

ラゲールガウスモード分割多重信号伝送

淡路 祥成

Laguerre-Gaussian Mode Division Multiplexing

Yoshinari AWAJI

Space-division multiplexing is the one of hottest topics in fiber telecommunications. Multi-core fiber (MCF) for long distance transmission or multi-mode transmission technologies which utilize high speed modulation of higher order modes owing to mode de-multiplexer or MIMO were investigated enthusiastically. Usually, LP modes are utilized as higher order mode in multi-mode fiber (or few-mode fiber). On the other hand, OAM mode or Laguerre-Gaussian (LG) mode utilization for fiber telecommunications is rising up, especially in abroad. In this review, I shall introduce LG mode transmission through MCF as a technology of Japanese origin.

Key words: space-division multiplexing (SDM), multi-core fiber (MCF), Laguerre-Gaussian (LG) mode

現在、光ファイバー通信技術は容量枯渇の危機にさらされている。その要因としては、光増幅器の帯域限界や、海底ケーブルシステム特有の事象ながら給電容量の限界なども指摘されているが、最も顕在化しつつある主たる理由は光ファイバーの挿入パワー限界と考えられている。

光ファイバー通信システムが導入された当時、スピードアップ（このころは容量増加というよりもこのほうが適した表現と思われる）のための技術の進歩は、光送受信機のクロックアップによって行われていた。1本の光ファイバーに複数の通信チャネルを収容するためには、光パルス列をタイミング調整と同期によって弁別する時分割多重 (OTDM; optical time-division multiplexing) 方式が用いられた。いわば、光の送受信機を駆動する電子回路の高速化が牽引役であった。

下って、1990年代後半は波長多重分割 (WDM; wavelength-division multiplexing) 時代の幕開けとなった。わが国発の WDM 方式の実用化は、高精度な光フィルターの製造と、複数の波長を一括で増幅可能な光ファイバー増幅器の小型化によって、一気に加速した。光の並列性を利用することで潜在容量をふんだんに使うことが可能になり、スピードアップの時代から総容量（あるいは帯域）の

拡大の時代へ入ってきた。しかし、半年で2倍という驚異的な容量増加をみせたのもつかのま、2001年に S (1476.81~1508.01 nm) + C (1526.83~1563.05 nm) + L (1570.01~1610.06 nm) の3バンドを用いた 10.92 Tb/s の伝送実験を最後に、研究発表における容量の増加がぱたりと止まってしまう。利用可能な光増幅器の帯域をほぼ使い切ってしまったということだろう。

第三の時代は無線通信に学べということで、それまでの光パルスのオンオフによる OOK (on-off keying) から脱却し、高度な変調フォーマットによる周波数利用効率向上を目指すコヒーレント (デジタル) 変復調技術が立ち上がった。シャノン限界に近づこうとする試みといえる。光ファイバーや光増幅器の所与の帯域は有限であっても、周波数利用効率を向上することで通信容量の拡大が期待されたが、奇妙なことに WDM のときのようなめざましい増加はみせず、むしろある一点に向かって飽和・漸近するような傾向が年ごとに顕わになった。このころから（たとえば¹⁾）光ファイバーの容量危機がささやかれるようになってくる。

周知のように、光ファイバーには三次の非線形性が顕著に表れる。総容量を拡大するためには、WDM において波

長数を増設したり、コヒーレント変調で多値度を上げたりする必要がある。いずれも十分な通信品質を得ようとすると、ある程度の光パワーを送出する必要があり、それによりトータルの光パワーも増大し、三次の非線形性によって信号の劣化が起こるようになる。したがって、総容量を拡大するために光パワーを増大させると、却って信号品質が劣化して容量が低下する（あるいは極大が生じる）というジレンマに陥る。これは非線形シャノン限界などとよばれる、光ファイバー伝送特有の現象である。

空間分割多重 (SDM; space-division multiplexing) はこうした背景から注目されるに至った。なぜならば、三次の非線形性に制限されずに総容量を抜本的に増加させるには、空間を用いた多重方式が最後のフロンティアと考えられているからである。そこで、従来の標準シングルモードファイバー (SSMF) の限界を突破するための候補となったのが、複数のコアをもつマルチコアファイバー (MCF) や、複数モードをもちかつ三次非線形現象が起きにくい大きな実効断面積をもつ multi-mode fiber (MMF) (few-mode fiber (FMF)) である。なお、まだ言葉遣いの統一がなされていないが、本稿では SDM を広義の空間分割多重とし、空間モードや伝搬モードを用いたモード分割多重 (MDM) は SDM の一部として取り扱う。

1. ラゲールガウスモードの通信応用

SDM とは、並列した複数の空間チャネルを用いて独立なパスとして利用することである。1本の光ファイバー中に複数のコア（ここでは各コアをシングルモードに限定する）を収容した MCF では、単純に言えばコア数の掛け算で通信容量が増加する。一方、1本の光ファイバー中に複数の高次モード（一般的な光ファイバーでは LP モード）を収容可能な MMF では、モード分散が阻害要因となって高速変調が不可能というのが近年までの一般的な理解であったが、モード合分波器や MIMO (multiple-input and multiple-output) の利活用によって、高次モードを分離して高速変調することが可能となり、SDM の一方式として研究が進められている。

さて、本特集の主題であるラゲールガウス (LG) モードを通信に応用するという研究活動が海外を中心に展開されているが、これは軌道角運動量 (OAM) の異なる LG モードを弁別することで、それぞれ別個の通信チャネルとして用いるという概念である。

まずは、LG モードによる MDM の原理確認的な意味合いで、10 Gbit/s 多重化 LG モード光パルスのコヒーレント伝搬と多重分離について、一般的な通信波長帯である C 帯

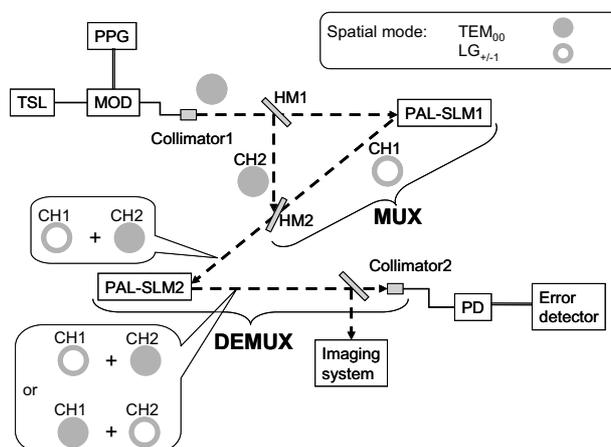


図1 ラゲールガウスモードを用いたモード多重の構成の概略。

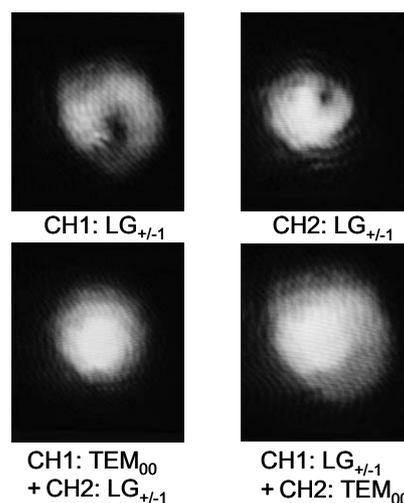


図2 CH1, CH2, モード分割多重化された CH1, CH2 のファースフィールドパターン。

ンドで実証実験を行った。

図1に、実験装置の構成の概略を示す。ファイバーコリメーター1から出射した TEM_{00} モードビームを、ハーフミラー (HM1) により2つのパスに分離した (CH1, CH2)。CH1 を空間光変調器 (SLM) を用いて TEM_{00} から LG_{+1} または LG_{-1} に変換した。実験では解像度の異なる2つの PAL-SLM (浜松ホトニクス製 PPM X8267; 1024×768 ピクセル, PPM X7550; 640×480 ピクセル) を用いた (PAL-SLM1, PAL-SLM2)。その後、CH1 と CH2 とを HM2 により合成し、PAL-SLM2 へ入射した。PAL-SLM1 と HM2 は、モード多重器 (MUX) として機能している。PAL-SLM2 において空間変調を適用しなければ、多重化された CH1 と CH2 はその空間モードを維持する。一方、PAL-SLM1 で用いた変調パターンと同一のパターンが PAL-SLM2 に印加された場合、CH1 が $LG_{+/-1}$ から TEM_{00} に変化すると同時に、CH2 が TEM_{00} から $LG_{+/-1}$ に変化する。PAL-SLM2

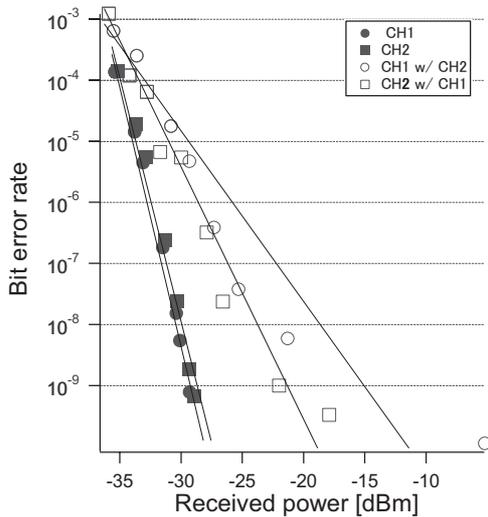


図3 計測したビットエラーレート。

は、所望のチャンネルを TEM_{00} モードに変換するための空間モードスイッチとして機能し、その後空間ピンホールフィルターが LG モードを含む他のモードを排除する。本実験では、コリメーター2に接続されたSSMFの開口がピンホールとして機能している。これらは、モード分離器 (DEMUX) として機能する。

光源は可変半導体レーザー (santec 製 TSL510) を用い、中心波長は 1550 nm で、CH1 と CH2 の間のマルチパス干渉を避けるため、線幅はコヒーレント制御機能により 160 MHz まで増加した。この光を疑似ランダムビット系列 (PRBS) $2^{23}-1$ により 10 Gbit/s で変調した。

図2に、CH1 および CH2 のファーフールドビームプロファイルを、イメージングシステムにより観察された各 LG モードおよび TEM_{00} モードについて示す。最後に、図3に示すように、多重分離された CH1 および CH2 のビットエラーレートを計測した。チャンネル間クロストークにより、5 ~ 10 dB のパワーペナルティーとエラーフロアが発生したが、すべての多重分離されたチャンネルについてビット

エラーレート (BER) $< 10^{-9}$ (エラーフリー) を達成した²⁾。また、海外でも同様の実証実験が行われている³⁾。

2. LG モードのファイバー伝搬

次に、LG モードのファイバー伝搬と通信実験について述べる。上記の MDM 方式が実現可能であることは原理的には実証されたが、遠方への信号伝送を考えると、ファイバー伝搬能力は不可欠な要素である。現在ではさまざまなファイバー伝搬実験が報告されるようになったが、ここでは皮切りとなった MCF 伝送実験について紹介する⁴⁾。

この研究報告では、MCFによる多重化LGモードの同時伝搬を実現するとともに、7コアファイバーから出射した6ビームの群から LG モード成分を多重分離することに成功し、各モードチャンネルではエラーフリー品質の維持を達成している。この MDM 技術は光学的に動作し、MIMO 等のデジタル信号処理を一切必要としない。

図4に、MCFにおけるLGモードのMDMの概念を示す。各LGモードは、いくつかのMCFコアと空間的に重なり(多重化され)結合されている。MCFの出力は、各コアに対応するビーム群となる。MCF伝搬後のビーム群にOAMが保存されていれば、適当なビームの組み合わせによってLGモードを復元できる。よって、ビーム群のOAMを識別することにより、適切なLGモードを抽出(多重分離)できることになる。MCFの役割はイメージファイバーの役割に似ているが、各コアはシングルモードであり、高速信号を伝送する能力がある。

図5(a)に、実験に用いた7コアMCF(住友電工製)を示す⁴⁾。コア間クロストークを減らすため、各コアは図2(b)に示すトレンチ型屈折率プロファイルを有するように設計した。コアピッチとクラッド径はそれぞれ $45 \mu\text{m}$ と $150 \mu\text{m}$ で、すべてのコアは同じ設計プロファイルに基づいており、長い距離を伝搬した後のクロストークは、ファイバーの曲げによるコア間の実効(等価)屈折率の不整合

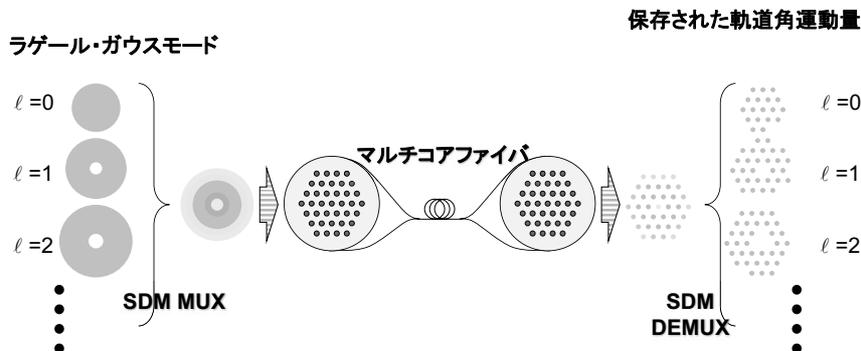


図4 マルチコアファイバーにおけるモード分割多重の概念。

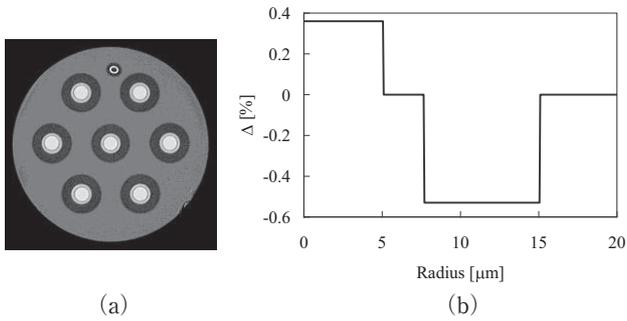


図5 使用したマルチコアファイバー. (a) 断面図, (b) コア的设计プロフィール.

を利用することにより、より低減することができる⁵⁾. 今回の実験では MCF 伝搬とビーム群による OAM 保存の原理確認のため、光学定盤上の 80 cm 程度の短い距離で実験を行ったが、ほぼ曲げられていない状態でのファイバーの結合長は 1550 nm では 30 km よりも長いので、クロストークは -100 dB よりも小さく、ほとんど無視できる.

図 6 に、MDM 実験の構成の概略を示す. 基本構成は図 1 に準じる. CH1 と CH2 の多重化ビームは MCF のクリーブ端に集光しているが、SSMF での従来の集光条件とは異なり、ビームウエストは 7 つのコアすべてに重なるように調整され、直径は約 110 μm と推定される. CH1: LG_{+1}

($\ell = +1$) を 7 コアファイバーの外側コアに導入すると、MCF からの出力は 6 つのガウスビームになり、 $\ell = +1$ および $\ell = \pm 6$ の LG モードに分解できる. 一方で、CH2: ガウス ($\ell = 0$) は中央コアに入射される. MCF の出力は非球面レンズにより PAL-SLM2 に入射し、 $\ell = -1$ の対応する位相パターンを印加してモード変換を行った.

図 7 に、CH1, CH2, および多重化された CH1+CH2 の、MCF 伝搬前および伝搬後のビームプロファイルを示す.

CH1 と CH2 では伝搬後のビームサイズが異なることがわかり、単なる SDM と考えることも可能であるが、LG モードを用いた MDM の最も顕著な特徴は OAM の保存であり、このことは PAL-SLM2 を多重分離に用いて OAM を切り替えることにより確認できる. MCF のコア間クロストークが小さいため OAM は十分に保存され、CH1 と CH2 のモード消光比は 15 dB に達した.

最後に、図 8 に示すように、CH1 と CH2 のビットエラーレートを計測した. MDM の典型的なパワーペナルティは約 6 ~ 9 dB で、これはおもに MCF 端面でのビームの蹴られ損による電力損失に起因すると考えられる.

なお、本実験に続いて、海外では Vortex ファイバーを用いた LG モードの伝送に成功している⁵⁾.

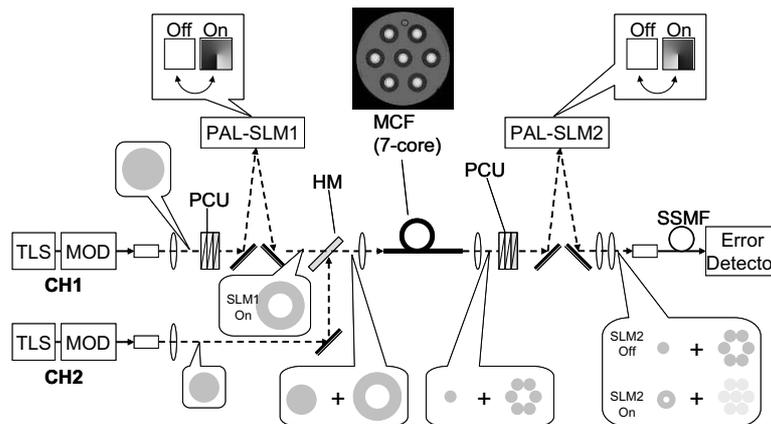


図6 実験装置. TLS: 可変レーザー光源, MOD: LiNbO_3 変調器, PCU: $\lambda/2$ 波長板・ $\lambda/4$ 波長板・偏光板からなる偏光制御ユニット, HM: ハーフミラー.

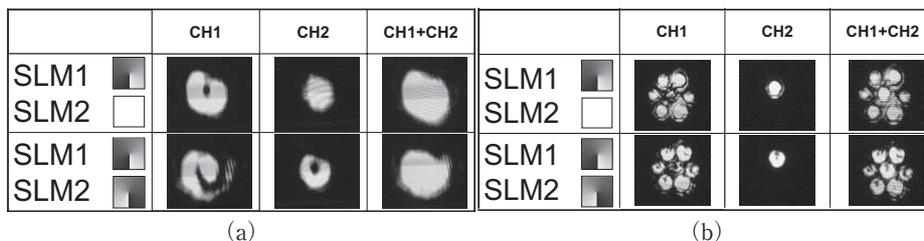


図7 ビームプロファイル. (a) マルチコアファイバー伝搬前, (b) マルチコアファイバー伝搬後.

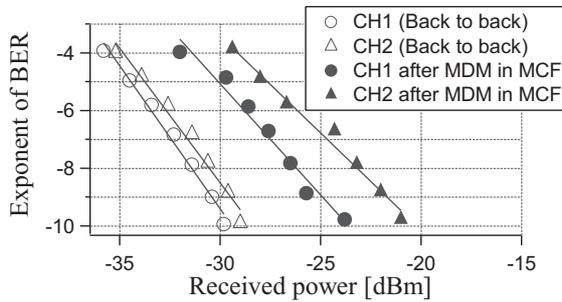


図8 計測したビットエラーレート。

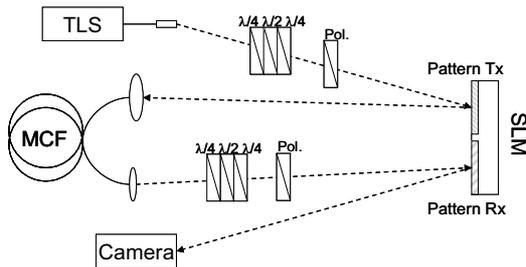


図9 軌道角運動量観察のための実験装置. TLS:可変光源, Pol:偏光子, SLM:空間光変調器, MCF:マルチコアファイバー.

3. ファイバー伝搬後の軌道角運動量スペクトル評価

これまでのファイバー伝送の実証実験では、OAMを識別するために、受信側で空間光変調器 (SLM) をモード変換器として用い、ピンホールとして機能するSSMFに結合することで基本ガウスモードを弁別し、7コアファイバーの出力に対して、隣接する $\ell=0$ と $\ell=+1$ 間の消光比 ~ 20 dBを達成している。しかしながら、スケラブルなOAM空間の全体像と相対強度を与えるOAMスペクトルについての見通しはなかった。特に、MCFから出力されるビームは特異なトポロジカルチャージを有しているため、そのOAMスペクトルを理解することは大変重要であると考えられる。

この実験では、7コアファイバーからの出力ビームのOAMスペクトルを観察した⁶⁾。また、ファイバー長を従

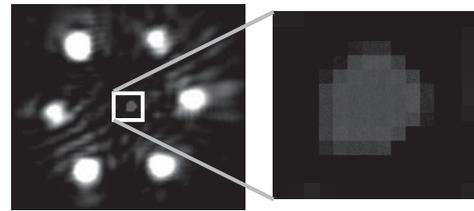


図10 6つのビームのプロファイルとサンプリング点。

来の80 cmから500 mまで伸ばし、各コアにおける偏光が独立して回転することを見いだした。この状態においてもなおOAMは保存されることがわかり、OAM伝搬方法としての信頼性が向上した。

図9に、MCF伝搬後のOAMスペクトルを観察するための実験装置の概略図を示す。コリメーター付きの変光光源から1550 nmのTEM₀₀モードビームを出射し、空間モードの変換にはLCOS型SLM (浜松ホトニクス製X10468-08)を用いた。パターンTxとRxはそれぞれ、SLMの投影面を半分ずつ分割して印加している。SLMには偏光依存性があるため、波長板群と偏光子を用いてSLMに入射するビームが直線偏光になるように調整した。パターンTxからの回折ビームは、非球面レンズを用いてMCFの端に集光される。集光条件は伝送実験のときと似ているが、OAMに従ってビーム径が変化した場合でも7つのコアすべてに重なるように、LGモードのビームウエストは常に径が $\sim 110 \mu\text{m}$ になるように調整した。LGモードでは中心に特異点があるため、おもに外側の6つのコアが励振される。

まず、80 cmのMCFを用いて、MCF伝搬後のビーム群を再びSLMに入射し、パターンRxにより回折された出力光をCCDカメラにより観察した⁷⁾。図10に示すように、中央部における光強度を画像処理により抽出し、 $\ell=-12 \sim +12$ の場合についてパターンRxのOAMに従ってプロットした。これにより、図10に示すOAMスペクトルを得た。

図11 (a)に、パターンTx, $\ell=+3$ の場合を示す。 $\ell=$

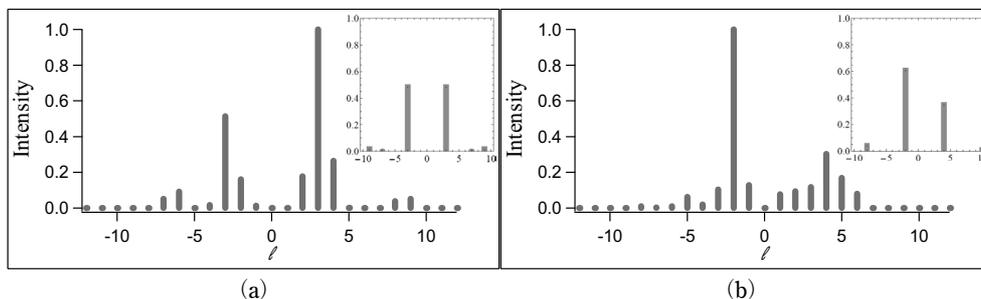


図11 軌道角運動量スペクトル. (a) $\ell=+3$, (b) $\ell=+4$.

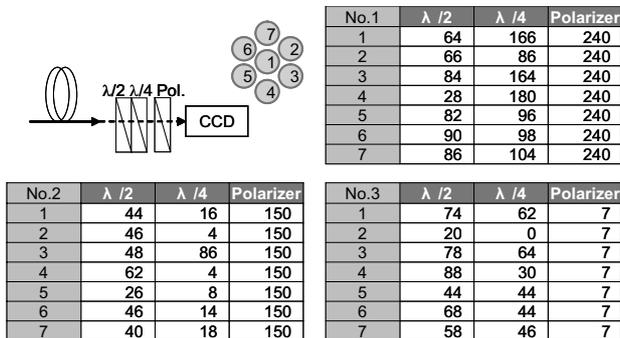


図 12 マルチコアファイバーにおける偏光の独立回転.

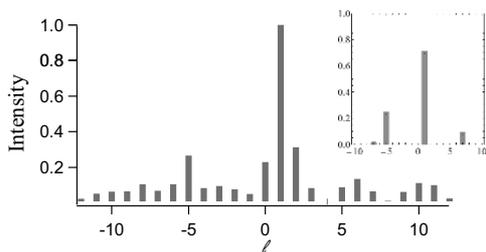


図 13 500 m 伝搬後の $l = +1$ の軌道角運動量スペクトル.

+3 成分と $l = -3$ 成分のサイドモード抑圧比が高いことがわかる. 図中別枠のスペクトルは数値計算による. MCF からの出力ビーム群には 6 つの分離されたビームが含まれるため, 方位角方向の強度変動により主成分から ± 6 ずれたサテライトモードが発生すると考えられる. したがって, $l = +3$ 成分には $l = -3$ 成分と $l = +9$ 成分が付随することが予想される. $l = +9$ 成分が小さいのは, より高次の OAM の違いが回折効率に影響したことが原因と考えられる. このことは, 図 11 (b) に示すパターン Tx, $l = +4$ の場合で確認できる. この場合は, $l = +10$ 成分および $l = -2$ 成分が小さくなっている.

ここまでは, MCF 長が大変短かったため, ファイバーに由来する変動はすべてほぼ無視できると考えられた. そこで, 外乱などによる変動を観察するため, MCF を別の 500 m 長のものに取り替えた. まず, 各コアからの各ビームの偏光が互いに独立して回転することを観察した. MCF 伝搬後の観察のための実験装置の構成と各コアへの割り当て数を図 12 に示す. CCD カメラの画像を観察しつつ各コアについて最大強度を得られるように波長板を調整した. この測定を偏光子の回転角を 3 通りに固定して行った. その結果, 500 m 伝搬後の各コアからのビームの偏光状態は互いに異なりランダムであることが明らかになった.

このように偏光の回転はランダムであったが, OAM スペクトルは図 13 のように観察することができた. 偏光が回転すると, SLM における直交偏光は回折されず, OAM

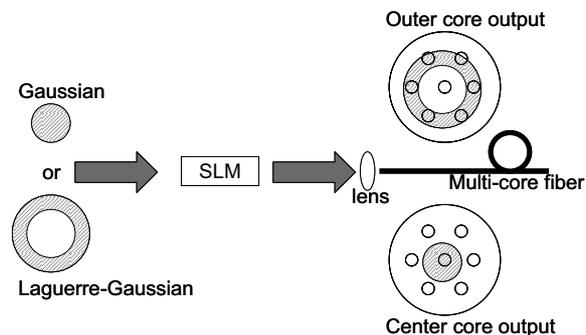


図 14 マルチコアファイバーとラゲール・ガウスモードビームを用いたコアパススイッチングの概念. SLM: 空間光変調器.

スペクトルの背景雑音になる. そのような雑音を低減するため, 波長板群と偏光子を SLM のパターン Rx の直前に配置して, 外周コアからの 6 つのビームの強度がほぼ等しくなるように調整した. 図 13 の結果は, 500 m 伝搬後の $l = +1$ の OAM スペクトルと付随する $l = -5$ 成分を示す.

4. MCF と LG モードを用いたコアパススイッチング

ここまで MCF を用いた LG モードの伝送について紹介してきたが, 通信ネットワーク応用ではスイッチング機能が不可欠である. 本章では MCF を用いた LG モードビームのコアパススイッチング方法, 具体的には, MCF と LG モードを用いた 2×2 ポートスイッチング方式について述べる⁸⁾. この方法では, 基本ガウス (TEM₀₀), あるいは高次の LG モードを入力信号として想定する. また MCF を, 伝送ファイバーとしてだけでなく, スwitching における空間識別器として用いるところに特徴がある. MCF には非結合型マルチコアファイバーを用いたため, 各コアを独立パスとして扱うことができる. 簡略化のため本実験では 7 コアファイバーを用いて考察・実証を行ったが, 19 コア等のコア数がより多いマルチコアファイバーを用いることで, スwitching のポート数は簡単に増やすことができる⁹⁾.

図 14 に示す通り, 本方式では入力ビームは MCF の端面上に集光される. 高次 LG モード入力を結合する際には, リング状のビームウエストが外周の 6 つのコアに重なるように集光するため, 本実験では約 95 μm だった. 一方, 基本ガウスモードの入力光は中央コアに集光され, おもに中央コアを励振する.

SLM は空間位相変調パターンを適用することにより回折光の OAM 数を変えることができる. したがって, SLM による変調に従い, 入力光は中央コアパスと外側コアグループパスとの間で切り替えることが可能になる. 中央コアパスと外側コアパスの 1 つをシングルコアシステムでの

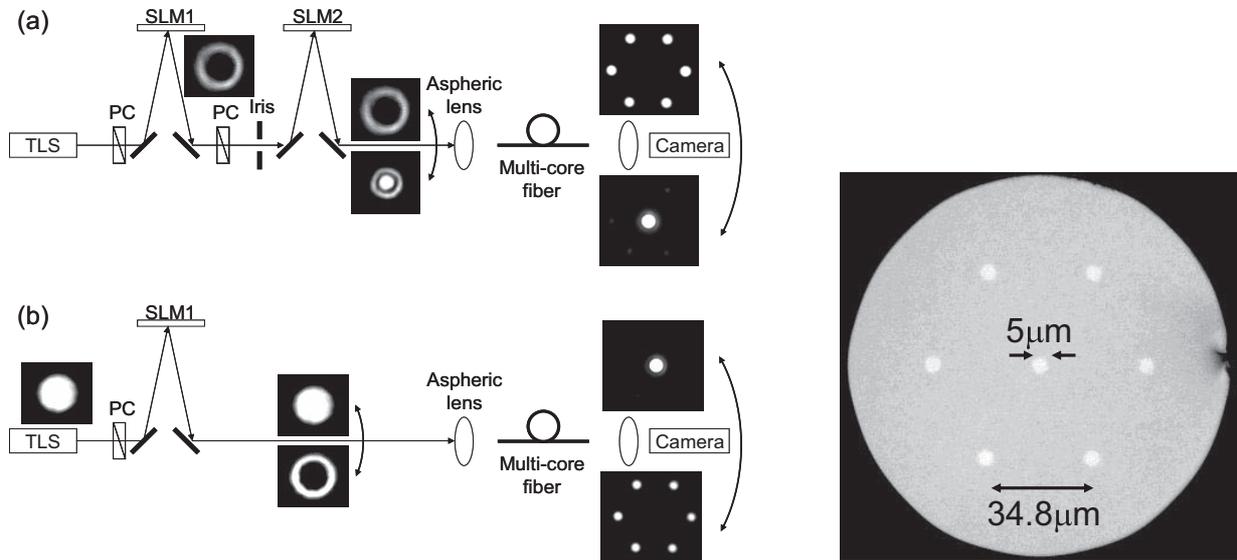


図15 実験装置とマルチコアファイバーの横断面。(a) ラゲールガウスモード入力の場合、(b) ガウス入力の場合。

使用のために独立に出力 SSMF に接続し、一方、外側コアグループでは新たに割り当てられた OAM を印加して MCF を連続的に伝搬するようにすることも可能である。

図 15 に実験装置を示す。本実験では、各入力ビームごとに別々にスイッチングの特性を調べた。可変半導体レーザー (santec 製 TSL510) の出力ビームを、それぞれ LCOS 型 SLM1 (浜松ホトニクス製 X10468-08) と SLM2 (Holoeye 社製 PLUTO-TELCO) を用いて変調した。SLM には偏光依存性があるため、波長板群と偏光子を調整して、SLM に入力されるビームの偏光を直線にした。また、アイリスを用いて望ましくないスペckルや迷光を排除した。MCF の出力を CCD カメラで記録し、出力強度を画像処理により測定した。

図 15 (a) に LG モード入力の場合を示す。SLM1 は、LG モードビームを生成するためだけに用いた。SLM1 に代えて、位相板などの別のモード変換器を用いてもスイッチングは可能である。本実験では入力光として、 $l = +4$ を用いた。SLM2 は、 $l = 0$ と $l = -4$ の 2 つの回折パターンを切り替え、出力 OAM は $l = +4$ または $l = 0$ になる。LG モード ($l = +4$) はおもに外側の 6 つのコアを励振し、再生成されたガウスモード ($l = 0$) はおもに中央コアを励振する。

図 15 (b) には基本ガウスモード入力の場合を示す。スイッチングには SLM を 1 つだけ用いた。SLM1 は $l = +4$ と $l = 0$ の 2 つの回折パターンを切り替え、出力 OAM は $l = +4$ または $l = 0$ になった。

表 1 に測定した出力強度と消光比 (ER) を示す。中央コアにおける ER は、いずれのスイッチングの場合も 30 dB

表 1 出力強度と消光比 (ER)。 (a) ラゲールガウスモード入力、(b) ガウス入力。

	Center core	Outer core 1	Outer core 2	Outer core 3	Outer core 4	Outer core 5	Outer core 6
Power [dBm]	-57	-36	-34	-36	-38	-37	-37
Power [dBm]	-22	-50	-55	-50	-55	-50	-51
ER [dB]	35	14	21	14	17	13	14

	Center core	Outer core 1	Outer core 2	Outer core 3	Outer core 4	Outer core 5	Outer core 6
Power [dBm]	-20	-50	-55	-52	-51	-50	-48
Power [dBm]	-52	-38	-40	-38	-34	-32	-33
ER [dB]	32	12	15	14	17	18	15

を超えている。これは、スイッチングの観点からはかなりよい結果と考えられる。一方、外側コアの ER は、LG モード入力の場合には 13~21 dB、ガウス入力の場合には 12~18 dB であった。ER が比較的低下した理由は、ビーム整形の不完全さと SLM の変調度のばらつきにあると考えられる。また、途中の光学系のレンズがビームの質に大きな影響を与えるが、これらは実装段階で最適化し改善することが期待される。コアによっては ER が 18 dB に達したので、外側コアの 1 つを少なくともシングルコアシステム用の SSMF 出力に実用することができる。外側コアのビーム群には強度のばらつきが観察されたが、保存された OAM は各コアの出力強度を等化した後でも検出できる⁶⁾。したがって、スイッチング後のビーム群を MCF 伝送すること

も可能である。

LGモードの光ファイバー通信の可能性の探求は主として海外で行われているが、他のSDM技術と比べて実装面での難しさが際立っている。ファイバー伝送については、まだ長距離化などに課題を残すことなどから、信号処理やスイッチングなどの展開が期待される。

文 献

- 1) E. B. Desurvire: "Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades," *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 4697-4710.
- 2) Y. Awaji, N. Wada and Y. Toda: "Demonstration of spatial mode division multiplexing using Laguerre-Gaussian mode beam in telecom-wavelength," *23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society*, WBB2 (2010).
- 3) J. Wang, J. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, B. Shamee, A. Willner, K. Birnbaum, J. Choi, B. Erkmen, S. Dolinar and M. Tur: "Demonstration of 12.8-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over multiple orbital-angular-momentum modes," *37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, We.10. P1.76 (2011).
- 4) Y. Awaji, N. Wada, Y. Toda and T. Hayashi: "World first mode/spatial division multiplexing in multi-core fiber using Laguerre-Gaussian mode," *37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, We.10. P1.55 (2011).
- 5) N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, A. Willner and S. Ramachandran: "Orbital angular momentum (OAM) based mode division multiplexing (MDM) over a Km-length fiber," *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)* Th.3. C.6 (2012).
- 6) Y. Awaji, N. Wada and Y. Toda: "Observation of orbital angular momentum spectrum in propagating mode through seven-core fibers," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, JTu2K.3 (2012).
- 7) A. Mair, A. Vaziri, G. Weihs and A. Zeilinger: "Entanglement of the orbital angular momentum states of photons," *Nature (London)*, **412** (2001) 313-316.
- 8) Y. Awaji, N. Wada and Y. Toda: "Core path switching based on multi-core fiber and Laguerre-Gaussian mode beam," *Photonics in Switching*, Fr-S26-O13 (2012).
- 9) J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi and M. Watanabe: "19-core fiber transmission of $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, PDP5C.1 (2012).

(2013年7月30日受理)