

OFC/NFOEC ショート速報 [基幹伝送]

佐野 明秀 (NTT 未来ねっと研究所)

会議名 : Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference 2011

開催期間 : 2011 年 3 月 6 日 - 11 日

開催場所 : Los Angeles Convention Center (Los Angeles, CA, 米国)

*****要 約*****

2011 年 3 月 6~11 日に米国ロサンゼルスにて開催された OFC/NFOEC2011 における基幹系伝送システムに関する技術動向について報告する。ポスト 100G に向けた大容量、長距離伝送のための様々な新規技術の提案、実証が進み、1本のファイバで 100 Tbit/s を超える超大容量伝送実験が報告され、多数の注目を集めた。また、シングルモードファイバにおける伝送容量限界の克服に向けて、マルチコアファイバ、マルチモードファイバを用いた空間多重伝送の検討も活発化している。

1. はじめに

基幹系伝送システム分野では、デジタルコヒーレント受信方式が共通のプラットフォームとして一般化し、本方式に基づく PDM-QPSK (Polarization Division Multiplexed Quadrature Phase Shift Keying) 符号を用いた 100 Gbit/s WDM システムは、各機関において実用化開発が進められている。さらに、デジタル信号処理 (DSP) 技術をより積極的に活用した高次 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 伝送や高密度波長多重分離技術が大きく進展し、ファイバ 1 本あたりの伝送性能が飛躍的に向上している。今回の OFC においても、DSP を駆使した大容量、長距離伝送技術に着実な進展が見られ、ついにファイバ 1 本あたりの伝送容量が 100 Tbit/s を超える伝送実験が報告されるに至り、多くの注目を集めた。

一方で、ファイバ 1 本 (1 コア) あたりの伝送容量は限界に近づきつつあり、この克服に向けた新たな展開が始まっていることも実感できた。このような展開の一つの方向性は、NTT 提案の SLICE (Spectrum-sliced elastic optical path network architecture) コンセプトに代表されるような、周波数グリッドのフレキシブルな活用や OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)、適応変調によるネットワーク全体での周波数利用効率の向上を指向する検討である。これに関しては、いくつかのワークショップやテクニカル・セッションが催され、いずれも活況を呈していた。また、もう一つの方向性は、マルチコアファイバ (MCF) 伝送やマルチモードファイバ (MMF) 伝送などの空間多重の活用である。これについては、最新の研究成果が報告される最終日のポストデッドライン・セッションでいくつかの報告があり、多数の聴衆を集め盛況であった。本報告では、主にデジタルコヒーレント受信技術を駆使した大容量、長距離伝送に関する技術動向についてまとめる。

2. 大容量伝送技術

OFC では、ここ数年、ポストデッドライン論文において伝送容量の記録更新が続いているが、今回もこ

れまでの記録を大幅に更新する伝送実験が報告された。単一コアのシングルモードファイバを用いた伝送に関しては、これまでの最大容量である 69.1 Tbit/s を上回る 101.7 Tbit/s, 165 km の伝送実験が NEC Laboratories より報告された。本報告では、変調方式に PDM-OFDM を採用し、各サブキャリアを 128-QAM という極めて高次の多値符号により変調している。6 GHz 帯域の OFDM 信号を 4 バンド多重した 294 Gbit/s の信号を 25 GHz 間隔で波長多重し、単一コアファイバ伝送ではこれまでで最高となる 11 bit/s/Hz という周波数利用効率を達成している。

NICT、住友電工、オプトクエストのグループからは、7 コア MCF による空間多重を活用した 109 Tbit/s、16.8 km の伝送実験が報告された。変調信号は、100 GHz 間隔の 172 Gbit/s PDM-QPSK 信号であり、7 並列伝送により 11.2 b/s/Hz の周波数効率を達成している。本 MCF は 0.18 dB/km という低損失であり、クロストークは -90 dB/km 程度と良好な性能が実現されている。また、同じく 7 コア MCF を用いた 56 Tbit/s、76.8 km の伝送実験が OFS とアルカテル・ルーセント（米）のグループから報告された。この報告においても変調方式は 50 GHz 間隔 107 Gbit/s PDM-QPSK 信号であり、7 並列での周波数効率として 14 bit/s/Hz を達成している。このような MCF を用いた本格的な WDM 伝送の報告は今回が初めてであり、両者ともシングルスパンでの実験であったが、今後の更なる進展が注目される。

3. 高密度 WDM 伝送技術

ポスト 100G に向けては、伝送容量の更なる拡大に加えて、将来のイーサネットでは予想される 400G、1Tbit/s 級の高速クライアント信号を効率よく収容、転送することが求められている。このような高速チャネル転送を実現するための技術として、OFDM や Nyquist WDM などのマルチキャリア伝送方式が提案されている。AT&T は、デジタル信号処理による Nyquist フィルタリングを適用した 9 Gbaud の PDM 32-QAM 符号を 5 サブキャリア多重して 450 Gbit/s の信号を生成し、この superchannel を 8 波多重して、400 km の伝送に成功した。周波数効率は 8.37 bit/s/Hz で、400 Gbit/s 級の高速チャネルの伝送としては最高である。ロールオフ係数 0.01 の非常に強いフィルタリングをかけており、時間軸方向の余裕度が減少するため、タイミングジッタに対する耐力について議論があった。

東京大学からは、10 Gbaud の偏波多重 QPSK 変調において、Nyquist フィルタを適用した高密度 WDM 実験の結果が報告された。シンボル速度に等しい周波数間隔においても、低ペナルティで多重分離が可能であることが実証された。

上述のデジタルフィルタを適用した高密度 WDM に対して、光領域での狭帯域フィルタリングを適用した高密度伝送にも進展が見られた。TE SubCom からは、狭帯域光フィルタリングと MLSE (Maximum Likelihood Sequence Detection) アルゴリズムを併用した長距離 WDM 伝送実験が報告された。112 Gbit/s の PDM-QPSK 信号を 25 GHz 間隔で多重し、198 チャネル、6,860 km の伝送に成功し、伝送容量・距離積としてこれまでで最大の 141 Pbit/s・km を実現した。従来の報告で用いられていた MAP (Maximum a posteriori probability) アルゴリズムを用いる場合に比べて、0.6 dB の改善が得られたとのことである。

4. デジタルコヒーレント受信技術

デジタルコヒーレント受信技術を用いた 100 Gbit/s 級システムは、各機関が開発を進めている段階であるが、複数のワークショップやパネルセッションなどに各国のキャリア、ベンダのキーパーソンが集い、今後の導入シナリオ、フィールド実験の結果や各種コンポーネントの開発状況などについて活発に意見交換が行

われた。パネルセッションでは、100G デジタルコヒーレント信号処理技術の開発状況が NTT から報告され、最新の CMOS 技術に基づく第 2 世代 DSP LSI の開発状況等が、多数の注目を集めていた。また、16-QAM 以上の多値伝送実験では、これまでオフライン処理による検証がほとんどであったが、FPGA ベースでのリアルタイム検証も進展が見られた。アルカテル・ルーセント (米) は 5 Gbaud の PDM 16-QAM 信号の back-to-back でのリアルタイム受信に成功した。更に、東北大学は、1 Gbaud の 64-QAM 信号の FPGA ベースのリアルタイム受信に成功し、エラーフリー動作が達成した。

デジタルコヒーレント受信技術の今後の適用分野として、光ファイバ中での非線形効果の DSP による補償があるが、今回の OFC でもこれに関して多くの発表があった。従来から、逆伝播法が有効な手法の一つとして盛んに検討されているが、NTT からの招待講演で報告されたように、単純な実装では従来の波長分散補償に比べて 30 倍程度の回路規模が必要であり、回路規模の低減に向けた手法が検討されている。富士通からは、Correlated Back Propagation Method という新しい補償アルゴリズムが提案され、これにより逆伝播法の演算間隔を 4 倍に拡大できることが報告された。また、QAM などの多値変調符号への逆伝播法の適用も進んでいる。10 Gbaud の PDM 64-QAM 符号に対して本方式を適用した結果が NTT より報告された。非線形補償を適用することにより、伝送可能距離が 800 km から 1280 km に拡大され、64-QAM という高次の多値符号に対しても本方式が有効であることが初めて実証された。ロンドン大は 28 Gbaud の PDM 16-QAM 伝送において逆伝播法による非線形補償を適用し、50 GHz 間隔の 3 チャネル WDM 伝送で伝送可能距離が 1200 km から 1360 km に拡大可能であることを示した。

5. MIMO 技術

ポストデッドライン・セッションにおいて、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 信号処理に基づくマルチモード伝送が 3 件報告された。いずれの報告も Few Mode Fiber (FMF) を用い、デジタルコヒーレント受信機により受信しているが、それぞれ異なるモードの組み合わせでモード多重伝送を行っている。

メルボルン大学の報告では、4.5 km の FMF を用い、LP₀₁ と 1 つの LP₀₁ モードを励振して、PDM-OFDM 信号のモード多重伝送を行った。モード結合は十分小さいとして、モード分離器で分離した 2 つの信号を個別にコヒーレント受信機で受信している。アルカテル・ルーセント (仏) の報告では、LP₀₁+LP_{11a}、または LP_{11a}+LP_{11b} という 2 種類の組み合わせで 100 Gbit/s PDM-QPSK 信号のモード多重伝送を行い、後者の場合に 4 × 4 MIMO 処理を適用して復調を行った。40 km 伝送後の Q 値ペナルティは LP₀₁ モード伝送の場合に対して 1.7 dB 程度であった。アルカテル・ルーセント (米) の報告では、10 km の FMF において LP₀₁+LP_{11a}+LP_{11b} の 3 モードを用いて 100 Gbit/s QPSK 信号の伝送を行っている。60 ps/km という小さい Differential Mode Group Delay の FMF を用いてモード結合がある条件下での伝送し、6 × 6 MIMO 処理による復調に成功している。これらの報告は複数のモードを用いた本格的な伝送実験としては初めての報告であり、MIMO 処理によるモード分離の基本動作が検証できた段階であるが、今後の進展が期待される。

6. おわりに

基幹伝送分野では、ファイバあたりの伝送容量が 100 Tbit/s を超えるとともに、単一コアファイバの伝送容量限界を克服する様々な新規技術が見られるなど、興味深い発表が相次いだ。今後もデジタルコヒーレント受信技術をベースに様々な発展が継続することが期待される。