

# 実時間 MIMO モード多重光伝送システムに関する研究 (171507001)

## Real-time MIMO Mode-division multiplexed optical transmission

### 研究代表者

五十嵐浩司 大阪大学大学院工学研究科

Koji Igarashi Graduate School of Engineering, Osaka University

### 研究分担者

釣谷剛宏<sup>†</sup> 若山雄太<sup>†</sup> 相馬大樹<sup>†</sup> 別府翔平<sup>†</sup> KDDI 総合研究所

Takehiro Tsuritani<sup>†</sup> Yuta Wakayama<sup>†</sup> Daiki Soma<sup>†</sup> Shohei Beppu<sup>†</sup> KDDI Research, Inc.

研究期間 平成 29 年度～平成 30 年度

## 概要

多モードファイバにおける複数ファイバモードで複数信号を多重伝送するモード分割多重伝送方式では、モード数に比例して伝送容量を拡大可能である。最大の課題が、モード間結合を補償する MIMO 信号処理に巨大な電子回路が必要となる点である。ほとんどのモード多重伝送実験ではオフライン信号処理が使われており、実時間伝送実験は高々 3 モード多重しか報告されていない。本研究では、実時間 MIMO 光受信器を用いて世界で初めて実時間 10 モード多重伝送実験を行った。ここでは、伝送用ファイバや光デバイスでのモード間結合を可能な限り抑圧し、最も大きなモード間結合が生じる縮退モード間結合のみを MIMO 信号処理で補償する。この場合、必要となる MIMO 信号処理回路は大幅に削減される。本研究では、FPGA を用いて MIMO 信号処理を実装した実時間 MIMO 光受信器を試作し、弱結合モード多重伝送方式の性能を実時間評価した。3 波長・10 モード多重・偏波多重 QPSK 光信号を 48km 10 モードファイバ伝送し、実時間 MIMO 光受信器で受信・復調した。全モード・全波長・両偏波全てのビット誤り率を評価した結果、良好な受信特性が得られた。この結果、波長当たり 12.5 GHz 帯域において 375 Gbit/s 伝送容量が達成された。

## 1. まえがき

多モードファイバにおける複数ファイバモードに異なる信号を多重伝送するモード多重伝送技術によって、光ファイバ伝送容量をモード数に比例して拡大することができる。そこで問題となるモード間結合を補償するために、コヒーレント光受信した後のモード全てに対する MIMO (multiple-input multiple-output) 等化が必要となる。この MIMO 信号処理回路規模はモード多重数の 2 乗で大きくなるのが最大の課題である。この回路制限のために、モード多重数に対する伝送容量増大のスケール則が成り立たない。現状報告されている実験では、受信信号全てを PC に取り込み、オフライン MIMO で復調し性能評価を行っているのがほとんどである。実システムでは実時間信号処理が必須であることは言うまでもなく、本来は実時間 MIMO 光受信器を用いたモード多重伝送の性能評価が必要不可欠である。

MIMO 等化を縮退 2 モード間結合のみに限定すれば、必要となる MIMO の回路規模が劇的に削減される。MIMO で補償できない異種直線偏波モードからの結合を可能な限り抑圧する必要があるが、モード間結合は隣接モードからが支配的であるために、回路規模に制限されることなくモード多重数と伝送容量のスケール則が成り立つ。このアプローチが弱結合モード多重方式である。オフライン信号処理を用いているものの、本グループから既に 80km 弱結合 10 モードファイバ伝送実験を報告している。

本研究では、実時間 MIMO 光受信器を試作し、それを用いて弱結合モード多重伝送性能を実時間評価することを目的とした。ここではモード多重数 10 が目標である。縮退 2 モード間結合を補償する MIMO 信号処理を FPGA で実装した。10 モード多重時でも安定した MIMO 等化適応制御が可能なようにトレーニング系列を用いることが可能な LMS (least mean square) アルゴリズムを採用した。この実時間 MIMO 回路とモード多重分離器およびコヒーレント光受信器 2 式を用いて、実時間 MIMO コヒーレント光受信器を試作し、波長分割多重(wavelength division multiplexed: WDM)10 モード多重・偏波多重(dual-polarization: DP) 四相位相シフトキーイング(quadrature phase shift keying: QPSK)光信号の 48km 弱結合 10 モードファイバ伝送実験を行った。

## 2. 研究開発内容及び成果

図 1 に試作した実時間 MIMO 光受信器の構成を示す。伝送後の 10 モード多重サブキャリア変調 DP-QPSK 光信号を 10 モード多重分離器で縮退 2 モードを多重分離し、2 つのコヒーレント光受信器で同時受信する。局所光の周波数を調整し、12GHz 帯域 18 サブキャリア変調光信号から 625 Mbaud サブキャリアひとつを多重分離・受信し、1.25GS/s アナログ・デジタル変換器(analog-to-digital convertor: ADC)を介して初段 FPGA(Xilinx VC707)へ転送する。雑音除去やトレーニング検出を行った後、後段

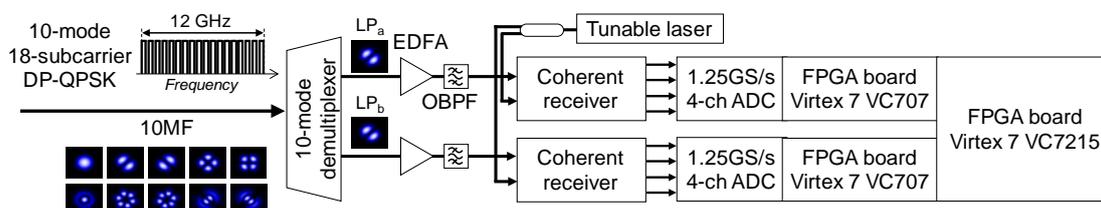


図 1 試作した実時間 MIMO 光受信器の構成。

FPGA(Xilinx VC7215)においてMIMO等化およびビット誤り率(bit error ratio: BER)測定を行い、測定結果を外部PCに転送する。

試作した実時間 MIMO 光受信器を用いて、WDM 10 モード多重 DP-QPSK 光信号の 48km 弱結合 10 モードファイバ伝送実験を行った。その実験系を図 2 に示す。波長可変光源からの連続光を光 IQ 変調器で変調し偏波多重することで、12GHz 帯域 18 サブキャリア DP-QPSK 光信号を得た。また、この信号からギャップ周波数が 500 MHz 程度となるように隣接 WDM チャンネルも発生させた。この 3 チャンネル WDM 光信号を 10 分岐し遅延を加えた後、10 モード多重器を用いてモード多重した。その 10 モード多重光信号を 48 km 10 モードファイバに伝送させ、試作した実時間 MIMO 光受信器で受信した。

単一波長伝送時の全モード・両偏波・全サブキャリア BER 測定結果を図 3(a)に示す。全モード・サブキャリアにおいて誤り訂正によってエラーフリーとなる  $2.7 \times 10^{-2}$  以下の BER が達成された。単一波長伝送および WDM 伝送における中心チャンネルの全モードの全サブキャリア平均 BER 測定結果を図 3(b)に示す。WDM 時でも誤り訂正可能な  $2.7 \times 10^{-2}$  以下の BER が達成された。オーバーヘッド 20% の誤り訂正符号を用いることを仮定すると、本実験では波長当たり 12.5GHz 帯域における伝送容量 375 Gbit/s が達成された。以上から、弱結合モード多重方式では、実時間 MIMO 回路規模に制限されず、伝送容量拡大が可能であることが示された。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

本研究の MIMO 実装では、キャリア位相補償器を分離することで、直交振幅変調 (quadrature amplitude modulation: QAM) 光信号への適用が容易な LMS アルゴリズムトレーニング等化の実装に成功した点が特徴である。従来位相雑音やオフセット周波数が大きなコヒーレント光受信器では LMS アルゴリズムを実装するのが困難と考えられていたため、これは大きなブレイクスルーであった。今後の光ファイバ伝送では QAM 方式が積極活用されることは疑いなく、その復調法として本研究の MIMO がスタンダードになる可能性を秘めている。

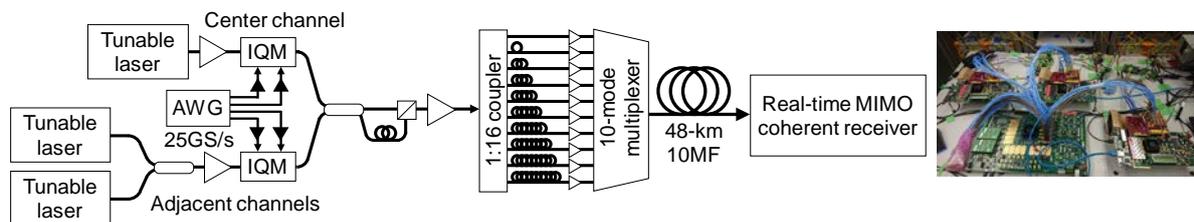


図 2 試作した実時間 MIMO 光受信器を用いた 3 チャンネル波長多重・10 モード多重 DP-QPSK 光信号の 48 km 弱結合 10 モードファイバ伝送実験。

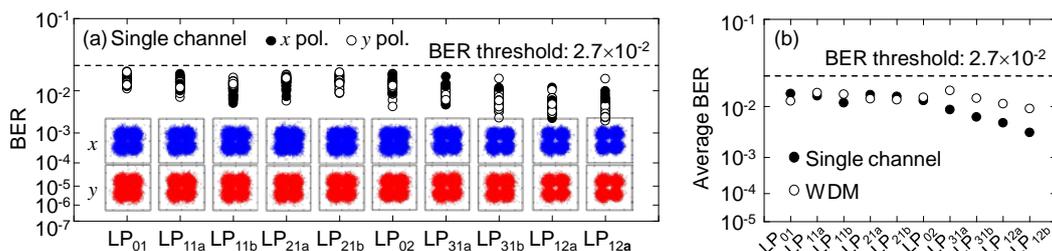


図 3 (a)単一波長伝送における全モード・両偏波・全サブキャリアの BER 測定結果。(b)単一波長および波長多重伝送における中央チャンネルの全サブキャリア平均 BER 測定結果。

実時間 MIMO 受信器は物理現象観測ツールともなりえる。瞬時に BER 性能を評価できることは、伝送中の物理現象をその場でチェックできることを意味する。実際、実時間 BER 測定を通じて、多モードファイバ非線形効果による信号歪みを観測できた。ここで開発した実時間 MIMO 光受信器は、多モードファイバ伝送における物理現象を実時間で観測し得るツールになる。

### 4. むすび

実時間 MIMO コヒーレント光受信器を試作し、3 チャンネル WDM・10 モード多重 DP-QPSK 光信号の実時間 10 モードファイバ伝送実験を行った。その結果、弱結合モード多重方式は MIMO 実装に極めて有効であり、実時間 MIMO 回路規模に制限されることなく伝送容量拡大が可能であることが示された。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] K. Igarashi, Y. Wakayama, D. Soma, T. Tsuritani, I. Morita, K. J. Park, J. Ko, and B. Y. Kim, "Low-loss and low-crosstalk all-fiber-based six-mode multiplexer and demultiplexer for mode-multiplexed QAM signals in C-band," OFC2018, Th1K.3 (2018 年 3 月 15 日)
- [2] S. Beppu, D. Soma, Y. Wakayama, S. Sumita, K. Igarashi, H. Takahashi, and T. Tsuritani, "Mode-dependent probabilistic shaping for highly-efficient weakly coupled 10-mode fiber transmission," OFC2019, M2H.2 (2019 年 3 月 4 日)
- [3] K. Igarashi, S. Beppu, M. Kikuta, T. Nagai, Y. Saito, D. Soma, and T. Tsuritani, "Real-time weakly-coupled mode division multiplexed transmission over 48 km 10 mode fibre," ECOC2019, W.2.A.3 (2019 年 9 月 25 日)

#### 【受賞リスト】

- [1] 西山智樹、2018 年度光通信システム研究会奨励賞、“コヒーレント受光における偏波多重パイロットトーンを用いたフィードバックフリー適応等化、” (2018 年 12 月 18 日)