

### OFC/NFOEC2007 ショート速報[基幹伝送]

水落隆司 (三菱電機)

会議名 : The 2007 Optical Fiber Communication Conference and Exposition 2007 and the National Fiber Optic Engineers Conference

開催期間 : 2007 年 3 月 25 日 - 29 日

開催場所 : Anaheim Convention Center (Anaheim, CA, 米国)

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*  
 Alcatel-Lucent と NTT から大容量伝送の記録を塗り替える実験結果が報告されたのをはじめ、100GbE 伝送技術で顕著な進展があった。一方、デジタルコヒーレントレシーバ方式により新しく生まれ変わったコヒーレント光通信の研究再興、OFDM 方式の光通信応用による分散補償を不要とする伝送、32 値や 64QAM などのさらなる多値化など、いずれもデジタル信号処理技術に基づくアイデアベースの研究等、次の 10 年を開拓する可能性の高い報告がなされた。

\*\*\*\*\*

#### 1. はじめに

昨年の ECOC2006 に続いての伝送容量記録の更新や、デジタル信号処理技術に基づくアイデアベースの研究、特にデジタルコヒーレントレシーバの概念浸透と OFDM の光通信応用など、次の 10 年を開拓する可能性の高い密度の濃い発表が相次いだ。一方で、100 ギガビットクラスの伝送、特に IEEE802.3 で議論が始まった 100GbE 伝送技術に集まる注目が会場をにぎわしていた。

#### 2. トピックス

基幹伝送関連で特に注目を集めた以下 6 分野について、その概要を紹介する。

##### 2. 1 大容量 WDM 伝送

ECOC2006 で NTT 未来ねっと研究所およびフォトニクス研究所のグループが、ベル研究所グループとデッドヒートの末、伝送容量記録を 5 年ぶりに 10Tb/s から 14Tb/s に更新したことは記憶に新しいが、今回再び同じグループがそれぞれの記録を更新した。ポストデッドラインセッション会場は、OFC のハイライトの”Hero Experiments”を見ようとする聴衆で埋め尽くされた。最初に登壇したベル研究所(現 Alcatel-Lucent)の Gnauck 氏が 25.6Tb/s の伝送容量を発表した (PDP19)。C バンドと L バンドに 50GHz 間隔で並べた RZ-DQPSK (Return-to-Zero Differential Quadrature Phase-Shift Keying) 信号 160 波を偏波多重することで、80km×3 スパン=240km を 25.6Tb/s 伝送してみせた。NICT と住友大阪セメントが DQPSK 変調器を開発し共著で参画した。次に登壇した NTT 未来ねっと研究所の増田氏が、帯域を拡大したラマン/隣共添加 EDFA で 20.4Tb/s を伝送してみせた (PDP20)。単一带域増幅器としての最大容量伝送の記録である。信号フォーマットは CSRZ-DQPSK (Carrier-Suppressed RZ-DQPSK) で、距離もベル研のそれと全く同じ 80km×3 スパンである。

## 2. 2 100GbE 伝送

100Gb/s クラスの Ethernet に対する感心が急速に高まっている。IEEE802.3 の HSSG (Higher Speed Study Group) で活躍する Force10 Networks の D'Ambrosia 氏と Alcatel-Lucent の Duelk 氏らがオーガナイザとして開催した 100GbE のワークショップ (OSuA) に、100GbE の標準化・技術動向を知ろうとする聴衆が多数集まった。IEEE での議論は 40km 以下のシングルモード伝送あるいは 100m のマルチモードファイバ伝送を当面のターゲットとしており、10Gb/s×10 並列あるいは 25Gb/s クラスの 4 ないし 5 並列伝送に議論が集まっていることが紹介された。一方で、100Gb/s を長距離シリアル伝送しようとする試みも着実に進展している。ポストデッドラインセッションで 3 つの研究機関から 10 チャンネルの 100Gb/s 信号を伝送した実験が報告された。CoreOptics の Fludger 氏らは、27.75Gsymbol/s の RZ-QPSK 信号を偏波多重して 111Gb/s としたものを 10 波 2375km 伝送し、デジタルコヒーレントレシーバ (オフライン) で受信した (PDP22)。先の ECOC2006 で 86Gb/s-100km だったものをのばした実験である。Alcatel-Lucent の Schuh 氏らは、送受信ともシリアル電気多重により 10 波の 107Gb/s 信号を標準シングルモードファイバ 480km 伝送した (PDP23)。ベル研究所の Raybon 氏らは、53.5Gsymbol/s の DQPSK 信号を、6 つの OADM(Optical Add/Drop Multiplexing) ノードを含む 1200km の距離を伝送した (PDP24)。これ以外にも Eindhoven 工大・シーメンス・HHI のグループがシリアル電気多重による 107Gb/s 信号のフィールド試験結果を発表した (OWE3)。

## 2. 3 デジタルコヒーレントレシーバ

コヒーレント光通信は、1980 年代に盛んに研究されたものの、EDFA の登場により本格実用化されことなく研究が下火になった。2 年前の OFCNFOEC2005 で東大の菊池教授がデジタル信号処理 (Digital Signal Processing: DSP) を用いたコヒーレントレシーバの実験を発表して以来、研究再興の兆しが出た。今回、菊池教授は、20Gb/s の QPSK 信号を 1000km 伝送して発生するファイバ非線形による歪みをオフラインの信号処理ながら補償することに成功した (OTuA2)。今回の OFC でデジタルコヒーレントレシーバが確かな潮流となったようだ。20 年前のコヒーレントは高感度化を目的としていたが、現在のコヒーレントは多値復調を目的としている。また、過去は受信帯域をベースバンド帯域とできるホモダイン検波が望ましいとされながらも光位相同期ループの難しさに実現が阻まれていたが、現在の方式は、局部発振光がオフセットしていても良い「イントラダイン」方式が主流になり、光位相同期ループを不要にしている。また、ここ数年の研究の多くが、一旦 PC にデータを取り込んでデジタル信号処理するいわゆるオフライン実験であったのが、ここに来て、低速ながらも実際に回路に実装してリアルタイム実験する例が出始めた点が注目される。ベル研究所の Leven 氏は、4.4Gb/s の QPSK 信号のリアルタイム伝送を発表した (OThK4)。位相・周波数推定の演算と CMA (Constant Modulus Algorithm) による偏波分離を FPGA (Field Programmable Gate Array) 上のデジタル信号処理で実現したのが特徴とのこと。

## 2. 4 多値変復調

DQPSK 方式の実用化が進むなか、研究フェーズはさらなる多値化へ着実な進歩を遂げている。日立の菊池氏らは、4 値の OOK (On-Off Keying) と 8 値の DPSK を組み合わせることで、50Gb/s-32 値の多値信号伝送に始めて成功した (PDP21)。オフラインのデジタル信号処理ながら、波形等化効果を実証している。

一方、東北大の中沢教授らは、64QAM の偏波多重コヒーレント受信により 12Gb/s 信号の伝送に成功した (PDP26)。ヘテロダイン光位同期ループがこれを可能にしたもので、オフラインのデジタル信号処理ながらも 6b/s/Hz という記録的な周波数利用効率を達成した。これら以外にもデンマーク工大による D8PSK 伝送 (OWM4) など、幾何学模様のようなコンスタレーション図が登場する多値変調の発表が普通となりつつある。

## 2. 5 OFDM 技術の光通信応用

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)の光通信応用の研究が急拡大している。高速信号列を並列展開し速度を落とし、それぞれを多数のサブキャリアにのせて伝送することで飛躍的に分散耐力が増す。KDDI 研究所の Jansen 氏らは、20Gb/s 信号を OFDM 化し、一切の分散補償器なしに標準シングルモードファイバ 4160km を伝送することに成功した (PDP15)。受信のコヒーレント OFDM 復調はオフラインのデジタル信号処理ながらも、それがもたらす技術ポテンシャルの大きさに高い注目を集めた。早くから OFDM に着目していた Monash 大の Lowery 教授らは、20Gb/s の信号を直接検波の OFDM によって 320km の SMF 伝送した (PDP18)。これらを含め、OFDM 関係だけで 10 件程度の発表があった。今後、D/A コンバータの高速化が進み、また DSP の処理能力が進展すれば、リアルタイムの伝送実験が発表される日も遠くないかもしれない。

## 2. 6 EDC、フレイマおよび FEC

Electronic Dispersion Compensation (EDC)が着実に進歩している。初期の頃は線形フィルタの Feed Forward Equalizer (FFE) に留まっていた EDC だが、非線形等化の Decision Feedback Equalizer (DFE) や Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSE) へと移っている。NTT フォトニクス研究所の中村氏が InP/InGaAs-HBT による 40Gb/s 用の EDC の試作結果を招待講演で発表した (OThN6)。また、Alcatel-Lucent の Bülow 氏が、最新の研究動向をチュートリアル講演した (OMG5)。NTT の木坂氏は、40Gb/s 用の LSI としてはじめて 10GbE の 4 多重を 1 チップ化した LSI の開発結果を発表した (OTHL1)。OTN フレーム、業界最高性能の EFEC (Enhanced Forward Error Correction)、さらには DQPSK プリコーダを備えているという。三菱電機の宮田氏は、100GbE への適用を意識し、回路規模を削減できる可能性のある LDPC (Low-Density Parity Check) 符号の新しい復号方式を提案した (OWE5)。

## 3. おわりに

OFC/NFOEC2007 における基幹伝送関連のトピックスを紹介した。取り上げた 5 つの分野全てにおいて、日本の研究機関がトップクラスの論文を発表したことを付記しておきたい。多くは光産業技術振興協会が光テクノロジーロードマップをはじめ多くの機会を捉えて推進してきたテーマである。一方で、デジタル信号処理技術は、我が国の過去の予想を超えて進展している感がある。この分野は、当初日本の発案、あるいは日本が得意としてきた分野であるため、来年の OFC/NFOEC2008 に向けた取組強化が期待されるところである。