

OFC/NFOEC2009 ショート速報[基幹伝送]

佐野明秀 (日本電信電話株式会社)

会議名 : The 2009 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference

開催期間 : 2009年3月22日-26日

開催場所 : San Diego Convention Center (San Diego, CA, USA)

*****要約*****

基幹伝送分野では近年、デジタル・コヒーレント受信や光 OFDM など、デジタル信号処理技術を活用した光通信方式の検討が活発化しているが、今回の会議では伝送ファイバの非線形効果に対する補償技術、あるいは多値化による周波数利用効率の向上など、デジタル信号処理の可能性を更に追及する動きが目立った。また、ポストデッドラインペーパーでは、ファイバ1本当たりの最大伝送容量を更新する 32 Tb/s の伝送実験や、光 OFDM を用いた容量・距離積として最大の 97.3 Pb/s・km の伝送実験の報告など、トップデータの更新が相次ぎ、多くの注目を集めた。

1. はじめに

OFC/NFOECは毎年2月もしくは3月に米国で開催される光ファイバ通信技術に関する国際会議であり、毎年9月に欧州で開催される ECOC (European Conference on Optical Communication)と並んでこの分野では最大規模を誇る会議である。2005年から OFC (The Optical Fiber Communication Conference)と NFOEC (The National Fiber Optic Engineers Conference)の共同開催で実施されており、今年は3月22日～26日に米国サンディエゴで開催された。金融不況の影響が懸念されたが、約9500人という多数の参加者を集めた。

基幹伝送の分野では、40G/100G級伝送が大きなトピックとなっており、それを実現するデジタル信号処理に基づくコヒーレント受信技術に多くの聴衆の関心が集まっていた。通常の Technical Session はもとより、関連ワークショップやパネルセッションも開催されるなど大きくクローズアップされていた。本稿では、これらのデジタル信号処理技術を中心とした基幹伝送関連の技術動向について報告する。

2. デジタル・コヒーレント受信技術

40 Gb/s, 100 Gb/s 級の高速信号の長距離伝送では、デジタル・コヒーレント受信方式を用いることにより、極めて大きな波長分散、偏波モード分散を補償できることが実証されており、伝送距離が大幅に向上している。今回の OFC/NFOEC では、このような線形の波形歪の補償に加え、伝送ファイバ中で発生する非線形効果による歪をデジタル信号処理を用いて等化する技術に対しても注目が高まりつつあることがうかがえた。Cork 大 Ellis 氏 (OMM4) や Stanford 大 Kahn 氏 (OTuG5) のチュートリアル講演においても非線形補償技術に関しての解説があった。富士通からは、直交偏波間の非線形効果を考慮した逆伝播法による補償方式が提案され、その有効性を 111 Gb/s/ch の偏波多重 QPSK 信号を用いた WDM 実験により検証した

との報告があった (OThR6)。また、一方では適応 FIR フィルタによる同偏波補足問題の解決法 (富士通、OMT2) や波長分散補償量推定のためのブラインドアルゴリズムの提案 (Federal Armed Forces University Munich, OMT1) など、実システムへの適用を意識した詳細な検討に関する発表も見られた。

ディジタル・コヒーレント受信機の実装面での進展に関しては、SiGe ADC (5 ビット、10 GS/s) 4 つと CMOS ASIC を単一パッケージに実装した受信機による 10 Gb/s のリアルタイム動作が報告され (OThE2, OThJ4)、Nortel 以外での ASIC によるリアルタイム動作報告ということで注目された。一方、既に 46 Gb/s DP-QPSK のリアルタイム動作を実現している Nortel からは、変調フォーマットに関する Sun 氏の招待講演 (OTuN1)、ADC、DSP を集積化した ASIC に関する招待講演 (OThE4) や、multi-path interference の評価結果 (OTuN3, AT&T) などが報告された。

3. 多値変調

多値変調に関しては、QAM (Quadrature Amplitude Modulation) に関する独立したセッション (OWG) が設けられるなど、検討の中心は DQPSK 方式から 8 値以上の多値符号へと完全に移行した感がある。また、受信方式についても遅延干渉計を用いた直接検波方式から、ディジタル・コヒーレント受信機を用いた発表が増加してきている。8-QAM 方式に関しては、AT&T、NEC Laboratories のグループから変調方法及びブラインド等化アルゴリズムが提案された (OWG3)。従来の 8-PSK 方式に比べて光雑音耐力が 1.5 dB 程度優れているため、長距離伝送に適している。ポストデッドラインセッションでは、同じグループにより本方式を用いた C+L バンドの波長帯を用いた 32 Tb/s の大容量伝送が報告された (PDPB4)。8-QAM を用いて 114 Gb/s の信号を 25 GHz 間隔に多重し、4.2 b/s/Hz という高い周波数効率を達成している。本報告により、光ファイバ 1 本あたりの伝送容量の記録が 2 年ぶりに更新され、本会議での最大のハイライトとして多数の聴衆の注目を集めた。また、16-QAM 方式では、Alcatel-Lucent (米) より 112 Gb/s の 16-QAM を 16.7 GHz 間隔に多重した 6.2 b/s/Hz という高周波数効率の伝送実験が報告された (PDPB8)。送信側でアナログフィルタにより帯域制限した変調器駆動信号を用いて信号のスペクトルを狭窄化することにより、高密度の WDM 伝送を実現している。また、QAM 信号生成用の変調器構成 (OTuG4, OWG5, NICT) や単一の Mach-Zehnder 型変調器を用いた 16-QAM 信号の生成法の検討 (OWG6, 三菱電機) など、各機関で検討が活発化してるとの印象を受けた。多値変調符号の受信方式に関しては、コスト、安定性などの観点から差動直接検波方式が従来から検討されているが、シンボル判定法の改善などにより光雑音耐力を改善でき、コヒーレント受信に近い性能が得られるとの報告が日立よりあった (OWG1)。

4. 光 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)伝送

光 OFDM 伝送は、波長分散・偏波分散耐力の飛躍的向上、周波数利用効率の向上の観点から、近年非常に注目を集めている分野である。基幹伝送分野では 3 つの OFDM 関連セッションが設けられた。また "Single-carrier vs. Multi-carrier modulation formats for WDM systems" というタイトルの Workshop(OMB)も開催されるなど、注目を集めていた。OFDM 伝送では、信号の PAPR(Peak to Average Power Ratio)が高くなるため、伝送ファイバ中での非線形効果による劣化を克服することが課題であり、今回の OFC/NFOEC では、これに関する発表がいくつか見られた。Monash 大 (OTuO1) や Alcatel-Lucent (米, OTuO5) からは送信端・受信端でディジタル信号処理により非線形位相回転を補償する方式に関する発表があった。また、筆者らは、ガードインターバルを用いない少数サブキャリアの光 OFDM は PAPR が

小さく、非線形効果に対する耐力が高いという特徴があることを招待講演 (OTuO3) 及び Workshop(OMB) で紹介した。さらに、本方式を用いた 1 波長での長距離伝送実験 (OWW4) および大容量 WDM 伝送実験 (PDPB5) が NTT から発表された。この大容量 WDM 伝送実験では、光多重で生成された 2 つのサブキャリアからなる光 OFDM 信号を用い、伝送路において二次ラマンを適用した純シリカコアファイバによる低雑音光増幅を適用することにより、13.5 Tb/s, 7,209 km (波長あたりは 111 Gb/s) の伝送実験に成功している。これにより容量・距離積としてこれまでの最高の 97.3 Pb/s・km が達成され、前述の最大容量伝送と並んで大いに注目を集めた。

光 OFDM 方式を用いた高密度 WDM 伝送に関しては、KDDI 研究所から 32-QAM 変調を適用した 65.1 Gb/s×8 波の WDM 伝送が報告された (PDPB7)。これにより、40 Gbit/s 以上の伝送速度ではこれまでの最高の周波数利用効率である 7 b/s/Hz が実現された。

光 OFDM 関連のもうひとつのトピックとして、高速化への適用が挙げられる。OFDM 方式は、光領域、あるいは電気領域での周波数多重に対する親和性が高いという特徴がある。Melbourne 大 Shieh 氏の招待講演 (OWW1) では、この特徴を利用して 1 Tb/s Ethernet チャンネルのトランスポートへの適用を提案しており、ポストデッドラインセッションでは Melbourne 大 (PDPC1) と Alcatel-Lucent (独、PDPC2) からそれぞれ 1 Tb/s, 1.2 Tb/s の伝送実験が報告された。これらの実験では伝送ファイバの波長分散、偏波モード分散をデジタル信号処理により補償しているのが特徴で、従来の光時分割多重 (OTDM) でのテラビット級伝送に比べて光学的分散補償器などが省略でき、低コスト化が期待できる。

5. 電気信号処理技術

デジタル・コヒーレント受信機では、波長分散補償をデジタル信号処理で行うことにより極めて大きな分散補償が可能であり、200,000 ps/nm を超える波長分散の補償が実現されている (PDPB5)。分散補償部の演算量低減に向けて、周波数領域での等化技術が最近注目されているが、NTT からは 2 段構成の周波数領域等化器が提案され、25 Gb/s の単一偏波 QPSK 信号を用いた 4000 km 伝送での検証実験の結果が報告された (OMT3)。Workshop (OMB) や Kahn 氏のチュートリアル講演でも周波数領域での実装にメリットがあることが述べられており、共通認識になりつつあるようである。

誤り訂正符号の高性能化に向けて、軟判定 LSI に関する報告が三菱電機よりあった (OWE2)。0.13 μm SiGe BiCMOS プロセスにより、32 GS/s, 2 ビットの軟判定 LSI を実現しており、32 GS/s で 25 mV 程度の識別感度を実現している。MLSE(Maximum Likelihood Sequence Estimation)に関しては、16-state MLSE を用いた 10.7 Gb/s のフィールド実験の報告があった。3.5 dB の OSNR ペナルティで 4480 ps/nm (SMF 275 km) の分散耐力を改善している。92 ps という大きな PMD を付加した場合の動作結果も報告されている。

6. おわりに

デジタル信号処理をベースにしたコヒーレント受信技術は、偏波多重、多値変調、光 OFDM 伝送などと併用されて伝送性能を大幅に向上させる可能性を有しており、今回の OFC/NFOEC でも顕著な進展が見られた。現在はオフラインでの原理検証が中心であるが、オンラインの検討にも複数の機関が着手しており、今後の実用化に向けた進展に引き続き注目していきたい。次回は 2010 年 3 月 21 日～25 日に米国サンディエゴで開催される予定である。