

# 汎用 SMF のカットオフ波長以下を用いた 柔軟なユーザ容量制御モード分割多重 OFDM 方式 Flexible User-Capacity Control in Mode-Division Multiplexing OFDM System below Single-Mode Fiber Cutoff Wavelength

1245051 秋山 美穂 (光制御・ネットワーク研究室)  
(指導教員 岩下 克 教授)

## 1. 研究背景と目的

コロナウイルスの流行によりリモート講義やリモートワークを導入する学校や企業が急増し光アクセス系の伝送量は増大している。我々は無線通信技術のビームフォーミングをモード分割多重(MDM)に応用した大容量化を研究してきたが、光アクセス系にはシングルモードファイバ(SMF)が敷設されておりこのままでは適用できないため、汎用 SMF のカットオフ波長以下の短波長を使い多モードを導波することで汎用 SMF を用いた MDM 伝送を実現したい。光アクセス系に短波長の光源を敷設するコスト、波長による損失や分散による劣化が大きくなるといった課題がある。低コスト、高速変調可能という特徴を持った垂直共振器型面発光レーザー(VCSEL)を光源とし、複数のサブキャリアを使用する直交周波数分割多重(OFDM)を適用して損失と分散劣化を抑え、汎用 SMF を使用した MDM を実現する。またユーザのデータ量に対して OFDM のサブキャリアを柔軟に対応させることで伝送路の効率化を図る。

## 2. 原理

ステップ型光ファイバのモード分散を縦軸分散、横軸波長として図 1 に示す。カットオフ波長 1260nm 以下では多モードが導波されるため 850nm の光で LP<sub>01</sub> と LP<sub>11</sub> と 2 つのモードを導波し MDM 伝送を行う。1.44ns/km の分散が生じるため伝送帯域は 230MHz に制限される。

OFDM 信号を用いた MDM 伝送の原理と制御を図 2 の送受信 2×2、OFDM 信号のサブキャリア 12 の系で説明する。OFDM 変調とは複数のサブキャリアを直交する周波数に置き周波数帯域の一部を重なり合わせ、高密度な周波数分割を行う手法である。周波数領域で送信する複素数信号  $\mathbf{d} = (d_1, d_2)$  を作成し  $\mathbf{d}_1 = (d_{1,1}, \dots, d_{1,12})$  のようにサブキャリア数に分割する ( $d_2$  も同様)。MDM では伝送路のモード干渉により受信部で送信信号が分離されないため、伝送路の伝搬行列  $\mathbf{H}_{SMF}$  の逆行列を重み行列  $\mathbf{W}$  として受信又は送信信号にかけて系全体のチャネル行列  $\mathbf{H} (= \mathbf{H}_{SMF} \cdot \mathbf{W})$  の非対角成分を 0 にする分離処理が必要である。 $\mathbf{H}_{SMF}$  はサブキャリアごとに異なり  $\mathbf{H}_{SMF} = (\mathbf{H}_{SMF1}, \dots, \mathbf{H}_{SMF12})$  を持つ。 $\mathbf{W}, \mathbf{H}$  も同様である。周波数領域の信号  $\mathbf{d}$  に対してサブキャリアごとに  $\mathbf{W}$  をかけた信号  $\mathbf{x} = (x_{1,1}, \dots, x_{2,12})$  を逆高速フーリエ変換(IFFT)により時間領域の OFDM に変調し光変調して伝送する。受信信号はサブキャリア毎に分離されており、高速フーリエ変換(FFT)により OFDM 信号を周波数領域に復調した信号  $\mathbf{y} = (y_{1,1}, \dots, y_{2,12})$  から  $\mathbf{d}$  を得られる。信号  $\mathbf{d}$  としてトレーニングパターン  $\mathbf{s} = (s_{1,1}, \dots, s_{2,12})$  を送り受信側で  $\mathbf{H}_n = \mathbf{y}_n \cdot \mathbf{s}_n^{-1}$  を計算し ( $n=1\sim 12$ )、 $\mathbf{H}$  を送信側へフィードバックして  $\mathbf{H}_{SMFn} = \mathbf{H}_n \cdot \mathbf{W}_n^{-1}$  を計算して  $\mathbf{H}_{SMF}$  を求める。

## 3. 実験構成

本実験の目的は汎用 SMF に光源として VCSEL を用い、MDM と OFDM による大容量化と OFDM 信号のサブキャリア制御によるユーザ容量制御である。OFDM 信号のサブキャリア 1~6 を 153.6~537.6MHz (図 2①) とサブキャリア 7~12 を 691.2~1075.2MHz (図 2②) に間隔 76.8MHz で置く。OFDM 信号を DAC(1228.8GSa/s)から出力し、2つの光源(VCSEL: 波長 852.23nm, 854.83nm)で直接強度変調する。低電力で動作する VCSEL を光源に使用する。光カプラで合波し汎用 SMF で 1km 伝送する。カプラで分岐し光受信器で受信し、AD 変換(10GSa/s)した。受信信号を DAC と同じサンプルレートに変換し、トレーニングパターンによりシンボルの同期を取って復調する。伝送量は 3.6864Gbps である。

## 4. 結果

汎用 SMF 1km に 852.23nm の光を入射したときの出射光をカメラで撮影すると図 1 のように LP<sub>01</sub> と LP<sub>11</sub> のモードが確認できた。

図 3 に全サブキャリアのチャネル行列の平均値と  $y_{1,1}\sim y_{1,12}$  のコンスタレーションを重ねた  $y_1(y_2$  も同様)を示す。フィードバック後  $\mathbf{H}$  の非対角成分が対角成分に比べ約 20dB 小さくなり、コンスタレーションからも信号の分離を確認した。 $\mathbf{d}_1$  を QPSK 変調、 $\mathbf{d}_2$  を BPSK 変調しサブキャリア 7~12 では受信ポートを変更するために  $\mathbf{W}$  の列を入れ替える制御を行った結果、図 4 に示すとおり  $\mathbf{H}$  の対角成分と非対角成分の大きさが入れ替わり受信ポートを変更することができた。 $\mathbf{d}_2$  ではサブキャリア 1~6 のみを使用すると、図 5 に示すチャネル行列はサブキャリア 7~12 において  $h_{11}$  のみが高くなっており、片方の受信ポートにのみ信号を送れていることが確認できた。

## 5. まとめ

SMF のカットオフ波長以下の光を用いたモード分割多重 OFDM 方式を実現できた。サブキャリアごとの受信ポートの制御により、受信ポートごとに伝送量を変更できることを示した。

## 参考文献

- [1] 秋山美穂,他, ” OFDM 信号のモードフォーミングネットワークへの適用”, 令和二年電気関係学会四国支部連合大会, 12-15,2020
- [2] M.Akiyama, et al, 2021 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), USA, Th1A.2, June 06-10, 2021

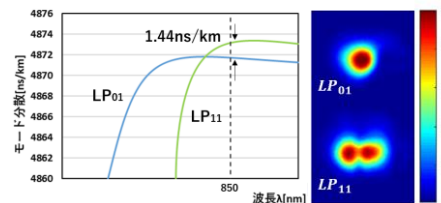


図 1 ステップ型光ファイバに導波されるモード

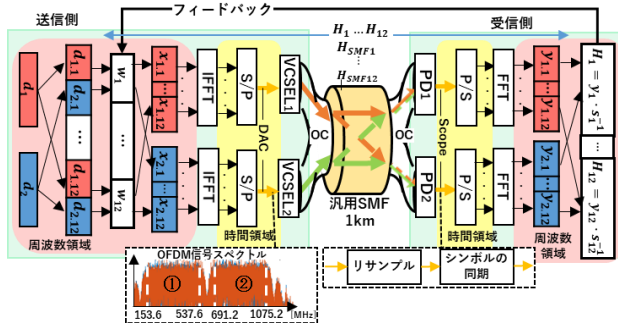


図 2 モード分割多重 OFDM 方式の構成

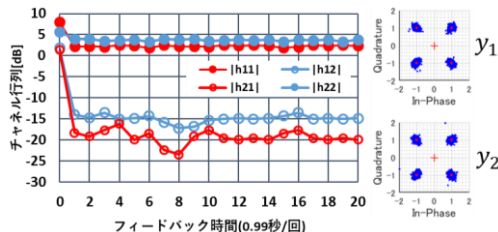


図 3 チャネル行列とコンスタレーション

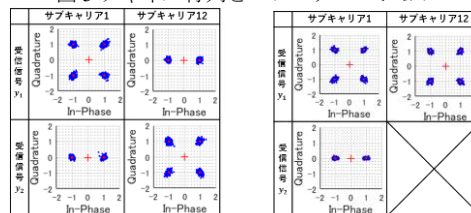


図 4 サブキャリアユーザ選択

図 5 ユーザ容量制御