

SEMINAR REPORT

フォトニックトランスポート技術と今後の展望



本日は、「フォトニックトランスポート技術と今後の展望」について、背景と、これまでの超高速のシステムおよびデジタルコヒーレントの技術を述べさせていただいた後、100Gbpsの研究開発状況について、さらにポスト100Gbpsということで、昨年我々がOFCで発表した69.1Tbps伝送への取り組みの状況も踏まえて説明させていただき、最後にフォトニックネットワークに関する我々の取り組みの一部を紹介させていただきます。

ブロードバンドの進展

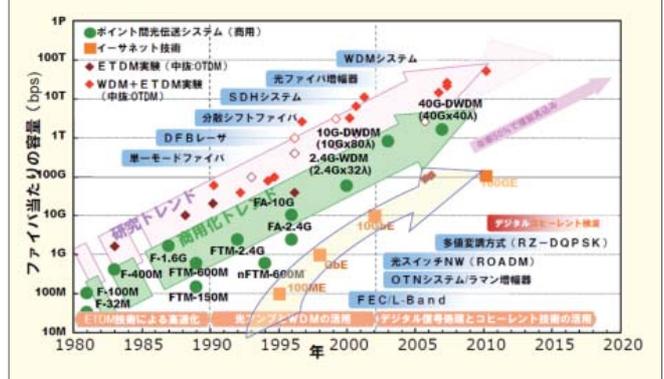
日本の光通信技術は非常に進んでおり、これまで世界最先端の光技術を使って光通信ネットワークを構築してきました。1984年に光ファイバー日本縦断網を完成し、2001年にはFTTHのサービスを開始し、2008年には新世代ネットワーク(NGN)サービスを開始しています。

既にFTTHは1,600万を超えてブロードバンド加入者の半数以上となっており、まさしく光の時代になってきています。実際は日本の各家庭への光化率は9割を超えており、現在光化されていない家庭でも光を導入できる状況になっていますので、光のブロードバンドサービスは今後も増えていくと考えています。

図1に「超高速大容量光トランスポート技術のトレンド」を示します。

私は1985年にNTTに入社し、F-400システムの実用化検討を担当した部署に配属され、ちょうど1.6Gbpsシステムの現場試験をしている時でした。その後、2007年頃には40Gbpsの40波、1.6Tbpsのシステムを実用化しています。このことは、約25年でファイバー当たりの容量で4桁程度上がっています。実際の光伝送技術は、伝送の距離と容量の積で表しますので、

〈図1〉超高速大容量光トランスポート技術のトレンド



約25年で6桁程の技術革新を実現したことになります。

図では、研究のトレンドと商用化のトレンドも示していますが、研究から大体4~5年で実用化を実現してきました。現在、100Gbpsの研究が進んでおり、実用も間近になってきていると思われます。

今後、通信ネットワークのトラフィックは、映像系を主流として急激に増加していくことが予想され、それらをFTTHやモバイルの通信システムが支えていくことになります。特にLTEサービスでは、70Mbps、最終的には200Mbps近く通信スピードが出るということで、今後、無線と有線が融合していくものと考えられます。それらをどのようにフォトニックトランスポートネットワークが支えていくかが今後の重要な課題になってくると考えています。

超高速光通信システムとデジタルコヒーレント技術

トラフィック需要は今後、年率40~50%で伸びると試算されています。現在は、リンク容量が数100Gbpsから1Tbpsで、インターフェース速度が10Gbps(一部40Gbps)といった技術を使ってネットワークを構築していますが、2020年頃になるとリンク容量では数10Tbpsから100Tbps近く、インターフェース速度では1Tbps程度の能力が要求されます。さらに、2030年頃になるとリンク容量は1ペタ程度、インターフェース速度も数テラということで、まだまだの光の技術に支

えられているところは沢山あります。今後これをどうやって支えていくかということが大きな課題になってきています。このような状況の下での光伝送技術と光ネットワーク技術を紹介したいと思います。

光技術に関するトレンドとしては、80年代から90年代にかけては第一世代として電気のTDM技術があり、その後、第二世代として光増幅技術、波長多重のシステム化技術などがありました。現在ではコヒーレント技術が第三世代の技術とされています。

光で大容量信号を長距離伝送するには、2つの大きな課題があります。1つは信号対雑音比(S/N)をどうやって改善するかという課題です。もう1つは長距離伝送のために分散や非線形劣化等による波形歪をどうやって改善するかという課題です。

第二世代では、変調方式としてはIM-DD(強度変調-直接検波)方式を使い、多重化方式としては時間多重とともに波長分割多重(DWDM)によるシステムを開発してきました。

S/N改善に関しては、光増幅器を使ったブースターアンプやプリアンプを実現することで、非常にノイズの少ない受信回路や高出力な光送信回路によりS/Nを改善してきました。第二世代の後半では分布ラマン増幅や、誤り訂正の技術を使うことでさらにS/Nを改善してきました。

波形歪の特性の改善に関しては、外部変調器でスペクトルを狭くするとか、分散補償ファイバー(DCF)や電気分散補償(EDC)による波長分散の補償で対処しています。

第三世代になると、変調方式はDPSKやDQPSK等の位相変調技術、受信側ではコヒーレント受信をした後にデジタル処理をするという新しいデジタルコヒーレント方式が主流となります。多重化に関しては、DWDM以外に多値位相変調の実現や、X偏波とY偏波にそれぞれ別々に信号に乗せた偏波多重方式、光のOFDM多重など、新しい多重化技術を駆使して更なる大容量化を考えていきます。

S/Nの改善に関しては、コヒーレント受信により原理的には3dB向上しますが、実際にはそこまで難しいですが、2dB程度はコヒーレントの受信技術で改善が見込まれます。

誤り訂正に関しては、7%程度のFECを使うと、コーディングゲインで8.5dB程稼げますので、このような高度な誤り訂正技術も使っています。

波形歪特性改善(波形等化)に関しては、多値化で低ボレータ化をすることによるPMDの耐力向上、デジタル信号処理による自動分散補償や波形等化などがあり、このような観点でもデジ

タルコヒーレントの技術は非常に重要だと言われています。

図2は「デジタルコヒーレント受信」です。

1980年代後半にコヒーレント受信の研究が随分盛んになりましたが、当時は位相同期回路を用いて受信した光信号と局発光の周波数の位相をきちんと同期化することが難しくてなかなか実現しませんでした。

デジタルコヒーレントの特徴は、誤差の補正をリアルタイムにデジタル回路で行うことです。デジタルコヒーレント技術の超高速長距離光伝送への利点には以下のものがあります。

(1) 多値変復調

デジタルコヒーレント技術により光信号の位相情報をより細かく制御することが可能となり、位相変調信号の多重度を上げる方法(m-PSK等)や、振幅変化を併用し直交位相変調することで多重度を上げる方法(m-QAM等)など、従来困難であった多値変復調技術が可能となる。

(2) 偏波多重分離

デジタル信号処理(Adaptive filter)技術により、伝送路中等で発生する高速な偏波変動への追従、偏波間クロストークの信号処理での解決等、実フィールドにおける偏波多重分離が実現可能となる。

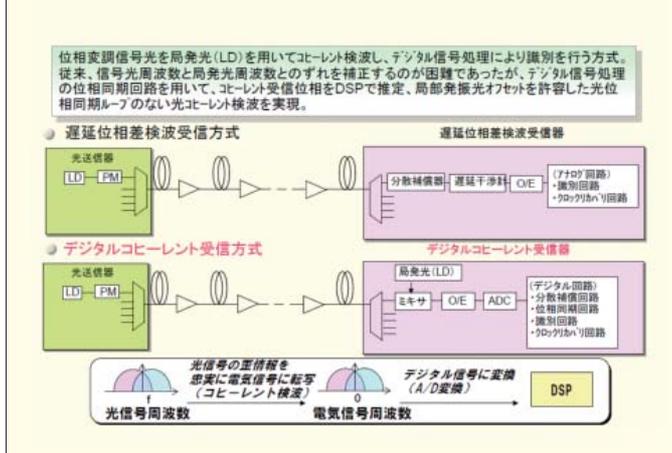
(3) 分散補償

デジタル信号処理によるPMD補償が可能となるだけでなく、従来分散補償ファイバ(DCF)や電気分散補償(EDC)等により波形歪を補正していた波長分散も、デジタル信号処理技術により受信端一括波形等化が可能となった。回路規模にもよるが、10,000ps/nm以上の波長分散、50ps以上の偏波モード分散を信号処理で補償可能となる。

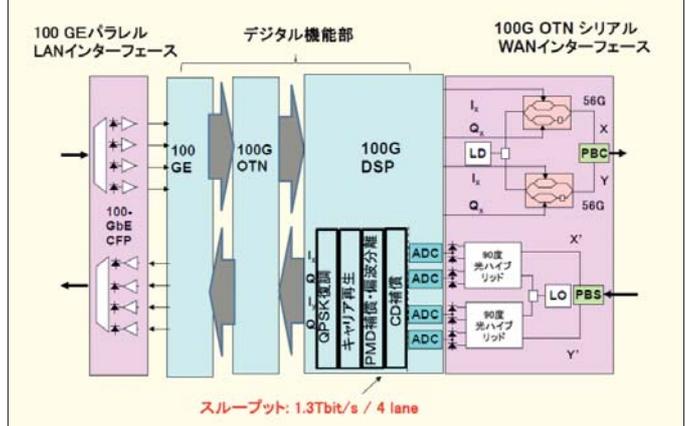
図3に「デジタルコヒーレント光伝送技術を用いた中継機器構成例」を示します。

この技術はかなり大がかりで複雑な技術ですが、これをNICTの委託研究であるユニバーサルリンクで技術的な原理確認を行ない、その後、総務省直轄の委託研究をいただき、統合した大規模なアルゴリズムを検証するプロジェクトを作って検討を進めています。

〈図2〉 デジタルコヒーレント受信 (デジタルホモダイン受信)



〈図3〉 デジタルコヒーレント光伝送技術を用いた中継機器構成例



100Gbps システム実現技術と Post100Gbps へ向けた取り組み

実際に 100Gbps のシステムを作るために、変調方式技術、信号処理技術、誤り訂正技術、光変調器、高速 ADC、CMOS のプロセス技術などを駆使して、SNR 改善、狭変調スペクトル幅、歪補正などを実現すべく取り組んでいます。この取り組みによって、今後 1、2 年ほどで、光ファイバー当たり 10Tbps 級(100Gbps/ch) の光伝送システムが実現し、実用システムとして導入されると考えられます。

次に、ポスト 100Gbps として、我々が昨年発表した 69.1Tbps のキー技術を簡単に紹介します。

大容量化には 2 つの課題があります。1 つは周波数の利用効率 UP です。もう 1 つは光増幅の帯域をどれだけ広げられるかということです。

現在の光増幅帯域は、それぞれ約 40nm の帯域を持つ C バンド、L バンドで実用化されていますが、これを広げていこうということです。

69.1Tbps は 16QAM を使っていますが、変調信号の生成方法には、電気で作成するものと光領域で作成するものの 2 つがあります。

電気 DAC による合成は、構成は簡単ですが、動作速度が制限され、線形ドライバンプが必要なこと、損失が比較的大きいことなどの理由で、我々は光で変調する方式を採用しています。光領域での合成は、多値数の増加に伴い構成は複雑化しますが、高速 QAM 信号の生成に適しています。

実際の 16QAM の生成には、PLC と変調用の LN をハイブリッドで集積した PLC-LN ハイブリッド変調器を用いています。

光増幅帯域の課題に関しては、日本では L バンド帯の光増幅技術は非常に進んでいましたので、今回は L バンドを拡張する形で 1620nm 近くまで増幅できる光増幅器を作り、それと後方ラマン励起とのハイブリッドで、10THz 以上増幅できる光増幅器を開発し、これを使っています。

図 4 は昨年発表した 69.1Tbps の内容です。

信号としては 171Gb/s を 432 チャンネル束ねています。周波数利用効率は 6.4bit で、現状ではおそらくトップデータだと思います。C バンドでは 4.4THz に 176 波を、L バンドでは 6.4THz に 256 波を波長多重して、合計で 432 波を伝送しています。16QAM を使って、リアルタイムではなく 1 度メモリに取り込んだ後計算する方法によって、70Tbps 程のコヒーレント受信を実証しました。

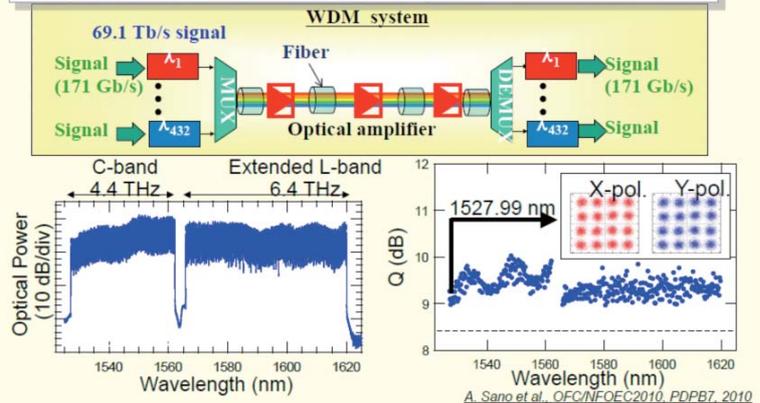
10Tbps については 1、2 年で実用化が実現すると考えています。また、光ファイバ当たり 100Tbps 近くまでは既存フィールドを用いたシステムの実現可能性があると考えており、その次の 100Tbps を目指して今後研究が加速していくと思っています。

次世代フォトニックネットワーク技術の取り組み

従来の電話網は hierarchical なネットワークで通信ネット

〈図 4〉 69.1 Tb/s WDM Transmission of 432 Wavelengths with Spectral Efficiency of 6.4 b/s/Hx

1. Transmitter: 171 Gb/s signal generation and increased spectral efficiency using 16 QAM
2. Receiver: Demodulation and waveform equalization using digital coherent detection
3. Amplifier: Ultra-wide band and low-noise optical amplification



既存フィールドでの 100Tbps 級超高速大容量 WDM システムの実現へ向け検討加速

ワークを構築していましたが、今後は、タグやセンサーのように容量は小さいけれども数が多いものから、データセンターのように非常に大きいものへ、また、ブロードバンドサービスも高度化していくというように、通信環境が随分変わってきています。従って、フォトニックネットワークの技術を用いて変化する通信環境にどうやって対応していくかが課題だと思っています。

デジタルコヒーレントのように長距離伝送の技術が進み、光のトランスペアレントの領域が広がっているという事実もあります。光の技術の進歩により、これまで県内面に導入してきた光伝送システムが、メトロ全域でもカバーできるのではないかと考えられるようになってきています。

課題は、光だけに 100Gbps を全部使わせても効率が悪いので、サービス側を見ながら集約していく、いわゆる集約型のトランスペアレントネットワークが非常に重要になってくるということです。そのためには光のマルチリングのようなシステム化技術と、電気技術を使ってレイヤー 2 も含めてアグリゲートがうまくできるシステム化ネットワークを考えていく必要があると思っています。

現在、日本で導入されているのは単一リングの ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) ですが、今後は複数リングを光で接続できるようなマルチディグリーの ROADM が主流になってくるでしょうし、北米では既に導入を開始しているところがあります。

光技術の中で見ると、マルチリングを実現するための多方路化等の光技術が重要となります。カラーレス、ディレクションレスをどこに使うのだという議論もありますが、今後メタラフィクをこの中で収容することが必要になった時には、光だけでうまく空いているリソースを使って伝送するという要求も増えてくるはずで、そういったところではカラーレスやディレクションレスはおそらく必須な技術になると考えています。

我々は光のスペクトルを柔軟に使うネットワークを構成できないかという、SLICE (Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network) の議論もしています。

SLICE の議論というのは、従来の光伝送システムは決められた波長グリッドの中に決められた形で入れており、どうしても大容量化したいとか、大容量でなくても良いが長距離伝送がした

いという要求があると、現在はビットレートと距離を考慮してシステムを設計しています。それに加えて、光のスペクトルをもう1つの軸に使うネットワークを構成することの可能性に関する議論です。

通信ネットワーク全体としては、コア系、メトロ系、アクセス系があります。

コアネットワークは非常に数の多い波長をいかに簡単に管理するかというのが重要になってくるので、波長をバンドルしてネットワークを簡略化する時代が来ると思います。

一方でメトロアクセス系はリソースの効率利用が重要なファクターですので、大容量で短距離伝送が良いというものから、容量は大量に必要ないが長距離伝送がしたいといった要求が顕在化しています。距離と容量だけでなく、光のスペクトルを柔軟に使うべく対応することの必要性が、今後起きてくるのではないかと思います。

まとめ

我々はフォトニックトランスポート技術の開拓により、経済的な光通信基盤網を世界に先駆けて構築してきました。

今後の通信環境を考えると光通信ネットワークの大規模化・高度化が従来以上に重要で、このため、さらなる経済化・高度化を目指した光通信基盤網構築、および国際競争力強化の観点でフォトニックトランスポート技術の推進は大変重要です。

今後10年、20年先を見た、デジタルコヒーレント技術をはじめとする革新的な長距離大容量光伝送技術の開発が必須だと思います。

サービスの高速化・多様化とともにフォトニックネットワークの高度化技術が鍵です。

今後もフォトニックトランスポート技術への期待は大きく、将来の豊かな社会構築へ向け従来以上に研究開発の加速化が必須だと思います。