

従来の 20 分の 1 の変調速度で超高速通信を実現
—512 値の超多値コヒーレント光伝送に世界で初めて成功—

中沢 正隆

東北大学電気通信研究所 超高速光通信研究分野

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel: 022-217-5522, Fax: 022-217-5523

<成果の概要>

東北大学電気通信研究所の中沢正隆教授（光通信工学）の研究グループは、コヒーレント QAM (Quadrature Amplitude Modulation : 直交振幅変調) と呼ばれる伝送方式を用いて、1 シンボルで 9 ビット即ち 512 値に及ぶ超多値光伝送に世界で初めて成功しました。無線技術では 256QAM 等の技術が 1980 年代に開発されましたが、周波数が 1 万倍も高い光領域においてさらに多値度の高い 512 値の伝送が実現できることを実証したことは光通信の新たな展開を意味するものです。

512 QAM 方式を用いると、512 は 2 の 9 乗ですので 1 つの符号で一度に 9 ビットの情報を伝送することができます。従来の光通信では、1 回の変調で送ることの出来る情報は 1 ~ 2 ビットが限界でしたが、本研究では、512 QAM に偏波多重と呼ばれる手法を組み合わせることにより、一度に 18 ビットの情報伝送を世界で初めて実現しました。これは従来の約 5% の極めて低速な変調速度で高速光通信が実現できることを意味しています。現在実用化されている基幹系の光通信は 1 つの波長で毎秒 40 ギガビットの情報を伝送していますが、使用される電子デバイスの動作速度は 20~40 ギガヘルツと高速です。一方我々の実験では、毎秒 54 ギガビットの伝送を僅か 3 ギガ／秒の変調速度で実現しています。このような低速なデバイスでも超高速通信が可能になることから、本成果は光通信システムの低コスト化と低消費電力化に大きく貢献するものと期待されます。また、周波数帯域の利用効率は 13 bit/s/Hz に達し、従来技術の 10 倍以上の高効率化が実現できます。これにより限られた周波数資源を有効に活用することが可能となり、将来の通信トラフィックの増大に対して、十分な情報量の確保が期待されます。

<背景>

高精細の動画配信をはじめとするブロードバンドサービスの急速な普及に伴い、国内のインターネットを行きかう情報量は年率 40% の勢いで増加を続けています。このようなグローバルな情報量の増加に対応すべく、光通信はこれまで波長多重技術(WDM:

Wavelength Division Multiplexing)により毎秒テラビット(10^{12} ビット)を上回る大容量化を実現してきました。しかし、無尽蔵と思われていた光増幅器の帯域は限界に近づきつつあり、さらには波長多重数の増加により光ファイバへの入力パワーが1~2W程度に達すると光ファイバが熱破壊されるファイバフューズ現象が指摘されるなど、WDMだけでは将来予想される桁違いの情報量の拡大に対応することは困難となってきました。

さらに、伝送速度の高速化に伴い、光通信システムを支える電子デバイスにはより速い動作速度が要求されます。現在基幹系に用いられている光通信の伝送速度は1波長あたり40 Gbit/sであり、信号の変復調には20~40 GHzの高速なデバイスを用いています。もしこのような高速通信を数GHzの帯域の低速なデバイスで実現することが出来れば、安価で且つ低消費電力な光通信システムの構築が可能となります。

<従来の技術>

こうした状況を踏まえ、最近の光通信では限られた周波数帯域の中でできるだけ大容量の伝送を実現するための高効率な方式が競って研究開発されてきています。その特徴としては、従来の光通信のように単に光のオン・オフだけで情報を送る(OOK: On-Off Keying)のではなく、光の波としての性質を利用してその位相にも情報を乗せることにより周波数利用効率を向上させるものです。光の位相を検出するにはコヒーレント検波と呼ばれる高度な復調技術が必要ですが、近年のデジタル信号処理(DSP: Digital Signal Processing)技術の発展とともにDSPを駆使して復調処理を行なうデジタルコヒーレント伝送方式に高い関心が寄せられ、次世代の光通信技術として注目されています。特に光の振幅と位相の両方に多値の情報を乗せるQAM伝送方式は、シャノン限界と呼ばれる周波数利用効率の理論限界に最も近い高効率な方式として知られており、無線では広く用いられている技術です。しかし、今までの光通信ではこの技術を使えるところまで光技術が成熟しておりませんでした。我々は光通信におけるQAMの高い潜在性にいち早く着目し、2006年にコヒーレント光QAM伝送が原理的に可能であることを世界に先駆けて実証しています。今回はその無線技術をも凌駕する512QAM伝送に成功したものです。

QAMによって如何にして伝送の高効率化を図ることができるかを説明するために、一例として16QAM信号の生成の様子を図1に示します。周波数が等しく位相が互いに直交する2つの波をそれぞれ4値で振幅変調することにより、 $4 \times 4 = 16$ 個の信号点(符号)を定義することが出来ます。16は 2^4 に等しいことから、それぞれの点を2進法で表しますと1つの点(これを符号、英語ではシンボルと呼んでいます)で4ビット

の情報を一度に表現することが可能です。従来の光通信は1シンボルあたりONとOFFの 2^1 即ち1ビットの伝送であったのに対し、一般に 2^N QAMではN倍の情報を一度に送ることが出来ます。この多値度Nを如何に向上させるかが伝送の高効率化にあたって極めて重要なポイントとなります。

しかしながら、多値度の拡大とともに、シンボルを識別するために光信号の振幅・位相には高い精度が要求されます。そのため、従来は許容されていた光信号の強度雑音ならびに位相雑音であっても、超多値伝送においては大きな障害となります。強度雑音は、主として光伝送路中に挿入されている光増幅器から生じる自然放出光雑音がその主な要因です。位相雑音に関しては、レーザ光源自身が有している位相および周波数の揺らぎ、ならびに受信側でのコヒーレント検波に伴う位相の検出誤差が支配的な要因です。最近のデジタルコヒーレント伝送ではDSPを駆使して位相の推定を行なっていますが、その推定精度には限界があり復調後の信号には位相雑音が残留します。そのため従来技術では16~64値($N=4\sim6$)の伝送が限界です。

<今回の成果>

今回、QAMの多値度を512値($N=9$)まで大幅に拡大することに世界で初めて成功し、54 Gbit/sの伝送を僅か3 GHzの変調速度で達成しました。これは従来の約20分の1の変調速度で高速光通信を実現したことになります。また、このとき周波数利用効率は13 bit/s/Hzに達し、従来技術を10倍以上上回る高効率伝送が実現可能であることを明らかにしました。このようなことが光通信において可能であることは誰も予測しなかったことでもあります。今回の伝送実験系を図2に示します。本伝送技術の実現にあたってのポイントは以下の通りです。

(1) 周波数安定化レーザならびに光位相同期技術による位相雑音の低減

コヒーレント伝送用光源としては、我々が独自の技術で開発した周波数安定化ファイバレーザを用いています。通常の狭線幅半導体レーザではそのスペクトル幅は100~200 kHzが典型的な大きさであり、またその発振周波数も安定化されていません。一方、本レーザの発振周波数は光通信波長帯1.55 μm における波長基準であるアセチレン(C_2H_2)分子の吸収線に安定化されており、スペクトル幅4 kHz、周波数安定度 2×10^{-11} 以下という狭線幅且つ超高安定な出力特性を有しています。

さらに受信側では、光位相同期技術により高精度なコヒーレント受信(ホモダイン検波)を行なっています。ホモダイン検波では、QAM信号と受信部に置かれた局部発振器(LO: Local Oscillator)光とのビートにより信号光をベースバンド信号に変換し、デー

タを検出します。この際、信号光と LO 光との位相が同期していないと復調後の位相誤差となり、正確な復調が出来ません。そこで我々は、周波数を高速にトラッキング（追従）可能な LO を開発し、信号光と同じ性質を有するパイロットトーン信号に LO 光を高精度に同期させる光位相同期回路を実現しました。その結果、復調後のホモダイン検波時の位相揺らぎを 0.3 deg まで抑制することに成功しました。512 QAM においては隣接するシンボル間の最小位相間隔は 1.8 deg であることから、この位相揺らぎは 512 QAM 信号の復調に必要な許容位相範囲に比べて十分小さいものです。これにより 512 値の超多値化伝送を世界で初めて実現することが出来ました。

(2) 低非線形光ファイバならびにラマン光増幅器による光強度雑音の低減

512 値もの多値を一つ一つ区別して送るためには伝送信号の信号対雑音比(S/N 比)を十分確保する必要があります。このためには比較的高い伝送パワーで信号光を伝送させる必要がありますが、高い光パワーでは光ファイバ中における非線形光学効果により光の位相がパワーに比例して回転するという問題が生じます。512 値にも及ぶ超多値 QAM 伝送では僅かな位相回転であっても信号の検出に大きな影響を及ぼします。そこで我々は、幾つかの新技术を採用してシステムの高 S/N 化を図りました。

まず最初は非線形性を通常の光ファイバより 30%低減した SLA (Super Large Area) と呼ばれる低非線形光ファイバを新たに用い、非線形光学効果の抑制を図りました。次に、S/N 比を向上させるために、伝送路中の光増幅器として従来のエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-doped Fiber Amplifier)に新たに分布ラマン光増幅を併用することにより、光増幅器の低雑音化を図りました。その結果、EDFA のみを使用した場合に比べて光 S/N 比を 4 dB (2.5 倍) 改善することに成功しました。さらにこれらの改善に加え、光伝送路中の波長分散ならびに非線形光学効果による波形歪みを DSP により補償し、伝送性能を向上させました。

このようにして得られた 512 QAM 信号のコンステレーションマップ（信号配置）を図 3 に示します。図 3 (a)は伝送前、図 3 (b)は 150 km 伝送後の結果です。150 km 伝送後もコンステレーションマップ上の各点が信号判定に十分な程度に区別できています。符号誤り率の測定結果を図 4 に示します。伝送後の誤り率は 10^{-3} 以下の値が得られています。この誤り率は、現在実用化されている符号誤り訂正(FEC: Forward Error Correction)技術を用いることで完全に誤り無く伝送可能なレベルです。

本伝送では、3 G シンボル/秒のシンボルレートで 54 Gbit/s の伝送速度を実現しています。即ち、512 QAM は 1 シンボルあたり 9 ビットを伝送でき、さらに直交する 2 つの偏波を伝送に用いる偏波多重方式により伝送速度をさらに 2 倍に出来ることから、

伝送速度は $3 \text{ Gsymbol/s} \times 9 \times 2 = 54 \text{ Gbit/s}$ となります。この伝送速度は、現在実用化されている最も高速な基幹系の光通信(40 Gbit/s)より高速ですが、使用したデバイスの動作速度は 3 GHz と低速であり、伝送速度の約 20 分の 1 に抑えられている点が大きな特徴です。本伝送ではこの信号を僅か 4.1 GHz の周波数帯域で伝送することが出来、その結果周波数の利用効率は $54 \text{ Gbit/s} \div 4.1 \text{ GHz} = 13.2 \text{ bit/s/Hz}$ にも達します。これは世界最高の周波数利用効率であり、光通信でも無線と同等あるいはそれ以上高効率伝送が出来ることを示したもので、極めて重要な成果であると言えます。

<今後の展望>

本伝送技術の実用化により、従来の OOK 方式に比べて 10 倍以上の周波数利用効率が実現可能になります。このことは、限られた周波数帯域の中であっても 10 倍以上の大容量化が実現できることを意味しています。これにより、超高精細動画像の伝送や 3 次元画像などの超臨場感通信などの大容量トラフィックを基幹光ネットワークにおいて効率よく収容することが可能になります。さらに、本伝送技術は高速の伝送をその伝送速度の約 1/20 の低速なデバイスで実現できることから、伝送システムの低消費電力化にも大きく貢献することが出来、グリーン ICT の観点からも大変魅力的です。現状では QAM 信号の復調を DSP によるソフトウェア処理で行っておりオフライン状態での伝送ですが、今後オンラインでの高速伝送を行なうためには高速な信号処理デバイスの開発が重要です。

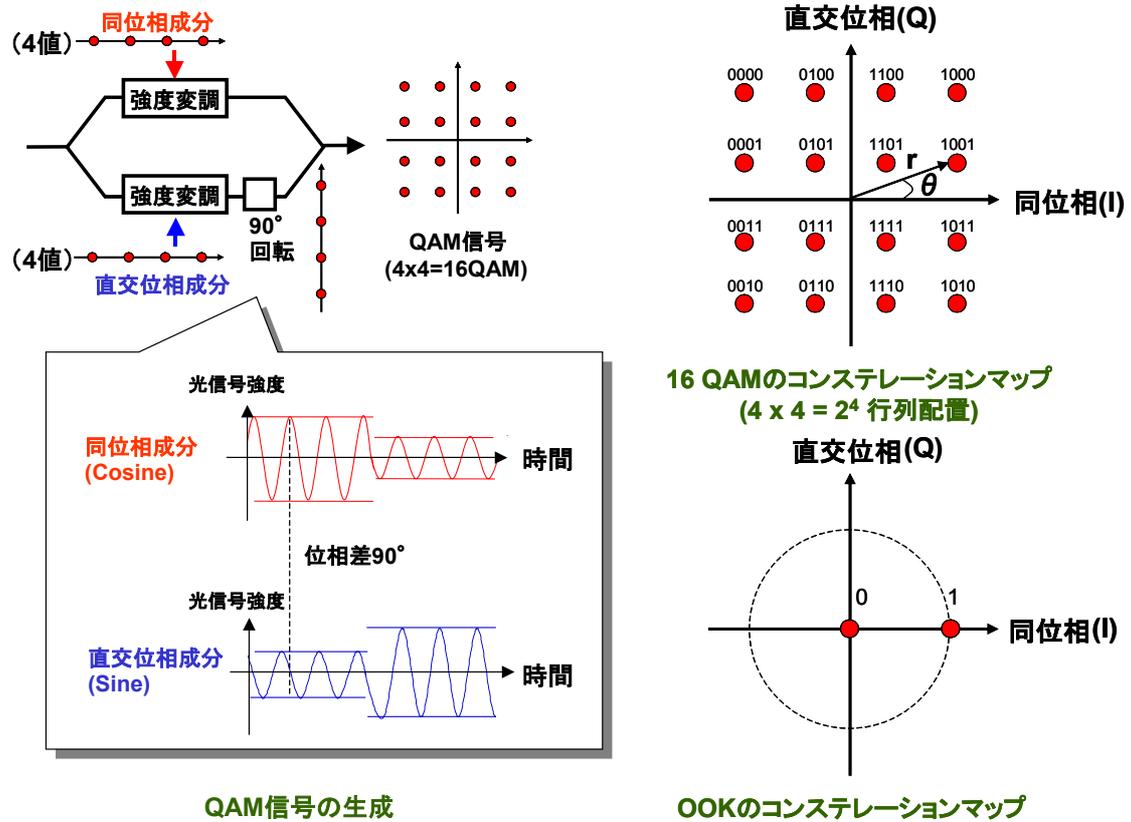


図1 16 QAM 信号の生成の様子とそのコンステレーションマップならびに OOK との比較

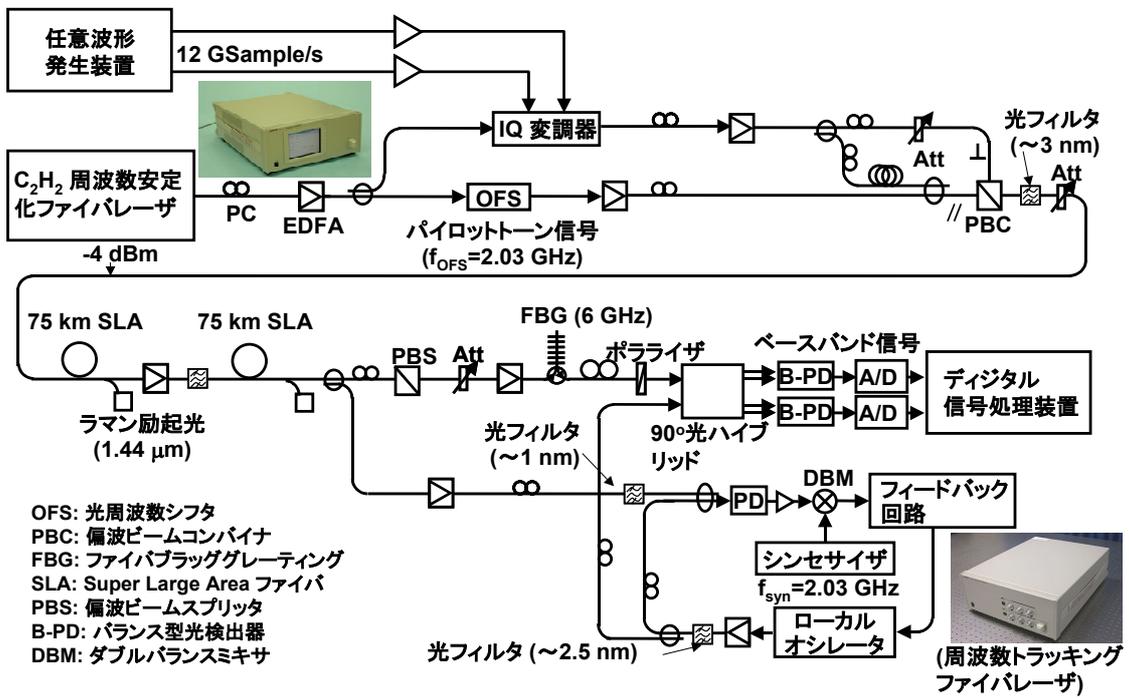
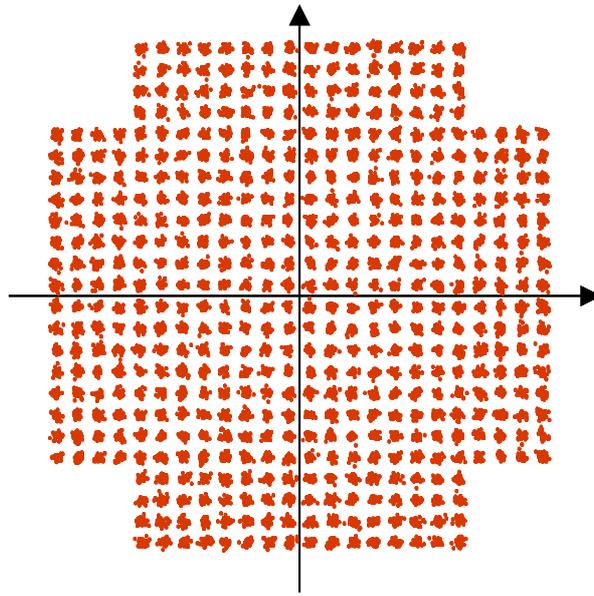
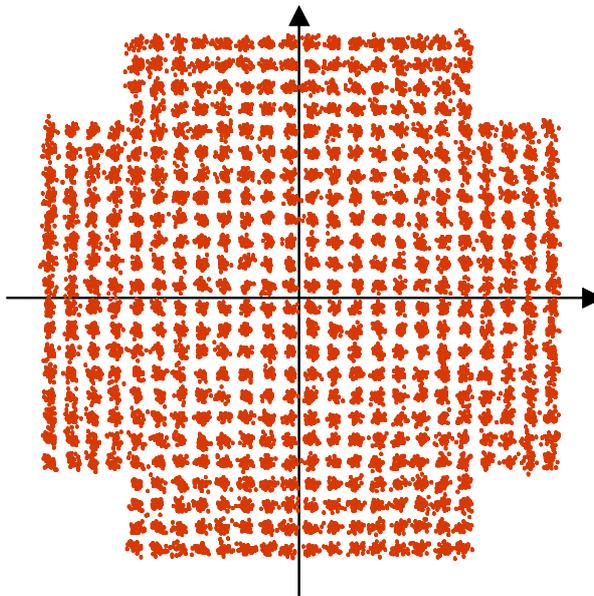


図2 512 QAM (54 Gbit/s)信号の 150 km 伝送実験系



(a)



(b)

図3 512 QAM 信号のコンステレーションマップ (a) 伝送前 (b) 150 km 伝送後

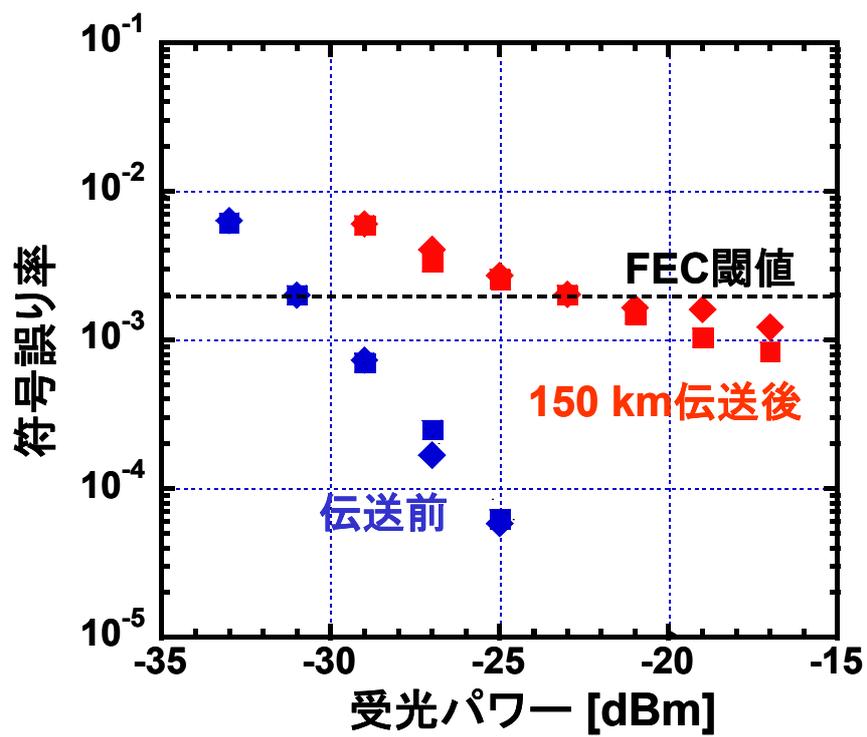


図4 符号誤り率測定結果