

周波数の利用効率を 10 倍向上させる新たな光通信方式を開発
—コヒーレント QAM 光伝送技術の実現—

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、従来 1 bit/s/Hz 程度であった光通信の周波数利用効率を 10 bit/s/Hz と 10 倍に引き上げるコヒーレント QAM (Quadrature Amplitude Modulation : 直交振幅変調)光伝送と呼ばれる新たな超高密度通信方式の研究開発に成功した。

従来の光通信技術では主に光パルスのある(ON)、なし(OFF)をもとにしたOOK (On-Off Keying) 伝送が主流であったが、その周波数の利用効率は 1 bit/s/Hz以下と低かった。最近になりDPSK (Differential Phase-Shift-Keying), DQPSK (Differential Quaternary Phase-Shift-Keying)などパルス間の位相差を利用する方法が出現し、周波数の利用効率を増加させる研究が盛んになってきていた。今回成功したコヒーレントQAM伝送は、 2×10^{14} Hzで振動する光電界の位相と振幅にそれぞれ独立に情報をのせ、周波数利用効率を 1 桁近く向上させたものである。この技術は多値伝送と呼ばれるもので、マイクロ波通信では既に利用されてきているが、これを光の周波数領域において世界で初めて 128 値の多値伝送に成功したもので、新たな高効率通信の出現として期待される。

<研究の背景>

通信における周波数帯域は、情報システムあるいはネットワークにとって大切な資源であり、この帯域を如何に効率よく利用するかが、大容量の情報を各家庭に送るために重要な課題であります。無線通信は限られた周波数帯域のもとできるだけ大きな容量を送るために、QAM (Quadrature Amplitude Modulation)やOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)のような伝送方式が既に開発されており、次世代の携帯電話にはOFDMが採用されようとしています。QAMやOFDMは多値伝送技術と呼ばれ、電磁波の安定な位相と振幅をいくつにも分けて、その分け方の多さから周波数の利用効率を上げようというものです。例えばQAM方式による周波数利用効率の増加法を図1に示します。図1では64QAMと呼ばれる伝送状態を示していますが、64というのは 2^6 ですので、それぞれの点を2進法で表しますと64は6ビットの情報を送れるようになります。一方従来の方式ではON-OFFの2つの状態ですから 2^1 の1ビット伝送に過ぎません。従って 2^N QAMは従来の方式に比べてN倍の情報量が送れることとなります。

無線では限られた帯域内での高効率伝送のために256QAM技術が開発されています。しかし、今までに搬送波として光の周波数(2×10^{14} Hz)に直接この方法を適用することは不可能と思われていました。

<従来の技術>

従来の光通信ではやっとDPSKやDQPSKが使われ始めましたが、光の電磁波としての位相に情報をのせる技術はまだ開発されていませんでした。光ファイバ増幅器(EDFA)が開発される以前に、1ビット当りのフォトン数を出来るだけ少なくできる高S/N通信を実現しようとする気運もありましたが、EDFAにより同程度の受光感度が実現されたため、それ以上の進展はありませんでした。

その一方で無線技術の光への応用という意味で、光をマイクロ波の周波数で振幅変調し、その周波数に対してQAM伝送を行う、いわゆるサブキャリア伝送技術が開発されてきました。しかし、この技術は光通信の周波数利用効率を向上させるためではなく、無線の情報を光に変換して、光ファイバネットワークを介して無線のとどきにくい所に送ったに過ぎませんでした。これは光無線(Radio on fiber)と呼ばれる技術であります。

即ち、光のキャリアの位相そのものに情報をのせるには、無線で開発したコヒーレントな位相伝送技術を光領域に拡大し、光源の周波数の安定性を大幅に向上させる必要がありました。

<本技術>

東北大学電気通信研究所では光の周波数安定度が 10^{-11} と非常に安定なレーザ光源を開発してきました。このレーザを用いますと、光位相が安定していますのでマイクロ波同様多値の情報をのせることが出来ます。問題となりますのは無線の中間周波数(IF)に対応する安定な基準周波数の発生ですが、これはローカルオシレータ(局発光)を用いた高速な光PLL(Phase Locked Loop)を用いて無線のIF周波数と同じ精度まで安定化させています。

またマイクロ波信号を光の位相と振幅に直接射影し、QAM方式で変調するために、マッハツェンダ型の変調器を3つ集積化した複合マッハツェンダ光変調器を利用しています。

これらの技術を組み合わせることにより、最初1 Gsymbol/s 64QAMで3 bit/s/Hz、偏波多重を

用いた方式で 6 bit/s/Hz、さらに信号帯域の狭窄化により 8 bit/s/Hz の伝送実験に順次成功してきました。本ニュースリリースでは多値度を 128 に拡大し、周波数利用効率を 10 bit/s/Hz まで向上することに世界で初めて成功しました。これらの成果は昨年の ECOC ならびに今年の OFC 国際会議で、光通信の目指す新たな方向として注目されています。1 Gsymbol/s, 128 QAM 信号の 160 km 伝送実験の構成を図 2 に示します。また伝送実験の様子を写真に示します。QAM 伝送の実現にあたり我々が新たに開発した要素技術を以下に詳しく説明します。

<新たな技術>

(1) C₂H₂分子吸収線を用いた周波数安定化レーザ

今回コヒーレント伝送用光源として用いたレーザは、我々が独自の技術（知的クラスタープロジェクト）で開発した周波数安定化ファイバレーザです。レーザの発振周波数をアセチレン(C₂H₂)分子の吸収線に安定化し、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レーザを世界で初めて実現しました。これにより光波をマイクロ波のように扱う新しいコヒーレント光通信技術を実現することが初めて可能になりました。

(2) 複合マッハツェンダ変調器による QAM 変調

QAM 変調部では、任意波形発生装置で発生させた多値符号によって、レーザ光の同位相成分(I)と直交位相成分(Q)を変調し、128QAM 信号光を発生させています。我々がこの QAM データ変調に用いた変調器は、複合マッハツェンダ変調器と呼ばれる集積型光変調器です。この変調器には、マッハツェンダ変調器の各アームに 1 台ずつ別のマッハツェンダ変調器が入れ子状に配置されています。これはもともと単一側波帯(SSB)変調器として開発されたものでしたが、我々は本変調器により光の同位相成分、直交位相成分をそれぞれ独立に変調することによって QAM のようなコヒーレント多値変調が可能であることを明らかにしました。変調器の周波数特性を改善することにより、128 QAM のような複雑なデータ信号に対しても高品質な光変調を実現しました。

(3) 安定な中間周波数 (IF 信号) 発生回路

QAM信号の受信にはヘテロダイン検波が用いられます。ヘテロダイン検波においては、受信部に置かれたローカルオシレータ光とのビートにより、信号光を中間周波数IF（2つの光の周波数差に相当するマイクロ波の周波数）に変換し、信号を復調します。ここで鍵になるのはローカルオシレータ光の位相同期技術です。ヘテロダイン検波においては、伝送後の信号とローカルオシレータとの位相が同期していないと、IF信号の位相が揺らいでしまい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することが可能なローカルオシレータを開発し、信号と同時に伝送させたパイロットトン信号にローカルオシレータ光を高精度に同期させる光位相同期ループを実現しました。その結果、160 km伝送後のIF信号の位相揺らぎを 6×10^{-3} radに抑制することに成功しました。この位相誤差は 128 QAM信号を復調するのに十分小さい大きさです。

(4) DSP (Digital Signal Processor)を用いた信号処理技術

IF 周波数に変換した QAM 信号は、同位相(I)成分および直交位相(Q)成分を復調した後、I, Q それぞれの多値の信号を 2 値のバイナリ信号に変換する必要があります。現状ではこれらの信号処

理をハードウェアで実現する高速な電子デバイスが存在しないため、我々は今回デジタル信号処理(DSP)によるソフトウェア処理を駆使した復調回路を構成しました。本デジタル復調回路では、ヘテロダイン検波した IF 信号をまず A/D 変換器でデジタル信号に変換し、ソフトウェア上でクロック抽出ならびに I, Q 成分の復調を行なった後、バイナリ信号に変換しています。

このようにして得られた 128QAM 信号のコンスタレーションマップならびにアイパターンを図 3 に示します。160 km 伝送後もコンスタレーションマップ上の各点が明確に区別でき、アイパターンにおいても信号判定に十分なアイ開口が得られていることが判ります。

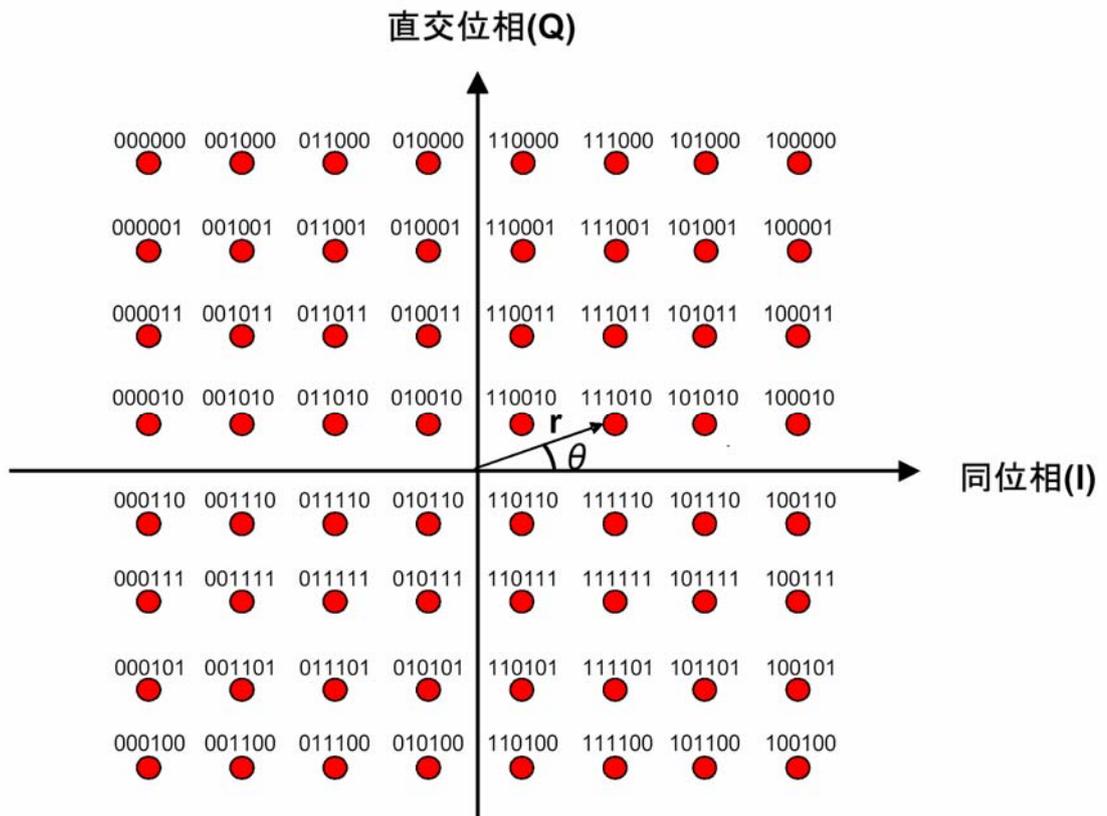
<本技術の将来展望>

周波数安定化レーザを用いたコヒーレントQAM方式は周波数の利用効率が大幅に向上するために、例えば 1 GHzの帯域で 10 Gbit/sの伝送が可能となります。従って次世代FTTHあるいはNGA (Next Generation Access Network)のように、大容量な情報を狭い帯域で各家庭に送ることが出来れば、大変大きなメリットと言えるでしょう。

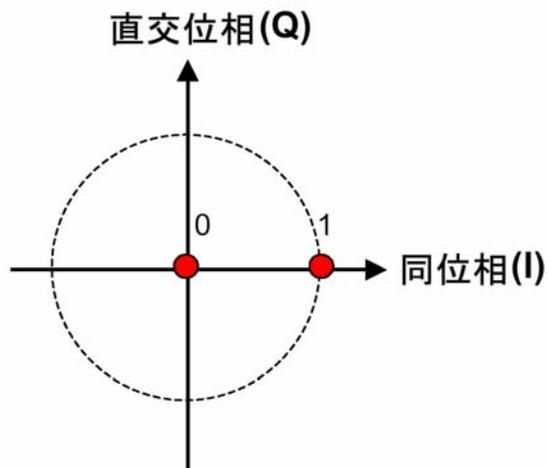
今まで無線では 1 Gsymbol/s のような高速伝送は必要としていませんでしたので、このような信号を復調する電子デバイスは必要ありませんでした。このため受信部においては DSP によるソフトウェア処理を用いており、on-line の高速伝送を行うためには QAM 用の電子デバイスの高速化が重要です。今後、光と無線がコヒーレントな波として融合するためには高速電子デバイスの開発が不可欠であります。

真の無線技術と光技術の融合はこのコヒーレント QAM 技術からスタートするといっても過言ではありません。





(a) 64 (= 2⁶) QAM信号



(b) 従来のバイナリ信号

図1 64 QAM 信号および従来のバイナリ信号のコンスタレーションマップの比較

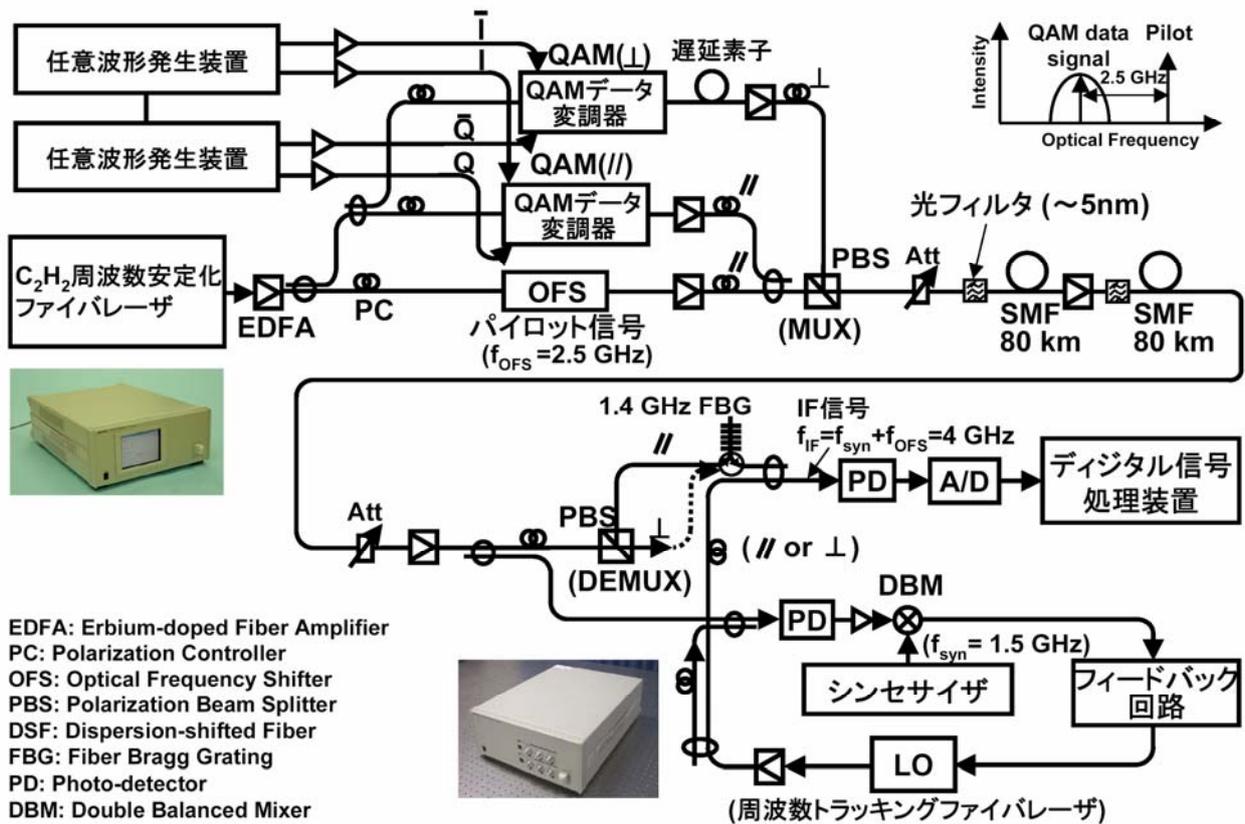


図2 1 Gsymbol/s, 128 QAM 信号の 160 km 伝送実験系

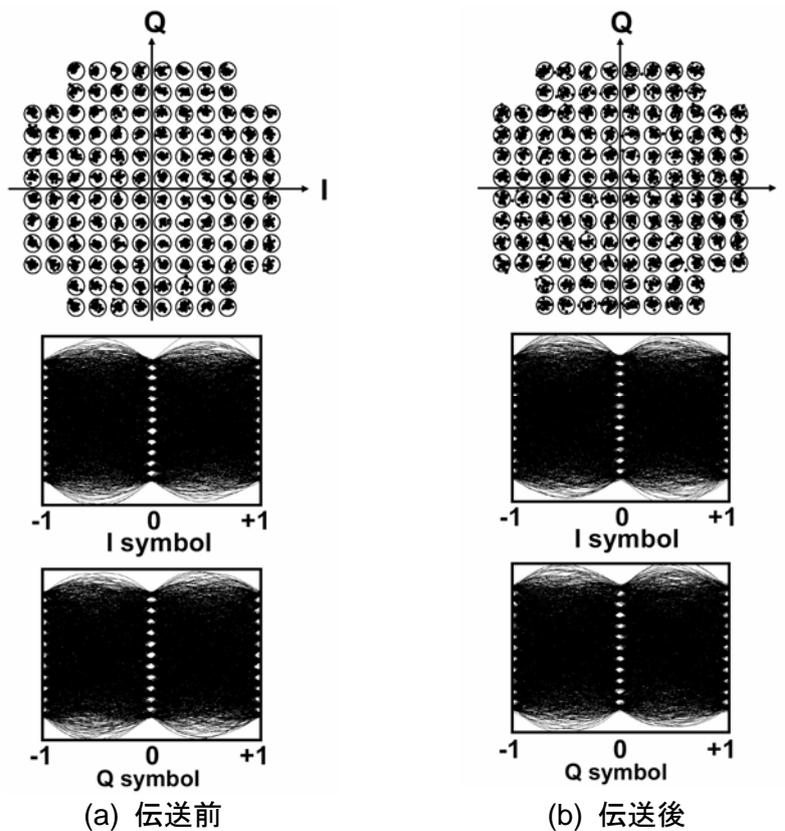


図3 伝送前後における 128 QAM 信号のコンスタレーションマップおよびアイパターン

照会先

東北大学電気通信研究所（中沢正隆）
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
Tel: 022-217-5522, Fax: 022-217-5523
E-mail: nakazawa@riec.tohoku.ac.jp