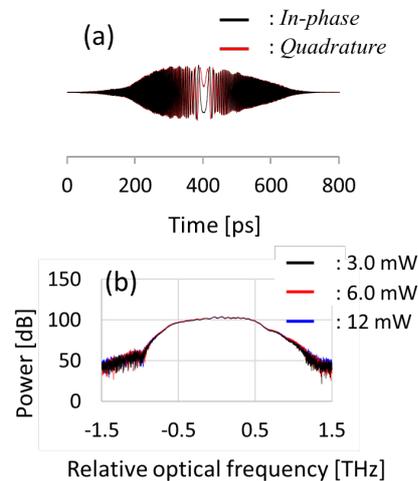


図5 サブピコ秒パルス幅の信号光を用いて観測された単一モード光ファイバの複素インパルス応答とそのパワースペクトル。

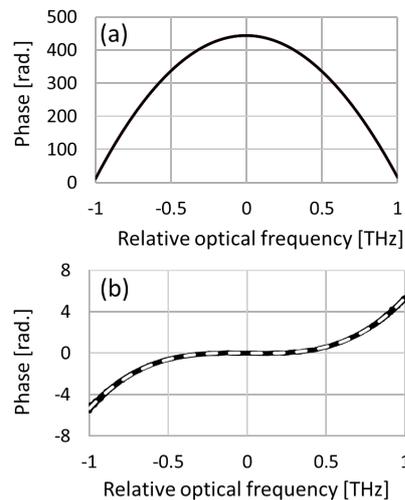


図6 観測された伝達関数の位相スペクトル。

4.4 成果のまとめ

本研究で提案した位相雑音補償線形サンプリング法により、マルチモードファイバ、

マルチコアファイバ、モード合分波器など、様々な伝送路またはデバイスのインパルス応答の測定を、ps レベルの高い時間分解能と、数十 dB のダイナミックレンジで測定できることを実証した。その応用として、マルチモードふあいばにおけるモード結合量の評価、群遅延時間差の精密な測定、モード合分波器におけるクロストークの測定、波長分散、特に高次分散の測定など、幅広い応用が転換できることを示した。本測定技術は、特に次世代伝送路として期待されるマルチモード/マルチコア光ファイバの評価において極めて有用と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

(1) F. Ito and T. Manabe, "Recent Developments of Fiber Diagnosis Technologies in Optical Communication," IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol. 35, No. 16, pp. 3473-3482, 2017.

(2) N. Kono, F. Ito, D. Iida, and T. Manabe, "Impulse response measurement of few-mode fiber systems by coherence-recovered linear optical sampling," IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol. 35, No. 20, pp. 4392-4398, 2017.

[学会発表](計16件)

(1) 荒川拓也、河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"高時間分解能インパルス応答のモード多重一括測定による接続点でのモード間結合量推定"、2018年電子情報通信学会総合大会 B-13-20(2018.3、東京(東京電機大))

(2) 伊藤文彦、"2モード光ファイバのインパルス応答測定とその応用"、レーザー学会学術講演会第38回年次大会、(2018.1、京都市勧業館みやこめっせ)(招待講演)

(3) 荒川拓也、河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"線形サンプリング法によるコア間遅延時間差の高時間分解能個別測定"電子情報通信学会技術研究報告光ファイバ応用技術研究会 OFT2017-50, pp. 33-36 (2017.11、大阪(関西大学))

(4) 荒川拓也、河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"線形サンプリング法によるコア間遅延時間差の高時間分解能個別測定"、2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-16 (2017.9、東京(東京都市大))

(5) T. Arakawa, N. Kono, F. Ito, D. Iida, and

T. Manabe, "Impulse response of multicore fibre measured by high-dynamic range linear optical sampling with picosecond resolution," 43rd European Conference on Optical Communication (ECOC 2017), Gothenburg, Sept. 2017, paper P1.SC1.4.

(6) 荒川拓也、鷺坂優介、河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"位相雑音補正線形サンプリング法による4コア光ファイバの項ダイナミックレンジインパルス応答測定"、電子情報通信学会技術研究報告光ファイバ応用技術研究会 OFT2017-16, pp. 71-76 (2017.5、松江(島根大学))

(7) 荒川拓也、鷺坂優介、河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"コヒーレンス回復線形サンプリングによる4コア光ファイバの高ダイナミックレンジインパルス応答測定"、2017年電子情報通信学会総合大会 B-13-20 (2017.3、名古屋(名城大))

(8) 河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"コヒーレンス回復を用いた高ダイナミックレンジ線形サンプリングによる光ファイバのインパルス応答測定"、電子情報通信学会技術研究報告光ファイバ応用技術研究会 OFT2016-33, pp. 45-50 (2016.11、長崎(長崎商工会議所))

(9) F. Ito, N. Kono, D. Iida, and T. Manabe, "High dynamic range linear optical sampling with coherence recovery for measuring fibre impulse response," 42nd European Conference on Optical Communication (ECOC 2016), Dusseldorf, Sept. pp. 455-457, 2016.

(10) 河野直人、伊藤文彦、飯田大輔、真鍋哲也、"振幅平均線形サンプリングによる2モード光ファイバの高ダイナミックレンジインパルス応答測定"、2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-16 (2016.9、札幌(北大))

(11) N. Kono, F. Ito, R. Maruyama, and N. Kuwaki, "Ultrafast complex impulse response measurement of 2-mode fibers by using linear optical sampling," The 21st Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2016), Niigata, July, 2016, paper MC2-4.

(12) 伊藤文彦、"線形光サンプリング法による光ファイバのインパルス応答測定"、第57回光波センシング技術研究会 LST-57-6、(2016.6、東京(東京理科大))(招待講演)

(13) 河野直人、伊藤文彦、丸山 遼、松尾昌一郎、"線形サンプリング法による2モード

光ファイバのモード毎波長分散測定”、2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-17 (2016.3、福岡(九大))

(14) 伊藤文彦、河野直人、横田聖司、飯田大輔、真鍋哲也、“オフセット補正複素振幅平均による高ダイナミックレンジ線形サンプリング”、2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-13-16 (2016.3、福岡(九大))

(15) 河野直人、伊藤文彦、丸山遼、松尾昌一郎、“線形サンプリング法による2モード光ファイバの群遅延差の高時間分解能測定”、電子情報通信学会技術研究報告光ファイバ応用技術研究会 OFT2015-50, pp. 23-28 (2015.12、東京(電通大))

(16) 伊藤文彦、河野直人、飯田大輔、真鍋哲也、“2つの独立パルスレーザを用いた線形サンプリング測定における位相雑音補正法”、電子情報通信学会技術研究報告光ファイバ応用技術研究会 OFT2015-44, pp. 61-66 (2015.11、松山)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計4件)

名称：光学デバイスのインパルスレスポンス測定装置および測定方法
発明者：岡本達也、真鍋哲也、戸毛邦弘、岡本圭司、高橋央、伊藤文彦
権利者：日本電信電話、島根大学
種類：特許
番号：特願 2015-23695
出願年月日：2015年2月9日
国内外の別：国内

名称：光学デバイスのインパルスレスポンス測定装置および測定方法
発明者：岡本達也、真鍋哲也、戸毛邦弘、岡本圭司、高橋央、伊藤文彦
権利者：日本電信電話、島根大学
種類：特許
番号：特願 2015-75417
出願年月日：2015年4月1日
国内外の別：国内

名称：インパルスレスポンス測定装置及びその測定方法
発明者：飯田大輔、戸毛邦弘、真鍋哲也、伊藤文彦
権利者：日本電信電話、島根大学
種類：特許
番号：特願 2016-86597
出願年月日：2016年4月22日
国内外の別：国内

名称：マルチモード光ファイバモード間群遅延解析方法
発明者：飯田大輔、戸毛邦弘、真鍋哲也、伊藤文彦

権利者：日本電信電話、島根大学
種類：特許
番号：特願 2017-28633
出願年月日：2017年2月20日
国内外の別：国内

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~ito/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
伊藤 文彦 (ITO, FUMIHIKO)
島根大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号：40593596

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：

(4) 研究協力者
()