

- **周波数利用効率1.6 bit/s/Hz, 世界最高密度の光多重伝送に成功  
—Cバンド波長帯で世界最大の毎秒6.4 テラビットの伝送容量を達成—**
  - 平成13年11月6日
- 

独立行政法人通信総合研究所(以下CRL、理事長:飯田尚志)は、大阪大学北山研一教授と共同で、光信号の周波数利用効率が世界最高となる1.6bit/s/Hzの高密度多重伝送に成功しました。40Gbpsの光符号分割多重信号を同一波長で4チャンネル多重化しさらに40波長多重化することで、Cバンド波長帯で世界最大容量となる6.4Tbpsの伝送実験に成功しました。研究成果は波長資源の有効利用に役立ち、光ファイバ伝送の大容量化やノードの光化などペタビット級フォトニックネットワークを実現するための基礎技術として期待されます。

## <背景>

政府が進めるe-Japan重点計画(高度情報通信ネットワーク社会の形成に関する重点計画)では、2005年までにペタビット級ネットワーク通信の基礎技術を確立し、2010年頃を目途に実用化を図ります。現在主流となっている波長多重(WDM:Wavelength Division Multiplexing)ネットワークにおいては、波長数を増やすことで大容量化が図られています。しかし、光ファイバ伝送における損失を補うための光増幅が可能な波長帯域は限られており、波長資源の枯渇化が懸念されます。光符号分割多重(OCDM:Optical Code Division Multiplexing)は、同一の波長で同一時刻に複数のチャンネルを多重できる特長があり、光ファイバ伝送の大容量化やノードの光化を実現するブレイクスルー技術として期待されています。

## <本成果の特長>

1チャンネルあたり40GbpsのOCDM信号を同一波長上に4チャンネル多重化し(1波長あたり160Gbps)、さらにこれを偏波多重との併用で100 GHzチャンネル間隔の40波長多重化する事で、1.6bit/s/Hzの周波数利用効率を達成し、Cバンド波長帯のみを利用して6.4TbpsのOCDM/WDM信号の80km伝送実験に成功しました。今回、飛躍的に周波数利用効率の向上を図れたのは、まず光符号方式として4相位相シフトキーイング(QPSK:Quaternary Phase Shift Keying)を用いて、同一波長に多重できる光符号数の増大を可能にし、効率的な光符号分割多重を行った事にあります。さらに受信部において電気処理を行わずに光のまま処理する超高速光信号処理技術として、光時間ゲート検波および光しきい値処理を適用し復号処理における雑音を大幅に抑制した点です。これにより、世界で初めて1.6bit/s/Hzの周波数利用効率での長距離伝送が可能になりました。この成果をオランダで開催された国際会議European Conference on Optical Communication(ECOC '01)のポストデッドライン論文として発表しました。

## <今後の発展>

CRLは、2005年までにペタビット級ネットワークの基礎技術を確立すべく、さらなる超大容量化・高機能化を目指します。また、11月14日に通信総合研究所で開催される第101回研究発表会において、講演「光信号処理を用いたフォトニックネットワーク基盤技術」を行います。

---

問い合わせ先:  
通信総合研究所基礎先端部門  
超高速フォトニックネットワークグループ 中條 渉

TEL:042-327-5552

---



## <用語解説>

**【周波数利用効率】**:周波数1ヘルツあたりのデータ信号量を表す。周波数の有効利用の指標として使われる。一般的な波長多重伝送では、0.2~0.4bit/s/Hz程度である。

**【Cバンド】**:光増幅器の性能から分けられた、光信号の波長バンドの1種。Center wavelength bandの略称。1530nm ~ 1565nm の35nm(約4.4THz)。

**【光符号分割多重】**:光多重通信方式の一種。送信側ではチャンネル毎に異なる光符号で信号を符号化し、受信側では同一の光符号を鍵として復号化することによって、同じ波長の信号を同時に複数のチャンネルに割り当てる新しいタイプの多重通信方式。

**【波長多重】**:光多重通信方式の一種。与えられた波長帯域を一定の波長間隔で異なる波長に分割して多数のチャンネルを割り当てる多重通信方式。商用WDMの現状は10Gbpsで160チャンネルの波長多重が行われている。

**【光時分割多重】**:光多重通信方式の一種。同じ波長の光信号を時間で分割し多数のチャンネルに割り当てる多重通信方式。商用TDMの現状は10Gbpsで現在40Gbps化の検討が進んでいる。

**【偏波多重】**:光多重通信方式の一種。互いに直交する2つの偏波を隣接チャンネルに割り当てることでチャンネルの周波数間隔を詰める多重通信方式。

**【ギガビット】**:Giga bps。bpsはデータ通信における情報の通信速度の単位であり、1秒間に通信することのできるビット数を表す。Gbpsは1秒間に10億ビットの情報を伝送すること。

**【テラビット】**:Tera bps。1秒間に1兆ビットの情報を伝送すること。

**【ペタビット】**:Peta bps。1秒間に1000兆ビットの情報を伝送できる速度。1000万世帯が超高速インターネットアクセス網(100メガビット/秒)に同時に常時接続できる。

**【QPSK】**:4相位相シフトキーイング。一般的には、デジタル信号をアナログ信号に変換する変調方式の一つ。4つの異なる位相にそれぞれ1つの値を割り当てることにより、1回の変調で4値(2ビット)のデータを送受信することができる。デジタル衛星放送やデジタル地上マイクロ波通信、ケーブル・モデム通信などに用いられている。ここでは、符号パルスのキャリア位相を4値に変化させて符号化を行っている。

**【干渉雑音】**:多重化された光符号を復号化する際、送信側の光符号と一致しない符号で処理された信号が生成する雑音。

**【光ノード】**:ネットワークの接続点(ノード)における様々な伝送処理において、光信号を電気信号に変換することなく光のままで行う技術。

**【時間ゲート】**:所望の時間だけ信号を通して、残りの時間は信号を通さないようにする技術。これにより、時間ゲート窓外の不必要な雑音量を減らすことができる。

**【光しきい値処理】**:受信デジタル光信号レベルを判定する際に、ある値以下を信号「0」、それ以上を信号「1」と判定することをしきい値処理という。これを超高速光信号処理技術を用いて光領域で行う事。

**【光ファイバの波長分散】**:光ファイバ中を伝搬する光の群速度が波長により異なること。

**【光ファイバの非線形性】**:光ファイバの屈折率が光パワーに依存して変化すること。

**【光信号処理】**:光信号を電気信号に変換することなく光のまま処理すること。ペタビット級の情報伝送を実現するためには必要不可欠な技術。

**【スーパーコンティニューム光】**:光信号のスペクトルを光ファイバの非線形性と波長分散を利用した光信号処理により、元の信号スペクトルよりも拡散させた光。

**【高非線形ファイバ】**:光ファイバの非線形性はフェムト秒の応答速度を有するため、超高速光信号処理に応用されることが多い。高非線形ファイバは、従来の光ファイバに比べて、5-10倍程度非線形を高めたファイバである。これにより、光源に要求されるパワーが小さくできたり、非線形ファイバの波長分散や偏波モード分散の影響を軽減でき、より柔軟な光信号処理が行える。

**【非線形ループミラー光スイッチ(時間ゲート用)】**:制御光により出力ポートを切り替えることができる、超高速光制御光スイッチの1種。光ファイバをカップラでリング上に結合し、信号光は時計方向および反時計方向の両方向周りに、制御光はどちらか一方方向に回るように構成する。光ファイバの非線形性を活用することにより、制御光と時間的に重なった信号光のみスイッチする事ができる。



**【非線形ループミラー光スイッチ(光しきい値処理用)】:** 信号光の入射強度に透過率が非線形に変化する、超高速光スイッチの1種。光ファイバをカップラでリング上に結合し、信号光は時計方向および反時計方向の両方向周りに回るように構成する。光ファイバの非線形性を活用することにより、カップラに分岐比率を若干変えることで、時計方向および反時計方向に回る光パルスが受ける位相変化量が変わり、強度によって透過率を制御することができる。

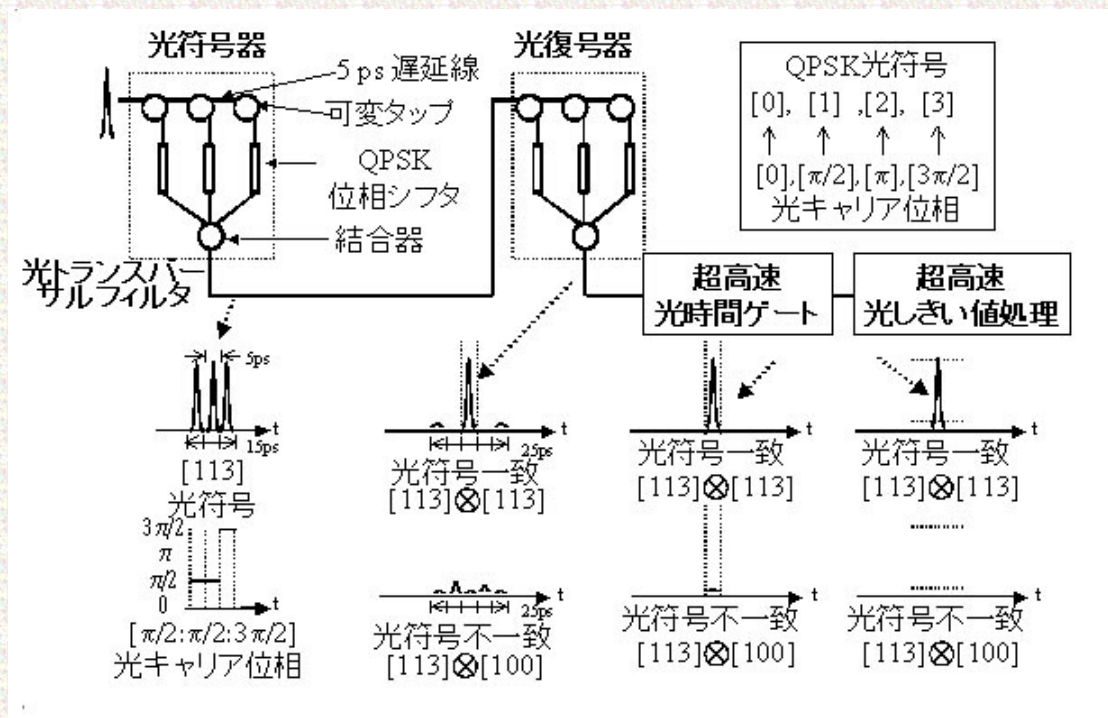


図1 QPSK光符号分割多重と超高速光時間ゲートおよび光しきい値処理による干渉雑音の低減

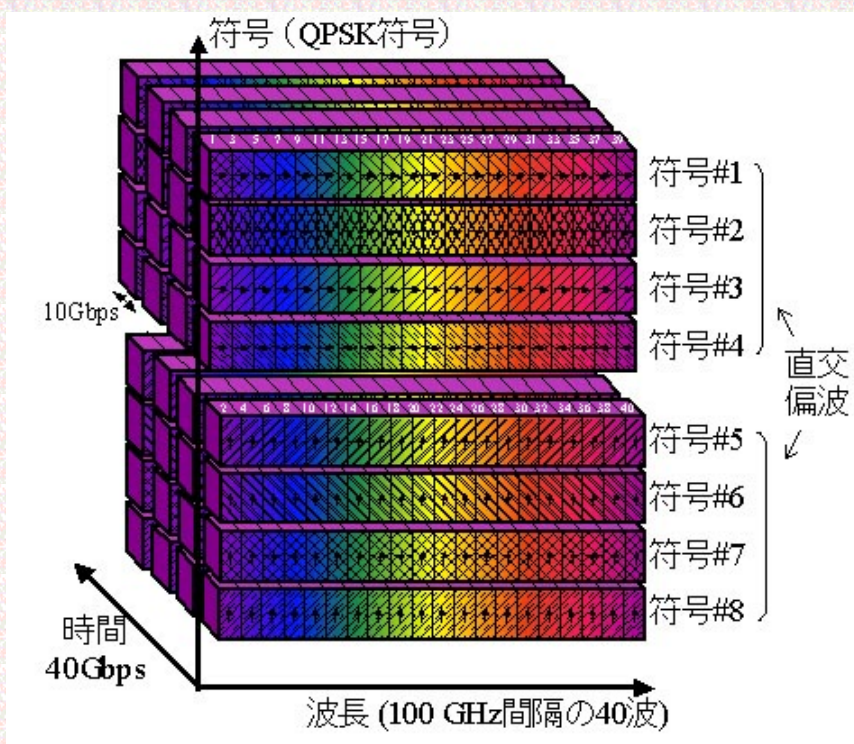


図2 周波数利用効率1.6bit/s/Hz、容量6.4Tbps (4 OCDM x 40 WDM x 40 Gbps)の多重信号

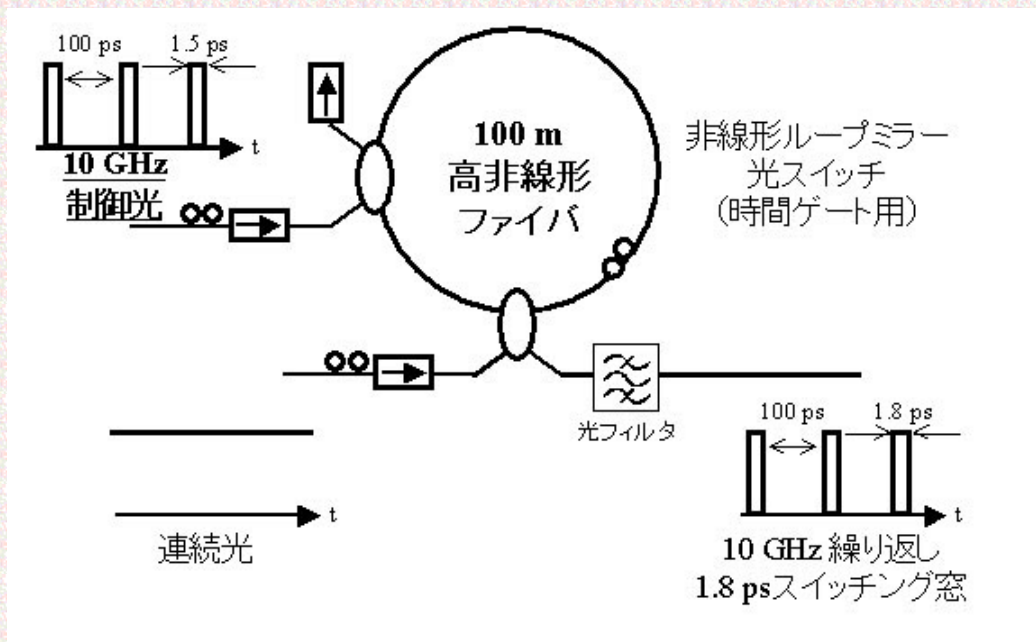


図3 広帯域テラビット級光時間ゲート

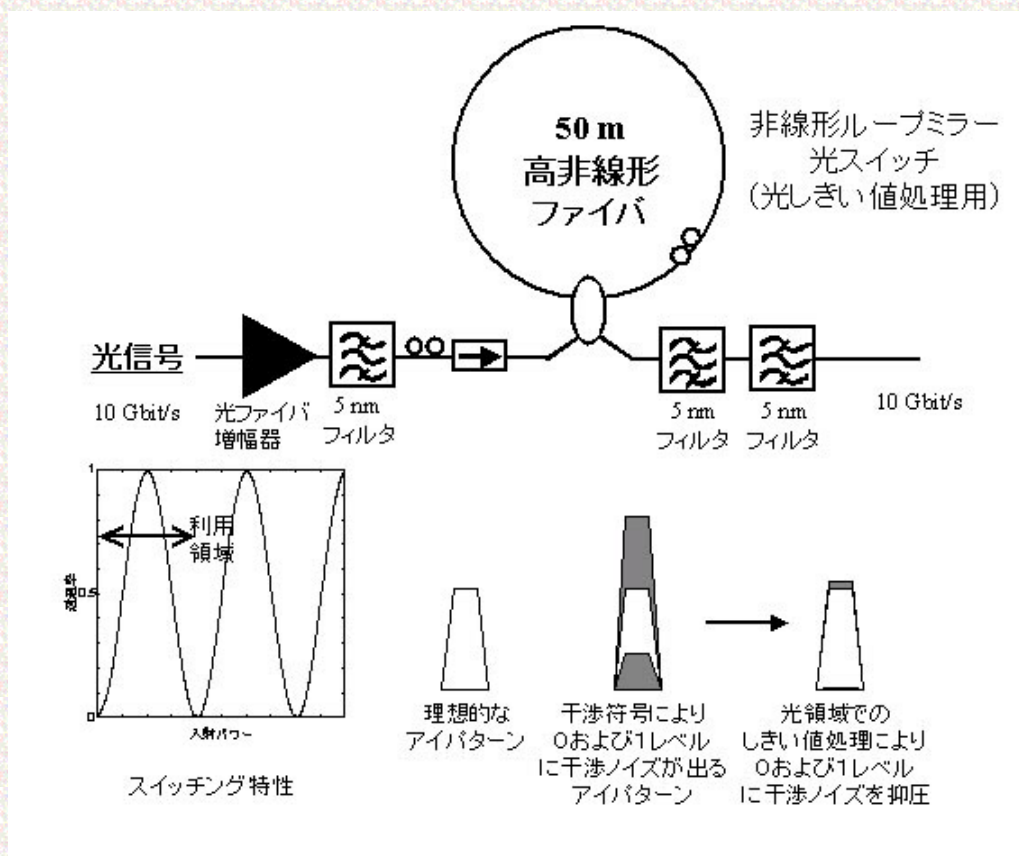


図4 帯域テラビット級光しきい値処理



## <補足説明>

通信容量増大に関しては、従来は光時分割多重(光TDM)と波長多重(WDM)の組み合わせにより大容量化が研究されてきました。しかしながら政府のIT(情報通信技術)政策にも述べられているように、今後、通信容量需要のさらなる加速が予想されます。従来の波長多重ネットワークにおいては、波長数を増やすことで容量拡大が図られてきました。しかし、光ファイバの伝送損失を補うための光増幅が可能な波長帯域は限られており、波長数増大による容量拡大もやがて波長資源の不足が顕在化すると考えられています。限られた波長帯域で容量を増大するには、波長資源の有効活用化が不可欠で、周波数利用効率の向上が期待されています。光TDMやWDMは、それぞれ時間フレーム、波長チャンネル間に信号チャンネル干渉をさけるためのガードタイム、ガードバンドが必要で、周波数利用効率の向上の点でも一長一短があります。今回、従来の光TDMやWDMとは全く異なる新しいブレークスルー技術としての光符号分割多重(OCDM)に超高速光信号処理技術を活用する事により、これまで困難とされてきた周波数利用効率の大幅な向上が可能となり、限られた波長帯域においても大容量化を飛躍的に推し進めることができました。

従来の光通信では、光TDMやWDMなどの光信号分離・多重方式が主に用いられています。光TDMでは、同じ波長の光信号を時間で分割し多数のチャンネルに割り当てる方式です。WDMは、与えられた波長帯域を一定の波長間隔で分割して多数のチャンネルを割り当てる方式です。これらの方式では、同一波長で同一時刻に複数の光信号を多重化することは原理的に不可能でした。これに対してOCDMは、送信側でチャンネル毎に異なる時間波形で符号化し、受信側で同一の符号を鍵として復号化することで情報信号を得る方式です。この原理を応用することの特徴は、送信側と受信側でペアにした固有の符号を用い多数のチャンネル信号を同じ波長帯で一本の光ファイバで同時に送ることができることで、超高速光信号処理技術を活用する事によりこれまで利用できなかったガードタイムやガードバンドを活用できることが挙げられます。これは、携帯電話の方式として近年実用化された無線の符号分割多元接続(CDMA)方式の光通信版と言えます。

CRLではこれまでもOCDMの研究を行い、周波数利用効率0.4bit/s/Hzにて1.52 TbpsのOCDM/WDM伝送の実証を行ってきました。今回、周波数利用効率の向上が図れたのは、技術的には2つの大きな特長があります。これまでは、光符号が光波の位相をゼロもしくは $\pi$ だけシフトさせた2相位相シフトキーイング(BPSK: Binary Phase Shift Keying)パルス列を用いていましたが、4相位相シフトキーイング(QPSK: Quaternary Phase Shift Keying)パルス列をあらたに適用しました。これにより、同一波長で多重できる符号数を増大することができ、光符号分割多重数をあげることができます。また光復号処理に加えて、光時間ゲートおよび光しきい値処理を併用することで、信号対干渉雑音を大幅に改善することができました。光時間ゲートにより、光ゲート窓外の雑音を除去することができます。また光しきい値処理により、光時間ゲート窓内に残存する干渉雑音によるデジタル信号「0」および信号「1」のパワー変動を抑圧することができます。これにより、干渉雑音が除去された超高速の光符号・復号化が可能になり多重数の増加が行え、周波数利用効率を向上することができました。

これらの光時間ゲートおよび光しきい値処理には、時間領域での超高速性が要求される上、広範囲の波長領域で同様の動作が可能な広帯域性が要求されます。今回の飛躍的な周波数利用効率向上には、超高速光信号処理技術が不可欠で、従来の光ファイバに比べて非線形性が大きい特殊なファイバを利用することで超高速光スイッチを構成し、広帯域にわたってテラビット級の時間ゲートおよび光しきい値処理を実現することができました。

通信容量需要の急激な拡大により、従来のWDM化による容量拡大だけでは波長資源枯渇化が懸念されています。今後は、OCDMを導入することにより、周波数利用効率を拡大することを目指すと共にさらなる大容量化を図ります。また、OCDMを波長多重にオーバーレイしたOCDM/WDM技術に基づき、ペタビット級の基幹ネットワークやギガビット級のアクセスネットワークの実現に向けた研究開発を実施します。