

OTDRを用いたマルチコア光ファイバの クロストーク測定

Measurement of Inter-core Crosstalk of Multicore Optical Fibers with
Optical Time Domain Reflectometry

小林 優斗*
Yuto Kobayashi

井上 歩美
Ayumi Inoue

菅沼 貴博
Takahiro Suganuma

永島 拓志
Takuji Nagashima

林 哲也
Tetsuya Hayashi

長谷川 健美
Takemi Hasegawa

マルチコア光ファイバ (MCF) を用いた光通信においてはコア間のクロストーク (XT) を抑えることが信号品質を維持するために重要である。本研究では、マルチチャンネルOTDRを用いることでポビン巻き状態のMCFのファイバ長手方向での曲げ半径変化によるXTの変化を測定できることを明らかにした。また、MCFを用いた双方向伝送時に考慮が必要となる後方散乱XTを、マルチチャンネルOTDRを用いて測定する手法を開発し、後方散乱XTのファイバ長依存性の理論予測を検証し、ファンアウトの後方散乱XTへの影響も明らかにした。本研究成果により、マルチチャンネルOTDRによるXTの長手依存測定の有用性を示すとともに、MCFにおける対向伝搬の優位性を示した。

In multi-core optical fiber (MCF) transmission, low inter-core crosstalk (XT) is crucial to suppress signal quality degradation. This paper reveals that the dependence of the XT on fiber bending radius can be evaluated from the changes in the longitudinal bending radius of spooled MCFs with a multi-channel optical time domain reflectometry (OTDR). We also developed a measurement method for backscattered XT, which needs to be considered for bidirectional MCF transmission, using a multi-channel OTDR. With the developed method, we verified the validity of the theoretical prediction of the fiber length dependence of the backscattered XT and clarified the effect of fanout on the bidirectional XT. This paper demonstrates the usefulness of multi-channel OTDRs in measuring the length dependence of XT and the superiority of bidirectional transmission in MCFs.

キーワード：マルチコア光ファイバ、クロストーク、OTDR、空間分割多重

1. 緒 言

近年、スマートフォンやライブストリーミング、オンライン会議などがより一般的となったことにより、世界の通信トラフィックは年率30%で増大し続けている⁽¹⁾。一方で、現在の通信ネットワークを構成しているシングルモード光ファイバは、実験レベルでは既に伝送容量の理論的限界に達しつつある^{(2),(3)}。この限界を打破するために空間分割多重 (SDM) 技術に注目が集まっている⁽⁴⁾。中でも複数のコアを備えるマルチコア光ファイバ (MCF) は実用化に最も近い技術として有力視されている。

MCFにおいては複数のコアの間で信号の漏話 (クロストーク: XT) が生じるため、これを抑えることが信号品質を維持するために重要である。このため、これまでに様々な理論予測や実験が行われてきた^{(5)~(8)}。

我々は、様々な種類のXTのファイバ長手方向での変化をOTDR^{*1}を用いて測定できることを明らかにしてきた^{(9)~(11)}。本論文では、なかでも、MCFにおけるXTのファイバ曲げ半径依存性⁽⁹⁾と、双方向伝送時に課題となる後方散乱起因のXTのファイバ長依存性⁽¹⁰⁾について、OTDRで測定した結果について報告する。

2. MCFのコア間XTとOTDR測定

XTはあるコアを伝搬するモードと別のコアを伝搬するモードとの結合によって生じる。この結合の強さはパワー結合係数 h で表される。パワー結合係数は主に、電界のコアへの閉じ込めの強さ、コア中心間距離、コア間の伝搬定数差、ファイバの曲げ半径などによって決定され、XTが十分小さい場合、XTの大きさは

$$XT = hL \dots\dots\dots (1)$$

のようにパワー結合係数 h でファイバ長 L に比例する^{(5),(6)}。このXTは結合元のコア1のパワー P_1 と結合先のコア2のパワー P_2 との比率で

$$XT \equiv \frac{P_2}{P_1} \dots\dots\dots (2)$$

のように定義される (図1)。

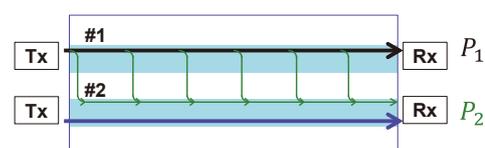


図1 並行XTの模式図⁽⁹⁾
Tx: 送信機、Rx: 受信機

上記XTは、MCFの片端からコア1のみに光を入射したときの他端でのコア2とコア1の出射光強度の比から測定することができるが（透過法）、OTDRによる測定手法も提案されている⁽¹²⁾。OTDRを用いた測定手法では、MCFの片端のみでの入出射でXT測定を行えるとともに、XTのファイバ長手方向での分布測定を行うことができる。図2はOTDRによるXT測定の模式図である。OTDRからMCFのコア1に入射したパルスがファイバ長手位置zで後方散乱される。コア1からコア2へは、後方散乱の前も後も係数hでXTが生じている。コア1もコア2も同様の後方散乱を受けているので、コア間での後方散乱起因でのパワーの差は生じない。このため、後方散乱している部分での光の減衰を除いて考えることができ、OTDRによるXT測定は単に信号光が測定位置zの2倍の距離を進んだ際のXTを測定することになり

$$XT(z) \equiv \frac{1 P_{12}(z)}{2 P_{11}(z)} \dots\dots\dots (3)$$

と表すことができる。ただし、 $P_{11}(z)$ は入射コアから出射する位置zで後方散乱された後方散乱光の強度、 $P_{12}(z)$ はXT先のコアから出射する位置zで後方散乱された後方散乱光の強度である。

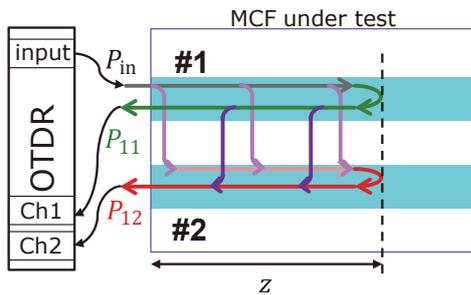


図2 OTDRによるMCFのXT測定の模式図⁽⁹⁾

3. 異種コア型MCFのXT曲げ依存性測定

XTはファイバの曲げ半径によって変化することが知られており、その変化はMCFのコア間の伝搬定数差によって異なる⁽⁵⁾。XTの曲げ半径依存性を明らかにすることは、ケーブル実装時における任意の曲げ半径でのXTを推定するのに有効である。しかしながら、様々な半径を持つMCFボビンを用いて透過法でXTの曲げ半径依存性を測定することは効率的ではない。我々は、MCFをボビンに巻く際にボビンの内側から外側へ曲げ径が変化することを利用して、マルチチャンネルOTDR（MC-OTDR）を用いてXTの曲げ半径依存性を効率的に測定できることを発見したので⁽⁹⁾、これを紹介する。

MC-OTDRをMCFにFIFO^{*2}で接続して図3の測定系で測定した。リファレンス測定として透過法による測定も行った。測定には、長さ13~60 kmの数本の異種コア型非結合2コアファイバを用いた。巻かれたMCFの外周から外径 R_1 を測定し、内側のファイバ端からの長さzの関数として曲げ半径Rを以下のように計算した。

$$R = \{(1 - z/L)R_0^2 + (z/L)R_1^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、半径Rは巻数に対して線形であり、ファイバ長さzの増加分がRに比例すると仮定した。また、並行XTは前章で紹介した式を用いて求めた。パワー結合係数に関しては並行XTを位置で微分することで求めた。

図4は、MC-OTDRによる後方散乱パルス光強度と並行XTの測定結果をボビンの内側から外側までのファイバ長手方向位置zの関数で示したものである。z=0がボビン内側の端である。この測定では波長1550 nmでパルス幅1 μsのパルスを2CFの内側から (a) と外側から (b) の2コアにそれぞれ入射した。図中矢印はパルスの入射方向を示している。これらの結果から前述の通りに入射端から位置zまでの並行XT (c, d) を計算した。(c, d)の点は、透過法で測定したXTの結果である。(c, d)の破線は式(1)にもとづいた理論的予測線である。これらのOTDRで測定した

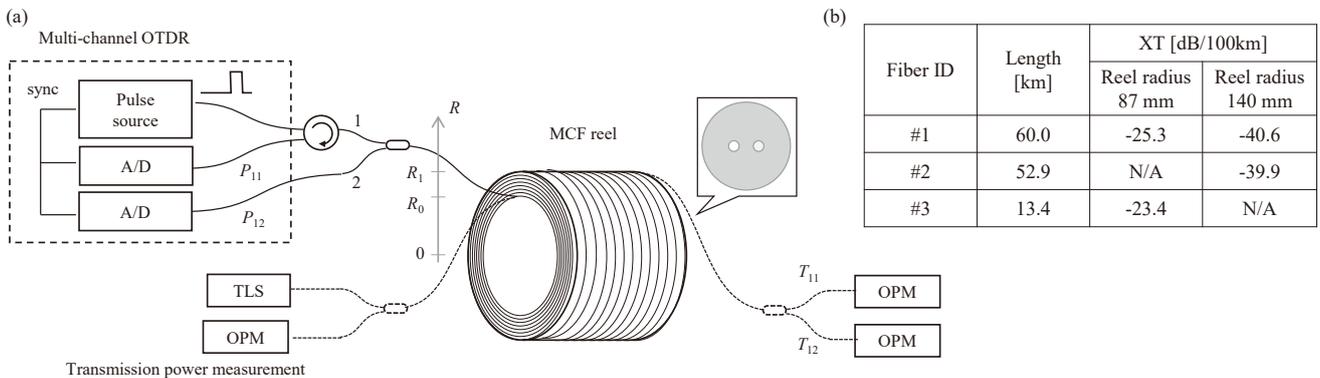


図3 (a) MC-OTDRによるMCFの並行XTの曲げ半径依存性測定の模式図⁽⁹⁾
 TLS: 波長可変光源、OPM: 光パワーメーター (b) 被測定ファイバの諸元

XTは、図中点で示した透過法で測定したXTとよく一致する。透過法による測定は、FIFOを接続したMCFとFIFO単体で行った。透過法での結果は(c, d)の両端の値に相当する。透過法での結果はMC-OTDRで測定した線と平均誤差0.2 dBで一致した。(c, d)より全長に渡って位置と並行XTの関係が線形から外れていることがわかる。

そこで、この結果からXT係数(パワー結合係数)の位置依存性を求めたものを図5(a)に示す。図中矢印はパルスの入射方向を示す。淡い色の実線と濃い色の実線は、それぞれ内側入射と外側入射での測定結果である。測定結果から算出したXT係数の各端部からそれぞれ入射した測定結果はよく一致し、MC-OTDRによるXT係数測定の妥当性を裏付けている。ファイバ位置に沿ったXT係数の変動は、後述するように、ファイバ位置に沿った曲げ半径の変

動に起因すると考えられる。

さらに、広い曲げ径の範囲でXTの曲げ半径依存性を調べるために、大きな径のポビンに、同じファイバを巻きなおして測定を行った結果も図5(b)に示す。青線が(a)で示した曲げ径での測定結果、黄線がより曲げ径の大きいポビンに巻きかえた場合の測定結果である。曲げ径が大きくなるほど異種コア間のXTが低減することが良く確認できる。

図6はXT係数のOTDR測定値と、パワー結合理論^{(6),(13)}によるXT係数の曲げ半径依存性の理論計算結果である。図中各色は同じプリフォームから取り出したファイバ#1から#3に対応し、諸元は図3(b)に示してある。淡い色の実線と濃い色の実線は、それぞれ内側入射と外側入射での測定である。破線は異なる相関長 L_c を仮定した理論的な予測値を示している。測定された2コアのMCFは、コア間伝搬

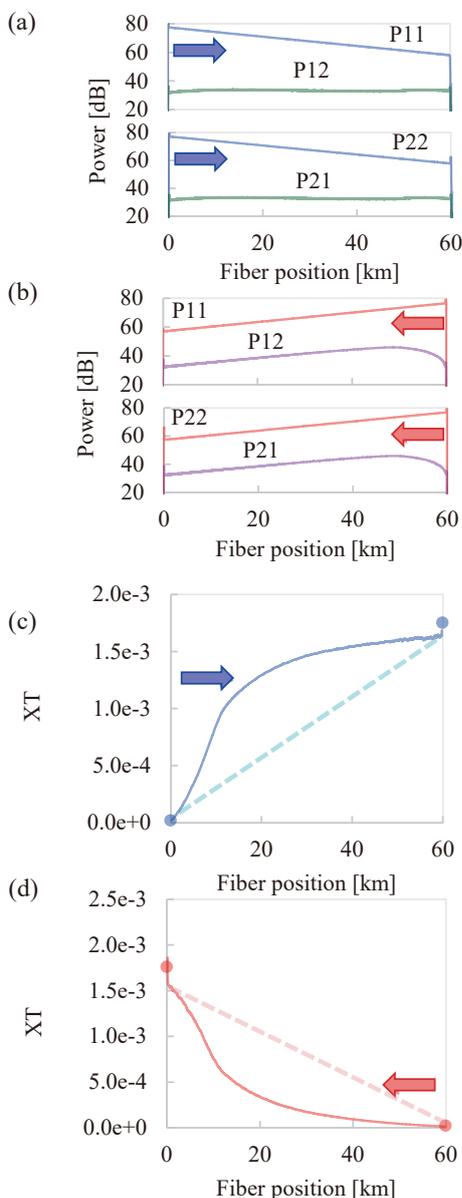


図4 MC-OTDRの測定結果⁽⁹⁾

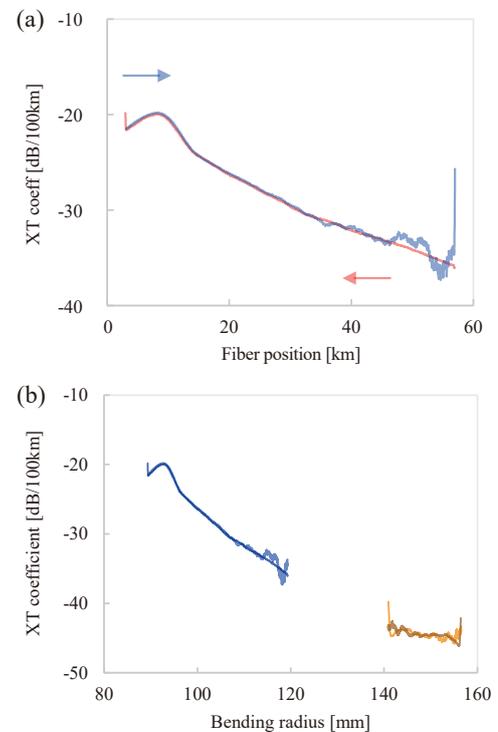


図5 (a) XT係数のファイバ長依存性⁽⁹⁾ 矢印はパルスの入射方向を示す。(b) XT係数の曲げ半径依存性⁽⁹⁾

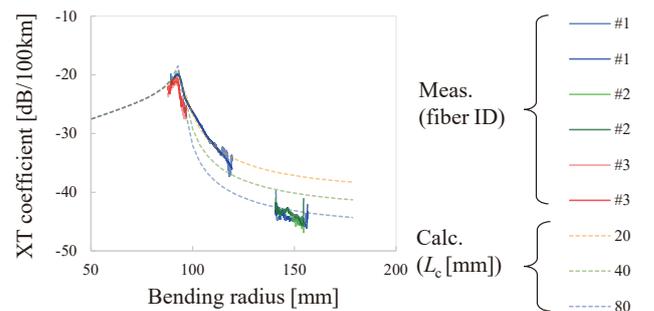


図6 MC-OTDRによるXT係数の測定値を曲げ半径の関数としてプロットしたグラフ⁽⁹⁾

定数差0.027%、コア間隔35 μmであり、相関長 L_c は20～80 mmを想定した。図6に見られるように、XT係数と曲げ半径の関係は L_c が20から80 mmのうちのいずれかの計算関係と一致する。相関長 L_c を1つに固定すると全長で測定結果と理論線が一致しないが、これは曲げ半径による相関長の変化や伝搬定数差の計算精度によるものと考えられ、今後の検討課題である。また、ここでは $R_{\text{eff}}=1.4R$ という補正を光弾性効果を考慮して加えているが、1.4という値は光弾性効果の補正係数としては若干大きいため、これについても今後の検討課題である。

4. 後方散乱XTのファイバ長依存性測定

通常、MCFのXTは、図1で示したように隣接コア間で信号光が同方向に伝搬する場合の値（ここでは並行XT： XT_{uni} と呼ぶ）が考えられるが、隣接コア間で信号光の伝搬方向を対向させることでXTを低減することができる^{(7),(8)}。対向伝搬時のXTは原因別に、後方散乱XT、反射XT、間接XTの三種類に分類できるが⁽⁷⁾、特に本論文で取り扱う後方散乱XTについて解説する。

後方散乱XTはその名前の通り、対向XTのうち後方散乱に起因するXTである。後方散乱XTの模式図を図7に示す。後方散乱はファイバの長手方向のどの位置でも起こるため、図7の $P_{\text{bs}2}$ は各位置での後方散乱光の和（積分）で表すことができる。この $P_{\text{bs}2}$ と結合元のコアの出射光 P_1 との比率で後方散乱XTを表すことができ、

$$XT_{\text{bs}} \equiv \frac{P_{\text{bs}2}}{P_1} = \frac{S\alpha_R}{\alpha} hL \left[\frac{\sinh(\alpha L)}{\alpha L} - \exp(\alpha L) \right] \dots (5)$$

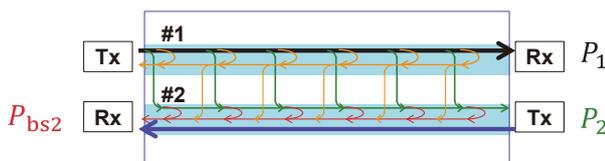


図7 後方散乱XTの模式図⁽¹⁰⁾

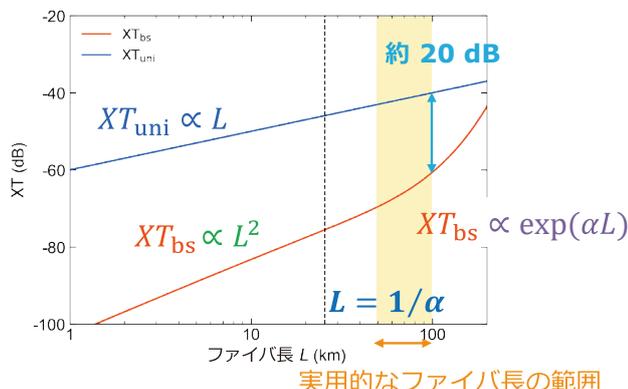


図8 後方散乱XTのファイバ長依存性⁽¹⁰⁾

と表すことができる^{(7),(8)}。右辺の式は後方散乱XTの理論式である。ここで、 α はファイバの減衰定数、 S はレイリー散乱の後方伝搬モードへの結合係数、 α_R はレイリー散乱によるファイバの減衰定数である。後方散乱XTのファイバ長 L 依存性は、図8にあるように $L = 1/\alpha$ を境に変化する。 $L \ll 1/\alpha$ では XT_{bs} は L^2 に比例し、 $L \gg 1/\alpha$ では XT_{bs} は $\exp(\alpha L)$ に比例する。通常の光ファイバではファイバの減衰定数 α は0.15～0.19 dB/km程度であるから、依存性が変化する $1/\alpha$ は20～30 kmである。並行XTと比較すると実用的なファイバ長の範囲では後方散乱XTの方が20 dB以上低い。そのため、信号光を並行に伝搬するよりも対向方向に伝搬した方がXT低減に有利である。

我々は、後方散乱XTについてOTDRを用いた測定手法を提案した⁽¹⁰⁾。後方散乱XTは、既に述べたとおり、結合先のコアでの後方散乱光の和（積分）と結合元のコアの透過光のパワーの比で求めることができるので、XT先の各位置での後方散乱光の積分はOTDR測定光 $P_{12}(z)$ の積分 $\int_0^z P_{12}(z')dz'$ で置き換えることができ、結合元の透過光は $P_{11}(z)$ の値から距離を半分に換算した値 $\sqrt{P_{11}(z)}$ から得られるから、

$$XT_{\text{bs}} \equiv \frac{S\alpha_R}{\sqrt{P_{11}(0)}} \frac{\int_0^z P_{12}(z')dz'}{\sqrt{P_{11}(z)}} \dots (6)$$

と表すことができる。

図9 (a)の実験系を用いて後方散乱XTの測定を行った。レーザーダイオード (LD) からのパルス信号はFIFOを介して被測定ファイバのコア1に入射され、コア1およびコア2からの後方散乱光は同じFIFOを介して検出される。比較のため、図9 (b) に示す実験系で、連続波 (CW) 波長可変光源 (TLS) を用いた透過法⁽¹⁴⁾による直接パワー測定で並行XTと後方散乱XTの値もあわせて測定した。

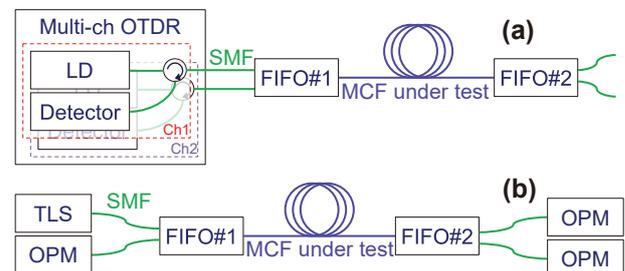


図9 (a) MC-OTDRによるXT分布測定と (b) CW光源による透過法の実験系⁽¹⁰⁾
LD:レーザーダイオード、TLS:波長可変光源、OPM:光パワーメータ

表1に測定サンプルの特性をまとめた。MCF-1、MCF-2ともに融着接続箇所を設け、長いスパンでの測定を行った。MCF-1のFIFOはトレンチアシストMCFピグテール

表1 λ=1.55 μmにおける測定サンプルの特性⁽¹⁰⁾
a: 透過法で測定 b: MC-OTDRで測定

	MCF-1	MCF-2
Number of cores	4	2
α in dB/km	0.19	0.16
A _{eff} [μm ²]	74	109
R _{BS} in dB for 1-ns pulse W	-81	-84
Cutoff wavelength [μm]	< 1.53	< 1.53
Power coupling coeff. h in dB at 1 km [10 dB/decade]	-44.0 ^a	-63.6 ^b
Fiber length [km]	131	111
Fusion splice point [km]	44, 88	59
FIFO XT [dB]	< -80 ^a (#1+#2)	-44.3(#1) ^b -50.8(#2) ^b

付きのエッチングファイバーバンドル型FIFO⁽¹⁵⁾、MCF-2のFIFOはフューズドテーパ型FIFO⁽¹⁶⁾を使用した。

図10 (a) はMCF-1における伝搬距離に対するXTの蓄積値 (スパン内) である。OTDRのパルス幅は10 μsである。並行XTおよび後方散乱XTの値は3章で紹介した式を用いて算出した。なお、伝搬距離のゼロ点については、パルス中心がゼロ点でファイバに入射するものとして補正した。また、CWパワー測定による並行XT、後方散乱XTの値もプロットした。並行XTの理論予測値は2章で紹介した式(5)で計算した。ただし、hはL=131 kmでの透過法測定の結果から算出した。後方散乱XTの理論予測値も2章で紹介した式で計算した。計算には表1にある値を使用した。(従って、後方散乱XTの測定結果の回帰曲線ではない。)

OTDRによる測定は透過法測定とよく一致している。さらに、OTDRで測定した並行XTと後方散乱XTのファイバ長手方向の変化は、理論的な予測と非常によく一致している。L < 10 kmにおける不一致は、3章で紹介したMC-OTDR測定結果から後方散乱XTを求める式がパルス幅の影響を完全には考慮していないためである。ただし、L > 10 kmでほとんどの長距離システムのスパン長をカバーすることができる。

図10 (b) は、MCF-2の伝搬距離に対するXTを示している。MCF-2は長距離伝搬してもXTが低いため、感度を上

げるためにOTDRのパルス幅は20 μsとした。その他についてはMCF-1の場合と同じように測定した。FIFOのXTは無視できず、100 kmでのMCF-2のXTとほぼ同じである。

100 km以降のXTの信号は20 μsのパルスでも測定できないほど弱かったため、50 km以上伝搬後のOTDRのXTの測定には大きなノイズが観測された。しかしながら、OTDRによる測定値の傾向は、透過法での測定値とよく一致している。後方散乱XTはOTDR測定XT成分の積分値から計算され、長距離伝搬後の弱いパワーは積分値に大きな影響を与えないため、OTDRで測定した後方散乱XTはこのようなノイズは観察されなかった。

MCF-1とMCF-2の測定値で大きな差があるのはFIFOのXTである。MCF-2の測定ではFIFOの影響は無視できず、OTDRで計測された並行XTと後方散乱XTは理論予測と一致しない。

並行XTは線形加算であるため、OTDR測定の場合、入射端のFIFOが後方散乱光に影響を及ぼすので、並行XTの値は、次のようになる。

$$XT_{uni}^{MCF+FIFO} = XT_{uni}^{FIFO} + hL \dots\dots\dots (7)$$

この式に基づいてFIFOの影響を受けた後方散乱XTを計算すると、次のようになる。

$$XT_{bs}^{MCF+FIFO} \approx XT_{bs}^{MCF} + 2XT_{uni}^{FIFO} \frac{S\alpha_R}{\alpha} \sinh(\alpha L) \dots\dots (8)$$

この式に基づいて計算した理論線はOTDRで測定した後方散乱XTとよく一致している。

5. 結 言

MC-OTDRによるXT測定を用いることで、XTと曲げ半径の関係の評価することができた。また、OTDRを用いたXT測定は非破壊的に依存性を測定する場合に有効である。

また、新たに考案したOTDRによる後方散乱XTの測定手法により、MCFにおける後方散乱XTは、理論式により良好に予測されることが検証された。したがって、隣接するコア間で伝搬方向を対向させる対向MCF伝送はXT抑制

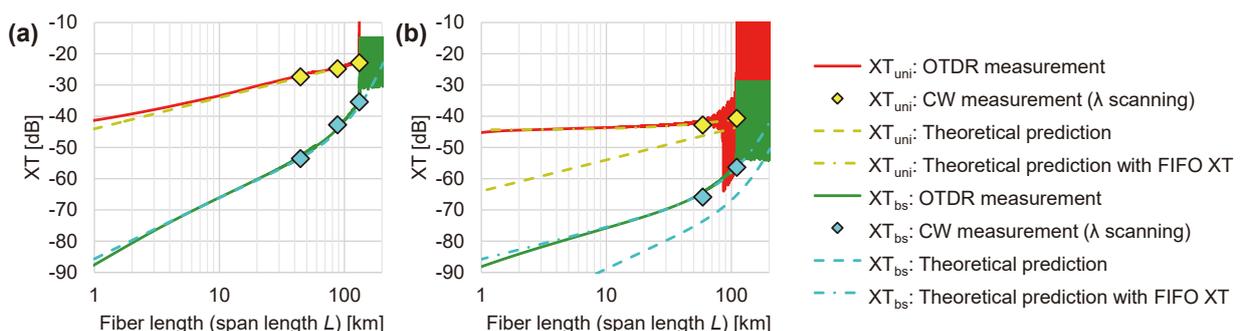


図10 (a) MCF-1と (b) MCF-2における伝搬距離に対するXT⁽¹⁰⁾

に非常に有効であることが示された。また、FIFOのXT抑制は、対向MCF伝送システムの後方散乱XTを設計する上で重要であり、FIFOのXTの効果は5章最後の式を用いてよく見積もることができる。

6. 謝 辞

本研究にあたり、実験に協力頂き、ご助言を頂いた東北大学電気通信研究機構特任教授中沢正隆先生・准教授吉田真人先生に深謝する。

本研究の一部は、総務省プロジェクト「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発」(JPMI00316)の研究開発の一環としてなされたものである。

用語集

※1 OTDR

Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) は、光ファイバにパルス試験光を入射し、その後方散乱光を時系列順に測定することで、ファイバ長手位置での伝送損失の値を測定することができる装置。

※2 FIFO

Fan In Fan Out (FIFO) はMCFの各コアをそれぞれシングルコアファイバに光学的に接続するための光デバイス。

参考文献

- (1) "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022."
- (2) R.-J. Essiambre and R. W. Tkach, "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks," Proc. IEEE, vol. 100, no. 5, pp.1035-1055 (May 2012)
- (3) A. Sano et al., "102.3-Tb/s (224 x 548-Gb/s) C- and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), 2012, PDP5C.3
- (4) P. J. Winzer and D. T. Neilson, "From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade," J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 5, pp. 1099-1115 (Mar. 2017)
- (5) T. Hayashi et al., "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," Opt. Express, vol. 19, no. 17, pp. 16576-16592 (Aug. 2011)
- (6) T. Hayashi et al., "Physical interpretation of intercore crosstalk in multicore fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend," Opt. Express, vol. 21, No. 5, pp. 5401-5412 (Mar. 2013)
- (7) T. Hayashi et al., "Uncoupled Multi-core Fiber Design for Practical Bidirectional Optical Communications," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), 2022, M1E.1
- (8) T. Hayashi, "Accuracy of Analytical Expressions for Rayleigh Backscattered Crosstalk in Bidirectional Multi-Core Fiber Transmissions," Opt. Express, vol. 30, no. 13, pp. 23943-23952 (Jun. 2022)
- (9) Y. Kobayashi et al., "Characterization of Inter-core Crosstalk of Multi-core Fiber as a Function of Bending Radius with Multi-channel OTDR," OptoElectron. Commun. Conf. / Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), 2022, TuC2-2

- (10) Y. Kobayashi et al., "Distributed Measurement of Rayleigh Backscattered Crosstalk for Bidirectional Multicore Fiber Transmissions Using Multi-Channel Optical Time Domain Reflectometry," in Eur. Conf. Opt. Commun. (ECOC), 2022, Tu4A.3
- (11) Y. Kobayashi et al., "Quadratically Suppressed Accumulation of Crosstalk Between Second Neighboring Cores of Multi-Core Fiber Measured by Commercial Single-Channel OTDR," Asia Commun. and Photonics Conf. / Int. Conf. on Info. Photonics and Opt. Commun. (ACP/IPOC), 2022, 2563
- (12) M. Nakazawa et al., "Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR," Opt. Express, vol. 20, No. 11, pp.12530-12540 (May 2012)
- (13) M. Koshiba et al., "Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers," IEEE Photon. J., vol. 4, no. 5, pp. 1987-1995 (Oct. 2012)
- (14) T. Hayashi et al., "Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber," J. Lightw. Technol., vol. 30, no. 4, pp. 583-589 (Feb. 2012)
- (15) T. Kikuchi et al., "Low insertion loss and high return loss fiber bundle fan-in/fan-out for four-core multi-core fiber," in OptoElectron. Commun. Conf./Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), 2022, TuC4-2
- (16) V. I. Kopp et al., "Ultra-Low-Loss MCF Fanouts for Submarine SDM Applications," in Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC), San Diego, 2022, Th1E.2

執筆者

小林 優斗* : 光通信研究所



井上 歩美 : 光通信研究所



菅沼 貴博 : 光通信研究所



永島 拓志 : 光通信研究所 主席



林 哲也 : 光通信研究所 グループ長
博士 (工学)



長谷川健美 : 光通信研究所 グループ長



* 主執筆者