

100Gbit/s を超えるラインレート

ジェフ・ヘクト

スーパーチャネルは、今では標準シングルモードファイバで数百Gbit/sの長距離伝送を可能にしている。ラージモードエリア(LMA)ファイバは、スーパーチャネルをさらに遠くへ、高速に伝送し、新しいマルチコアファイバ(MCF)およびフューモードファイバ(FMF)は将来の進歩を約束している。

100Gbit/sコヒーレント伝送は世界のファイババックボーンネットワークで標準になっており、今後さらに容量が増える。数百Gbit/sで動作するシステムがいくつかあり、傑出した実験では数十の独立したパスで光を伝送できる個々の開発ファイバで1ペタビット(10^{15} bits/s)を超えている。それは、1990年代の爆発的な成長を想起させる。

しかし今日の状況はもっと複雑だ。それは技術が3つの領域で進展しているため、ステップインデックス「標準」シングルモードファイバをベースにした現行システム、ラージモードエリア

ファイバを利用する新システム、新しいファイバタイプで空間分割多重の開発がある。

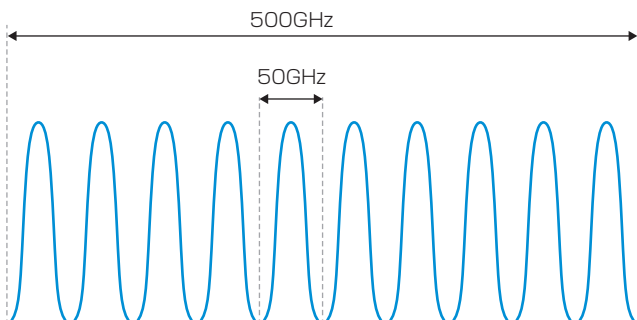
コヒーレント伝送とデジタル信号処理は、1980年代から使用されている9 μ mコアのシングルモードファイバを最大限利用している。バブル期に敷設されたダークファイバは、北米やヨーロッパルートで広く利用可能なまま残っている。今日の長距離コヒーレントシステムは、そうしたファイバで100近い50GHz光チャンネルで100Gbit/s信号を伝送でき、トータルでファイバペア当たり10Tbit/sになる。また新技術により容量はさら

に増える可能性がある。

ラージモードエリアファイバは、新規の海底および陸上ケーブルで好まれる。その低非線形性により、より長い距離で伝送できるデータレートはもっと高くなる。

長期的には、開発者は新しいファイバタイプに取り組んでいる。新タイプのファイバは、ファイバ内の独立したコアおよびフューモードコア内の独立したモードを使用する空間分割多重により容量を増やすことができる。潜在的なアプリケーションには長距離伝送および、サーバファーム内からメトロ分配ネットワークまでの短い距離が含まれる。

(a) シングルチャンネル
500GHzスロットで10個の100Gbit/sチャンネルを利用する場合



(b) スーパーチャネルバッファなし
375GHzの範囲で10個のレーザを用いる場合

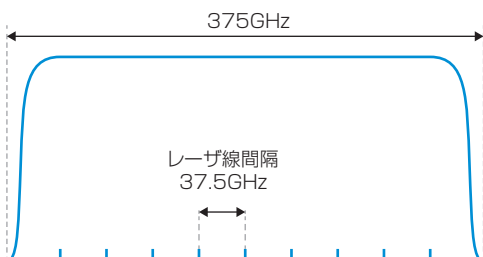


図1 50GHzスロットで10個の100Gbit/sチャンネルを利用する1Tbit/s伝送(a)と、375GHzの範囲で37.5GHz間隔で10個のレーザを用いる1Tbit/sスーパーチャネルの比較。スーパーチャネルは、従来の50GHzチャンネル間にあるバッファレイヤなしでバンドを広げる。

標準シングルモードファイバの限界

今日の10Tbit/s容量は、1980年代半ばに標準シングルモードファイバが400Mbit/sの伝送を始めてから25000倍の容量増となる。コヒーレントトランスミッタとともに100Gbit/sの倍数単位で「スーパーチャネル」を形成すると、容量はさらに30%増やせる。この技術は、複数のレーザ送信器からの信号を結合することであり、従来50GHzでチャンネルを分離しているバッファゾーンを除去することになる(図1)。

実証済みの単チャンネルデータレートはテラビットレベルを超えている。2014年、インフィネラ社(Infinera)は、ハンガリーのブダペストとスロバキア共和国のブラティスラバ間の敷設ファ

イバループで、1Tbit/sスーパーチャネル信号を500km伝送した。1個のフォトニック集積回路(PIC)は10個のレーザ光源を収容していた。プロトタイプ1Tbit/sラインカードは偏波多重四位相変位変調(DP-QPSK)を用いるとさらに長い距離をカバーできると同社のジェフ・ベネット氏(Geoff Bennett)は言う。現在の生産レベル500Gbit/sラインカードを用いてインフィネラ社とフェイスブック社(Facebook)は、再生なしで4000kmを伝送した。ベネット氏は、その成果は、第2世代コヒレントシステムで信号処理をトランスミッタとレシーバの間で分離したことによるものであると語っている。

しかし、標準シングルモードファイバは、エラーフリー伝送能力ではシャノン限界の非線形バージョンへ近づきつつある⁽¹⁾。ノイズが従来のシャノン限界を強いる。そのため、信号対ノイズ比(SNR)増やすためには、もっと高い出力を生み出す複雑なコーディング方式によって線形媒体の容量を増やす。しかし、光ファイバは非線形媒体であるので、複雑なコーディングからの余分なパワーは、非線形ノイズを生む。これは、SNRを低下させ、したがって伝送効率に、一段と厳しい制限を課することになる。通常は帯域のHzあたりの信号のビット/秒で計測される(図2)。

ラージモードエリアファイバでデータ容量が増加

ラージモードエリアファイバは、より大きな領域に信号を広げ、パワー密度と非線形ノイズを減らす。これによって伝送容量と距離が拡大されるので、ソリッドコア・ラージモードファイバは、新規の長距離陸上および海底ケーブルで標準になっている。コーニング社と

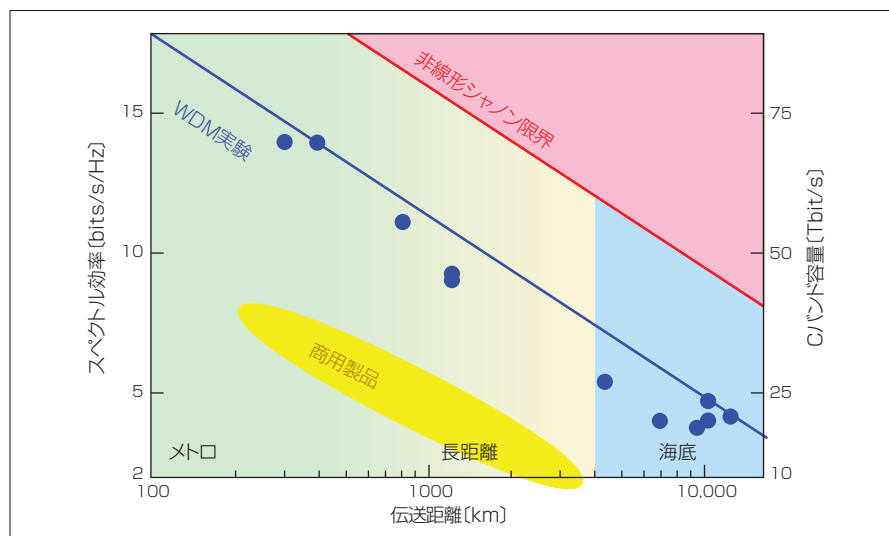


図2 標準シングルモードファイバシステムは、右上方に示したように、非線形シャノン限界に近づきつつある。青線は実験レベルのデモンストレーションを示しており、黄色領域は商用製品を示している。縦軸は、エルビウムファイバによるCバンド(右)とスペクトル効率(左)を示している(提供:ベル研究所⁽³⁾、ピーター・ウィンザー氏)。

OFS社の両社が実行モードエリアが少なくとも125 μm^2 、1.55 μm 帯で減衰量0.19dB/km以下のファイバを提供している。フォトニック結晶ファイバ(PCF)では実効モードエリアは1000 μm^2 を超えているが、その損失は通信用途にはあまりにも大きすぎる。

ラージモードエリアシングルモードファイバには通常、高い波長分散がある。しかし、それはもはや問題ではない、コヒレント伝送とデジタル信号処理が強力な電気分散補償を可能にしているからである。

ラージモードファイバの普及により、高出力と高度なコーディング技術の利用でデータレートと伝送距離が拡大する。シエナ社は、コムキャストの長距離ネットワークで、そのような約1000kmのファイバを利用してライブトラフィックを運ぶ1Tbit/sスーパーチャネルを伝送した。変調方式は16-QAM。高度なコーディング方式により、スペクトル効率は5bits/s/Hzに達した。ベネット氏によると、ローモードエリアファイバのラボテストでは、PM-8QAM信号

の距離がほぼ3倍に延び、大西洋横断の距離に達した。

ラージモードエリア、低損失ファイバも長距離海底ケーブルでは標準になっている。これは米TE Connectivity SubComのニール・ベルガノ氏(Neal Bergano)が、Future Opticsインタビュー(Laser Focus World 2016年3月号21ページ参照)で話していることである。8ファイバペアと高度なコーディングを用いる大洋横断ケーブルは、伝送容量が80Tbitとなっている。最近の実験では、ベルガノ氏のグループが152の200Gbit/s偏波多重16-QAMチャネル、スペクトル効率6b/s/Hzで9748kmテストベッド伝送した⁽²⁾。しかし伝送容量は標準シングルモードの10倍程度で上限に達すると見られている。

空間分割多重

長期にわたり、空間分割多重は2点間の並列物理ルートで信号を伝送することにより潜在的に100倍の容量増を提供する。ベル研のピーター・ウィンザー氏は、それを光多重の第5物理次元

と呼ぶ、時間、位相、周波数、偏波に次ぐものである⁽³⁾。

同じケーブル内の独立したファイバを通した空間多重は十分に確立されているが、増幅器など他のコンポーネントの統合では、ほとんど見込みがない。マルチコアファイバとマルチモードコアは、統合の見込みははるかに高いが、広範囲の開発が必要である。「パラレルシステムが出現することは、われわれはみな知っている。問題は、並列処理のどの形態が、経済的に最も筋が通っているかだ」と同氏は言う。

初期のマルチモードおよびマルチコアテストは心強いものであった。2012年欧州光通信会議 (ECOC) で、日本電信電話社は記録的な1010Tbit/s (1.01 Pbit/s) を52.4kmの12コアファイバで伝送した。各コアが222の独立した波長で380Gbit/sを伝送し、トータル84.5 Tbit/コアだった。モード分割多重はフューモードファイバで独立して実証された。

昨年の光ファイバ通信 (OFC2015) 会議では、ポストデッドラインセッションで、マルチコアファイバの数コアのそれぞれで、マルチモード伝送を行ったという報告が3件あった。2件は、数kmのファイバで100を超えるパスを利用した空間分割多重を報告した。情報通信研究機構 (NICT) の坂口淳氏は、5.5kmファイバ⁽⁵⁾の36コアの各々で3モードを伝送し (図3)、KDDI R&D 研究所の五十嵐浩司氏は、9.8kmのファイバの19コアのそれぞれで6モードを伝送した⁽⁶⁾。3件目の論文では、NTT 研究所の芝原光樹氏と同僚は、増幅段を持つ10倍の52.7kmループで12コアの各々で3モードの信号を伝送したと報告した。NTTグループが利用した空間多重のレベルは少なかったとは言え、増幅の実証、ファイバ間の信号伝送、

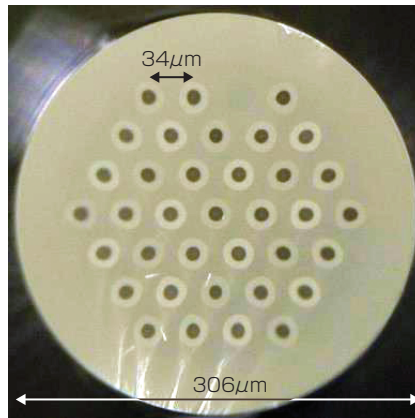


図3 36コアファイバには3つの異なるタイプのコアが収容されており、それぞれが3モードを伝送できる。これは東京の情報通信研究機構 (NICT) における実験で使われた (提供:坂口淳氏)⁽⁵⁾。

500kmを超える総伝送距離達成は重要なステップであった⁽⁷⁾。

大きな問題が残っている。結合中と増幅中にフューモードファイバのモード間にどの程度のクロストークが生ずるか。増幅器やカブラの統合は良好であるか。空間分割多重の効率、bits/s/Hz計測でどの程度向上可能か。空間分割多重は、大洋横断距離でどの程度可能性があるかなどだ。

最近の理論研究は、予想外の制限を示唆している。2015年のECOCで、OFS のカシヤパ・バイルマーシー氏 (Kasyapa Balemarthy) とロバート・リングル氏 (Robert Lingle) は、220 μ mファイバは、

6000~1万2000kmを伝送後に100Gbit/s 信号の劣化なしに5~7コア以上を収容することはできないと警告している。

展望

決定的な問題は、最良値を提供するのはどんな技術であるかと言うことである。空間分割多重の統合の主要な魅力はコスト低下の可能性である。しかし、ウィンザー氏は、「19コアのファイバは、19の個別ファイバよりも低コストでは誰も造れない」と言う。したがって実用性から言うと、せいぜいマルチコア、マルチモードファイバが数年先に現実になる程度だろう。

とは言え、過去を振り返ると、1970年代後半、シングルモードファイバー芯よりも多数の並列マルチモードファイバを敷設する方が実用的であると考えた人が多かった。1980年代には、コヒレント伝送は非実用的であると考えられており、20年は棚上げされると見られていた。その後、新技術が100Gbit/sコヒレント伝送の扉を開いた。他の選択肢も残っている。伝送スペクトルを1530~1565nmのエルビウムファイバのCバンドから広げることも考えられる。さらに、3月24日からのOFCポストデッドラインセッションでのいくつかの驚くような発表も注目された。

参考文献

- (1) A. D. Ellis et al., "The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres," Proc. SPIE, 8434, 84340H (Jun. 1, 2012); doi:10.1117/12.928093.
- (2) J.-X. Cai et al., Opt. Express, 22, 4, 9115 (Apr. 8, 2014); doi:10.1364/oe.22.009116.
- (3) P. Winzer, Bell Labs Techn. J., 19, 22 (2014); doi:10.15325/bltj.2014.2347431.
- (4) H. Takara et al., "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gbit/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," Proc. ECOC, Th.3.C.1 (Sept. 2012).
- (5) J. Sakaguchi et al., "Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels," Proc. OFC, Th5C.2 (2015).
- (6) K. Igarashi et al., "114 space-division-multiplexed transmission over 9.8-km weakly-coupled 6-mode uncoupled 19-core-fibers," Proc. OFC, Th5c.4 (2015).
- (7) K. Shibahara et al., "Dense SDM (12 core \times 3 mode) transmission over 527 km with 33.2-ns mode-dispersion employing low-complexity parallel MIMO frequency domain equalization," Proc. OFC, Th5C.3 (2015).
- (8) K. Balemarthy and R. Lingle Jr., "Upper limits on number of cores for multi-core SMFs over trans-oceanic distances at 100Gbps," Proc. ECOC, 0761 (2015).