

特別賞

マルチコアファイバと光周波数コムを用いた 超大容量伝送システムの研究開発

～未来の光通信のために～

国立研究開発法人 情報通信研究機構

ベンジャミン・パットナム ルーベン・ルイス
クラウス・ヴェルナー 坂口 淳
デルガド・メンディニューエッタ・ホセ・マニユエル
淡路 祥成 和田 尚也

1. 序論 ～情報通信の未来をうかがう～

私の母国、英国では日本に比べて加入者系への光ファイバ通信の普及率はかなり低く、ネットワークの逼迫も緩やかである。一方、日本では良質なブロードバンドサービスが提供され、インターネットトラフィックも急激に増加している。技術の時間軸で日本は先行しており、思い描く未来もまた何年か進んでいる。ここ数年、光ファイバ通信研究の最前線で懸案となっている容量危機(図1)について日本が最も身近であり、それ故、先端研究においてもリーディングエッジに立っている。

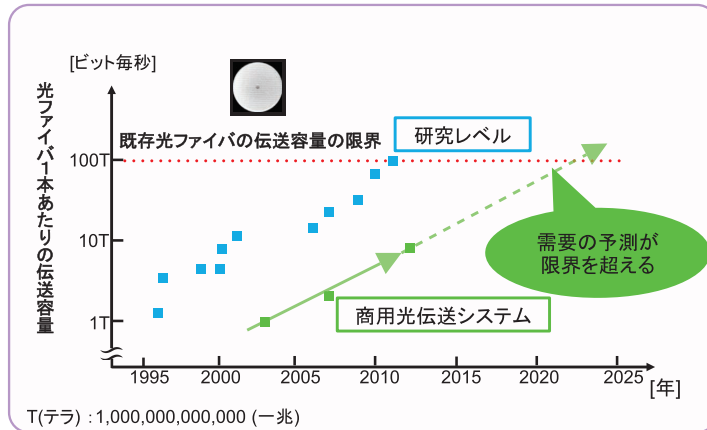


図1 将来の容量限界の見通し

既存の標準型単一モードファイバ (SSMF) は125ミクロンのクラッドの中央に9ミクロンのコアを配置した構造であり、無線に比べて遥かに遠方まで低損失で信号を搬送できる。光搬送波の帯域は電波の数10倍であり、いわば、人類が手にした超低損失・超長距離・大容量のコミュニケーション手段である。そのSSMFの実用化が高速データ通信の普及・発展を加速したといえる。では、既に実用化したSSMFによる通信インフラで、ユーザは将来も満足だろうか？ 遠隔医療診断や非圧縮・高精細の臨場感あふれるリアルタイム動画など、可能性だけでとどまっているいわゆるリッチコンテンツを今後十分に収容する可能だろうか？

情報は質量を持たないが故に遠方への伝達性に優れるが、巨大な情報は実は物理限界の障壁に阻まれることを研究者は認識し始めている。SSMFの容量限界は約100テラビット毎秒と推定されており、2020～2025年には商用光伝送システムの需要がその限界を超えると予測されている。このSSMFの容量限界が光ファイバネットワークの容量危機をもたらすものと考えられている。SSMFの容量限界は9ミクロンのコアに集中する光のパワー密度によって生じる。SSMFの材料であるガラスが持つわずかな三次の非線形効果が、極度の光パワーの集中によって顕著になり周波数利用効率に上限が出来るからである[1](図2)。

有効な回避策は光パワーの集中を抑制することにある。もっともシンプルな方法は複数の光ファイバを敷設することであるが、これは既に実用化されていて、ファイバケーブルの中には複数の光ファイバが収容されている。さらにファイバケーブルを増設するためには、そ

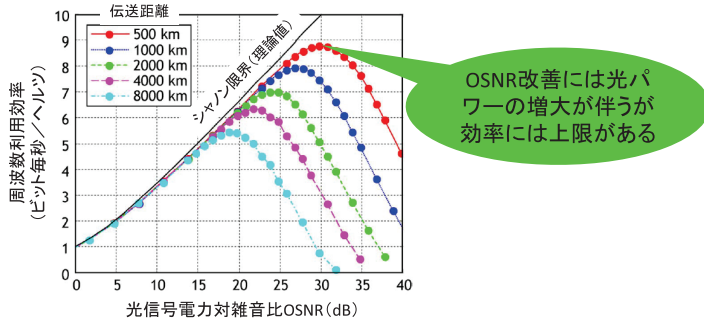


図2 SSMF の容量限界をもたらす非線形効果

の都度莫大なコストがかかるため、いずれ飽和する。しかし、新しい技術を導入し、1本の光ファイバが占有する空間を共有・分割することで、飛躍的に伝送能力を高めることが可能である。たとえば、同じクラッド内に複数のコアを配置するマルチコアファイバ (MCF: Multi-core fiber) や、コア径を拡大してパワー集中を緩和しつつ複数の横モードを利用するマルチモード技術、さらにそれらを組み合わせたマルチモード MCF は数百～数千倍の容量拡大が見込まれる未来技術である。これらを総称して空間分割多重 (SDM: Space division multiplexing) という。本論文では、SDM 伝送技術の極限を追求し、3年ぶりに世界記録を大幅に更新した2ペタビット每秒 MCF 伝送[2]の最新の成果について報告する。

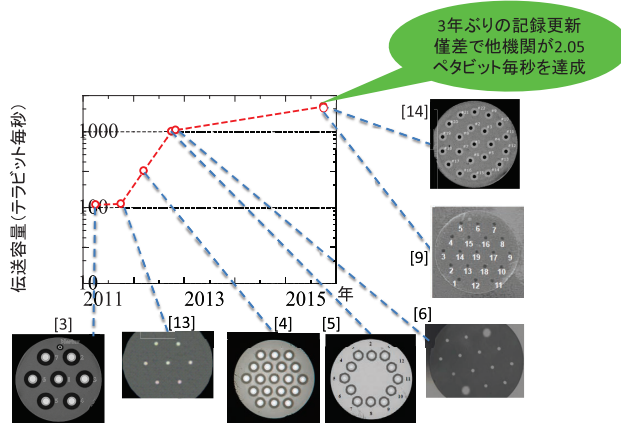


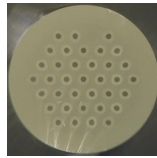
図3 MCF 伝送技術の進展

2. 研究背景

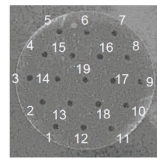
2011年に最初の MCF 大容量伝送が行われた(図3)。7コア MCF を用いて、SSMF の限界と思われていた100テラビット每秒を突破したのである [3]。その後、19コア 300テラビット每秒 [4] などに続いて、2012年には早くも1ペタビット每秒の記録が樹立された。これは、日本の研究グループ (12コア) [5] と北米の研究グループ (12コア+3モード2コア) [6] から相次いで報告され、国際的に激しい競争が行われたことを意味している。その後、研究領域の

すそ野が広がり、様々な関連技術の活発な研究開発が行われたが、ファイバ1本あたりの伝送容量という意味では停滞期に入る。理由は、SSMFの容量限界が100テラビット毎秒であったことと同種で、単一モードのコア構造では1コアあたり100テラビット毎秒を超えることは非常に困難であり、コア数を大幅に増加、或いはマルチモードを導入しなければ抜本的な容量拡大は見込めない。しかし、コア数を増やすことはファイバの太さを増すことに直結し、その結果機械的強度が低下するため、実用的なMCFの最適条件が再検討されることとなり、容量拡大競争には一旦終止符が打たれた。

MCFの限界は1ペタビット毎秒なのかどうか？これが、世界中の研究者がこぞって取り組んでいた次なる課題であった。方向性は大きく分けて3つあり、1)MCFのコア数を抜本的に拡大するための最適化製造技術、2)コアを拡大したマルチモードファイバで多数のモードを使って容量を拡大する、3)少数のマルチモードを収容した複数コアを持つ、マルチモードMCF(図4)である。



[8] 36コア × 3モード = 108空間チャンネル



[9] 19コア × 6モード = 114空間チャンネル

図4 マルチモードマルチコアファイバの例

2)のマルチモードの規模拡大は、多数の横モードを分離するためのデジタル信号処理(DSP: Digital signal processing)が大規模・複雑化するため、実装が非常に困難であり、伝送能力としても2012年当時でわずか57テラビット毎秒でしかなかった[7]。

3)のマルチモードMCF[8-9]はDSPの規模は抑制されるが、非常にデリケートなファイバであるため、製造・取扱いが難しい。

従って、我々は1)のコア数拡大をめざし、段階的な到達目標として総容量2倍の2ペタビット毎秒を達成するために、独自に最適化設計した22コアファイバを横浜国立大学、住友電気工業株式会社と共同で開発した。

また、1コアあたりの伝送容量を100テラビット毎秒に近づけるためには、通常、2つの波長帯(Cバンド:1530~1565nm;Lバンド:1565~1625nm)を可能な限り広帯域で利用し波長多重(WDM)信号を生成すると共に、それぞれの波長チャンネルにコヒーレント変調を行うことで周波数利用効率をあげる必要がある。データ伝送に使用可能な波長範囲は主としてレーザー光源の発振範囲と、光増幅器の増幅範囲によって決まるため、多数のレーザー装置と広帯域の光増幅器の両方がキーデバイスとなる。さらにコヒーレント変調の周波数利用効率をあげるためにはレーザー光源のスペクトル線幅やOSNR(光信号雑音比)を高めなければならない。これらの技術課題を解決するために、これまでに実用化されていない光通信波長帯および高速データ通信に特化した光周波数コム

を UC サンディエゴ校、Ram photonics(北米)、住友電工株式会社と共同で開発した。

3. 実験システムと伝送実験結果

2ペタビット毎秒の伝送容量を実現するための実験システムについて説明する。今回の実験では最適化設計により従来よりコア数を増やした22コア MCF、および C+L バンド光周波数コムがイノベーションである。

(1) 22コア単一モード MCF

本システムの設計段階では、全ての要求を満たす理想的なファイバはまだ実現されておらず、MCF の極限を追求する研究は幾つかの方向性に分岐していた。たとえば、単純にコア数を増やすだけであれば、近接するコアの伝搬特性を意図的に変えることで、コア間結合を減らしコア間の信号干渉を大幅に低減することが知られているが[10]、収容するコアの種類が2種類になるだけで製造性が著しく低下し、結果として長尺のファイバを作成することが困難になる。本研究では、長距離・大容量伝送の原点に回帰し、数10km 以上のスパンとコア数20以上を目指した。

基本的な配置は、これまで我々が19コア MCFなどで採用した中心コア、内周コア、外周コアの三層構造であるが(図5)、19コアでは2ペタビット毎秒の達成は見込めないため、コア数を20以上に増やす再設計を行った。この際、問題になるのはコア間の信号干渉を抑制しつつファイバの直径を如何に小さく保つかという点である。幾何的に相似性の高い配置はコア間結合を強くしてしまうことが知られており、コア間の間隔や各層間の間隔、および各層の回転方向の配置などのパラメータを独自の手法で最適化した結果、図に断面を示すような22コア配置を得た。当初、21コア配置の基礎検討からスタートした設計であったが、結果的に22コアとしたことで、ファイバの最適化設計が、後述の伝送容量の拡大にうまく貢献している。

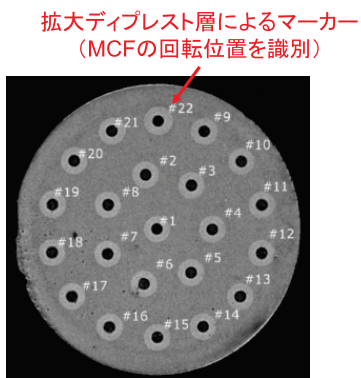


図5 22コア MCF

MCF の光学的特性 (波長 1550nm で評価)			
	中心コア	内周コア 平均	外周コア 平均
ファイバ損失 (dB/km)	0.19	0.20	0.21
融着損失 (dB)	0.1	0.4	1
入出力結合器 損失 (dB)	0.95	0.85	0.95
実効断面積 (μm^2)	75	76	75
カットオフ波長 (μm)	<1.48	<1.47	<1.45

表1 22コア MCF の特性

全てのコアは同種の伝搬特性を持ち、内周には7コア、外周には14コアを配置している。コア間隔は41 ミクロンと48 ミクロンが混在し、効果的にコア間結合を抑制している。クラッ

ド径は260ミクロンであり、技術候補として競合するマルチモード MCF に比べて33%小さい。コア径は11ミクロン、コア周囲に直径24ミクロンの干渉低減のためのディプレスト層を設けた。MCFの製造時には主に融着接続などの際に各コアの相対位置を識別するためのマーカーが必要であるが、本ファイバでは一般的な独立したマーカーではなく一つのコアのディプレスト層を大きくしてマーカーに代えた。製造した22コア MCF は5つのボビンを互いに融着接続し、総長31km が得られた。融着接続時には各ボビンの製造誤差などによって、接続損失を生じるため、4か所の融着接続点を持つこの MCF は実際の敷設状況に近い条件となっている。MCF 入出力デバイスを含めた挿入損失は中央コアで8.4dB であり、外周コアほど製造誤差によってコア配置のばらつきが大きいいため、最大損失は13.3dB であった。しかしながら、融着接続した MCF スパンの平均伝搬損失は0.21/km と商用のSSMF と比べても遜色なく、長距離伝送に十分使用可能である。コア間のクロストークは測定対象以外の全コアからのクロストークの合算で評価するが、最悪値でも-45dB/km と十分に小さい。なお、レーザ光源や変調器・増幅器など多くの装置はSSMFの入出力ポートを持っており、実験システムはすべてがMCFではなくSSMFが混在しているため、伝送ファイバのMCFとSSMFを結合するMCF入出力デバイスが必要である。本実験ではフェムト秒レーザで導波路加工された3D導波路デバイスを採用した。表1に伝送ファイバの主要特性を示す。

(2) 広帯域 C+L バンド光周波数コム

光データ信号を生成する搬送波には高速・高密度データ変調にあわせてカスタマイズした光周波数コムを用いた(図6)。中心波長1559nm、スペクトル線幅5kHzのシード光は25GHzの低雑音RF発振器によって位相変調され、25GHz間隔の側帯波を付加される。この光は波長分散を最適化された非線形ファイバミキサによってスペクトル拡大され、C+Lバンド1510~1620nmに渡って550ラインの波長チャネルからなる光周波数コムを生成する。生成時に生じた20dBの強度ばらつきは、非線形パラメトリックミキサによって低減される[11]が、本実験ではさらにスペクトル平坦化の光プロセッサを併用した。出力は29dBm(1ライン辺り約1dBm)が得られ、OSNRは1535nmで45dB以上、1554nmでは47dBであった。

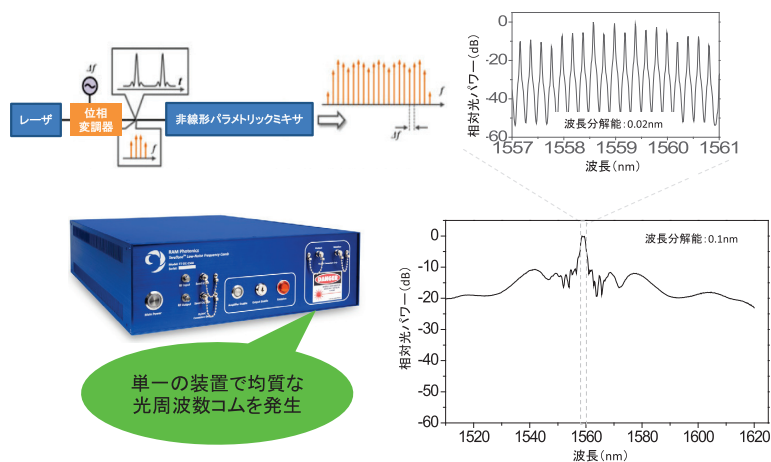


図6 開発した光周波数コム装置

各波長チャンネルのスペクトル線幅はシード光に近いほど細くなるが、ばらつきは5~15kHzと比較的小さく、高品質なコヒーレント変調を行うために十分な細さを実現している。また、光周波数コムシステム全体は、閉ループ制御回路によって数週間に渡る安定動作を実現している。

今後、コヒーレント変調方式が主流となっていくためには、スペクトル線幅や OSNR に優れた光源を波長チャンネルごとに用意しなければならないが、それぞれ個別のレーザ装置を実装するのは大きなコスト負担であり、単一の装置で一括して高品質な光搬送波を生成する光周波数コムは、次世代の大容量通信を実現するための要となる。

(3) 伝送実験システム(図7)

このような多数の波長チャンネルをもつ伝送システムの評価を行う際に、一つ一つの波長に個別の伝送装置を用意するのは非現実的である。このような場合、被測定波長チャンネルごとに波長を切り替えて高い OSNR で逐一測定評価を行い、その他の波長チャンネルはクロストーク評価などのためにダミー信号を充填することで実質的な性能評価を行うことが一般化している。本実験では、被測定波長を5チャンネル分まとめて生成する送信機を設計した。光周波数コムは二分割され、被測定波長チャンネルとダミーチャンネルに振り分けられる。被測定波長チャンネルは550ラインから波長可変バンドパスフィルタで5波長を抜きだし、中心波長に応じて適切なCバンドかLバンドの光増幅器によって増幅される。これらの光増幅器はそれぞれ40nm、50nmの増幅帯域を持ち、全域にわたって平坦な増幅特性を実現している。本実験ではCバンドとLバンドの間のガードバンドは25GHz間隔グリッドで三波長チャンネル相当であり、光増幅器への入力時にC、Lバンドの分離にはWDMカプラを用いた。被測定波長チャンネルは25dBmに増幅された後に、CバンドかLバンドの波長インターリーバによって一つ置きに間引きされる。これは同一のデータ信号をクロストークが最も懸念される隣接波長チャンネルに収容しては適正な評価ができないからであり、それぞれ偶奇チャンネルに振り分けられた50GHz間隔の波長群は別々の変調器でデータ信号を印加された後に再合波され、光増幅器によって増幅される。データ変調はQAM信号を生成可能な光変調器と、14GHzのアナログ帯域、49Gシンボル毎秒の任意波形発生器4台で行われ、24.5Gbaudの偏波多重64QAM信号を生成する。信号波形はロールオフ0.01のルートレイズドコサインである。一方、二分割された光周波数コムに残りの信号は一台の光変調器で変調された後に、Cバンド、Lバンドそれぞれ別に増幅され再合波される。

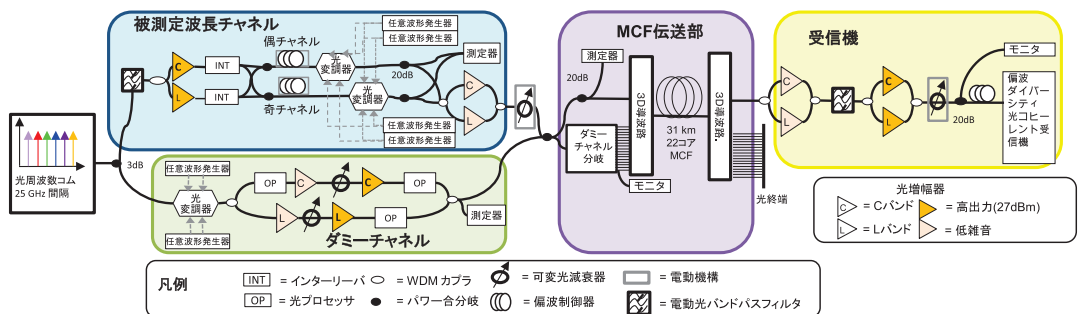


図7 伝送実験システム

WDM 伝送ではスペクトルの平坦性が重要であるため、二段階の光増幅器や液晶型光プロセッサ(OP)で精密に制御している。OP は被測定波長に対応する波長のダミー信号をブロックするノッチフィルタとしても機能する。

次に、WDM 信号は二分割され、一方は被測定コアに入射し、もう一方は増幅後に21分岐して残りのコアへ入射する。コアごとの入力パワーは15dBmの時に、最良の伝送特性が得られた。22コア MCF を伝搬後、透過帯域幅1.2nm の波長可変バンドパスフィルタで被測定波長の中心三波長を抜き出して伝送信号の品質測定を行った。

受信装置は偏波ダイバーシティ光コヒーレント受信機でスペクトル線幅100kHz の局発レーザー光を併用した。32GHz アナログ帯域、80G シンボル毎秒のデジタルサンプリングオシロスコープでデータを蓄積し、MATLAB と C 言語にて実装されたデジタル信号処理アルゴリズムでオフライン評価を行った。ビット誤り率測定は1マイクロ秒のトレース、880,000ビットに対して行った。

ビット誤り率測定結果を図8に示す。それぞれ最良値、最悪値および平均値をプロットしてある。測定を行った402波長チャンネルの内、エラー率が軟判定誤り訂正符号の許容閾値である 2.7×10^{-2} 以下に収まったのは399チャンネルであった。伝送した総データ量は2.58ペタビット毎秒であるが、誤り訂正符号の20%オーバーヘッドを差し引き、純粋なペイロードとしては2.15ペタビット毎秒のデータ伝送能力を示したことになる。

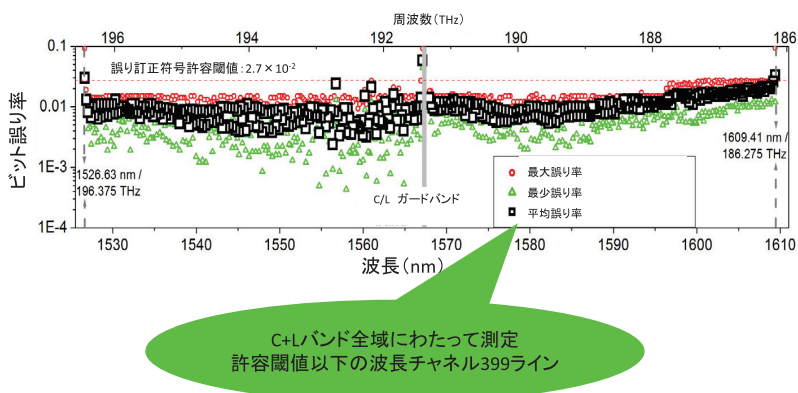


図8 ビット誤り率評価

実は、22コア MCF の各コアは WDM 信号全域にわたって均質な特性では無い(図9)。CバンドとLバンドの代表的な波長チャンネルで比較すると、コア間クロストークは波長が長くなるにつれて増大する。特に大きなクロストーク源は同じ層の隣接コアであり、総クロストークの殆どを占めている。これは、例えば隣接コアをそれぞれ対向する方向の伝送路として用いる双方向伝送方式が伝送距離延伸に有効であることを示唆する。既出の双方向通信では相似性の高いコア配置でのクロストーク低減のため提案されたが[12]、22コア MCF のように相似性を意図的に崩したコア配置では、同一層内の隣接コアとの配置のみを考慮すれば実質的に高いクロストーク低減効果が得られるため、システムデザインの柔軟性がより高いと言える。

また、コアの伝送損失・伝搬特性にもばらつきは生じる。今回の伝送実験では全ての波長

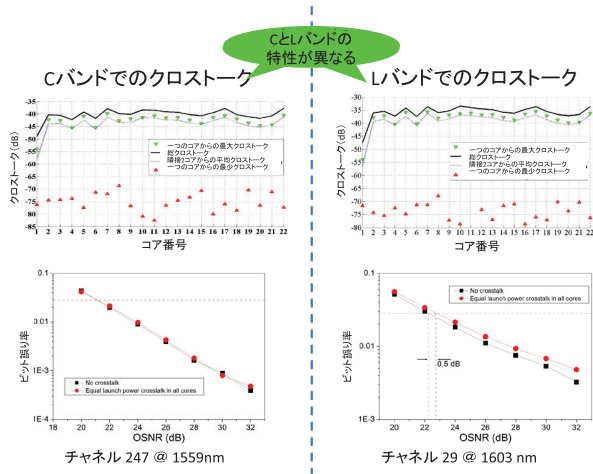


図9 CバンドとLバンドのクロストーク比較

チャンネル、全てのコアに同一の誤り訂正符号を仮定して、それに相当するオーバーヘッド分だけ伝送可能なペイロード容量を差し引いて2.15ペタビット毎秒という数値を得たが、誤り訂正符号は最悪のチャンネルにあわせて設定しているため、より良好な品質のチャンネルでは過剰にオーバーヘッドを設定していると言える。実際のシステムでは個々の波長チャンネルごとに送受信器が独立しているため、最適な誤り訂正符号を用いることで、より伝送容量を拡大することが可能であるし、各コアに伝送する同じ波長チャンネル同士を関連付ける空間符号化を用いることで空間スーパーチャンネルを形成してコア間のばらつきを平均化し、OSNRに対する要求を緩和して伝送距離を延伸することも可能である。図10は空間スーパーチャンネルを形成する光符号化によるOSNR要求の緩和を示す。個別のチャンネルごとに受信機端で行う従来の誤り訂正に加えて、空間スーパーチャンネルを用いることでMCFの平均的な伝送損失を向上させることが可能である。これは製造誤差などの問題により懸念されるMCF製造の歩留りに対する対応策の一つであり、SDM通信システムの実用化に向けた有力な取り組みである。

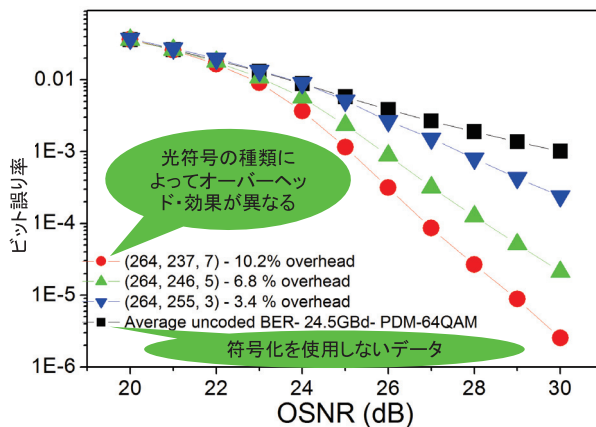


図10 空間光符号化の効果

4. まとめと今後の展望

本研究では、次世代の光通信インフラの空間的な高密度化により、増大する通信トラヒックに対応する能力を飛躍的に高めるための独自に最適化設計した22コア単一モードMCFや、コヒーレント変調方式の高度化を支える高速・高密度データ変調にあわせてカスタマイズした光周波数コムを用いた、超大容量ファイバ伝送を実現した。従来の1ペタビット毎秒を二倍以上更新した2.15ペタビット毎秒の世界記録を達成した。本記録はSDM研究の終着点ではないが、着実に進歩するための重要なマイルストーンである。

既存の光ファイバは研究開始から商用導入まで約15年を要している。この新しい光ファイバを実用化するのが本格的なMCF大容量実験開始の2010年から15年後の2025年だとすると、それは現在のインターネットトラヒックの増加を外挿して既存の光通信インフラが飽和する可能性が高まる時代にちょうど当たる。つまり今まさに、容量危機がくる未来を見通して、次世代の光通信インフラの着実な研究開発が重要である。

それは採算も含めて今すぐに決断するというのではない。光通信インフラは一旦敷設してしまえば数10年使い続けるものであり、未来にとりえる選択肢を技術的に可能としておく、我々の子孫への投資である。

引用文献

- [1] René-Jean Essiambre, Gerhard Kramer, Peter J. Winzer, Gerard J. Foschini, and Bernhard Goebel, "Capacity Limits of Optical Fiber Networks," *J. Lightwave Technol.* 28, 662-701 (2010)
- [2] B. J. Puttnam, R. S. Luís, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. Delgado Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, and J. Marciante, "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," *ECOC2015, PDP3.1.*
- [3] J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "109-Tb/s (7x97x172-Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber," *OFC2011, PDPB6.*
- [4] 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 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," *OFC2012, PDP5C.1.*
- [5] H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshihara, and T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency," *ECOC2012, Th.3.C.1.*
- [6] D. Qian, E. Ip, M. Huang, M. Li, A. Dogariu, S. Zhang, Y. Shao, Y. Huang, Y. Zhang, X. Cheng, Y. Tian, P. Ji, A. Collier, Y. Geng, J. Linares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, and T. Wang, "1.05Pb/s Transmission with 109b/s/Hz Spectral Efficiency using Hybrid Single- and Few-Mode Cores," *Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII, FW6C.3.*
- [7] V.A.J.M. Sleiffer, Y. Jung, V. Veljanovski, R.G.H. van Uden, M. Kuschnerov, H. Chen, B. Inan,

- L. Grüner Nielsen, Y. Sun, D.J. Richardson, S.U. Alam, F. Poletti, J.K. Sahu, A. Dhar, A.M.J. Koonen, B. Corbett, R. Winfield, A.D. Ellis, and H. de Waardt, "73.7 Tb/s (96 x 3 x 256-Gb/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM- 光增幅器," *Opt. Express* 20, B428-B438 (2012)
- [8] J. Sakaguchi, W. Klaus, J. M. Delgado Mendiñeta, B. J. Puttnam, R. S. Luis, Y. Awaji, N. Wada, T. Hayashi, T. Nakanishi, T. Watanabe, Y. Kokubun, T. Takahata, and T. Kobayashi, "Realizing a 36-core, 3-mode Fiber with 108 Spatial Channels," *OFC2015*, Th5C.2.
- [9] K. Igarashi, D. Souma, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "114 Space-Division-Multiplexed Transmission over 9.8-km Weakly-Coupled-6-Mode Uncoupled-19-Core Fibers," *OFC2015*, Th5C.4.
- [10] Y. Amma, Y. Sasaki, K. Takenaga, S. Matsuo, J. Tu, K. Saitoh, M. Koshiha, T. Morioka, and Y. Miyamoto, "High-density Multicore Fiber with Heterogeneous Core Arrangement," *OFC2015*, Th4C.4.
- [11] Vahid Ataie, Evgeny Myslivets, Bill P.-P. Kuo, Nikola Alic, and Stojan Radic, "Spectrally Equalized Frequency Comb Generation in Multistage Parametric Mixer With Nonlinear Pulse Shaping," *J. Lightwave Technol.* 32, 840-846 (2014)
- [12] Akihiko Sano, Hidehiko Takara, Takayuki Kobayashi, and Yutaka Miyamoto, "Crosstalk-Managed High Capacity Long Haul Multicore Fiber Transmission With Propagation-Direction Interleaving," *J. Lightwave Technol.* 32, 2771-2779 (2014)
- [13] B. Zhu, T.F. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. F. Yan, J. M. Fini, E. M. Monberg, and F. V. Dimarcello, "112-Tb/s Space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8-km seven-core fiber," *Opt. Express* 19, 16665-16671 (2011)
- [14] D. Soma, K. Igarashi, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "2.05 peta-bit/s super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band," *ECOC2015*, PDP.3.2.