

氏名	おおみやたつりの 大宮達則		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成25年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	高い周波数利用効率を有する光OFDM伝送に関する研究		
指導教員	東北大学教授 中沢 正隆		
論文審査委員	主査 東北大学教授	安達 文幸 東北大学教授	山田 博仁
		東北大学准教授	吉田 真人

論文内容要旨

第1章 序論

近年ブロードバンド通信の急速な普及に伴い、その基盤となる光ファイバネットワークの大容量化が重要になってきている。従来の On-Off-Keying (OOK) 伝送方式では、光増幅器の帯域限界や光ファイバが溶けるファイバフュージョン現象による伝送可能な光電力の上限により、一本の光ファイバで伝送できる容量は限界に近付きつつある。そのため周波数利用効率の向上を目的として超多値変調を用いたデジタルコヒーレント光伝送技術に高い関心が寄せられている。これまでにコヒーレント光 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)あるいは直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送方式により 10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率を実現されているが、このような超多値光信号を 1 Tbit/s 以上の伝送容量で 500 km 以上長距離伝送させることは困難であった。本研究では光 OFDM 伝送方式における多値度の増大、ならびに周波数領域等化 (FDE: Frequency Domain Equalization) 法および逆伝搬法による高精度な波形歪み補償技術を組み合わせることにより、14 bit/s/Hz の高い周波数利用効率を有する 1 Tbit/s、256 QAM-OFDM 信号の 560 km 伝送を実現している。

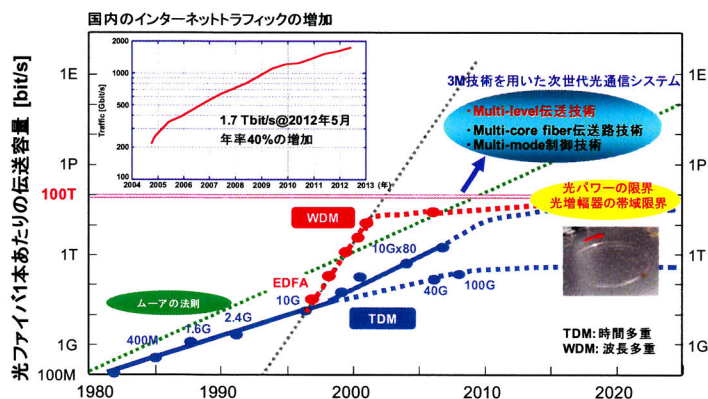


図1 日本国内のインターネットトラフィック量の推移

第2章 コヒーレント光 OFDM 伝送システムの要素技術

本章では、本研究で用いている OFDM 方式と従来から用いられているシングルキャリア伝送方式について比較し、OFDM 方式の優位性を示している。そして本研究の伝送システムを構成する要素技術である高い周波数利用効率を有する超多値伝送に不可欠な周波数安定化レーザ光源、および光 PLL (Phase-Locked Loop) による高精度光位相同期技術について述べている。図 2 にこれらの要素技術を用いたコヒーレント光 OFDM 伝送系の構成を示す。また、FDE 法による光および電子デバイスの周波数依存性に起因した波形歪みの補償ならびに逆伝搬法による光ファイバ伝送路中の分散および非線形歪み補償の原理を述べ、これらの手法が超多値光伝送の性能向上に大変有効であることを示している。

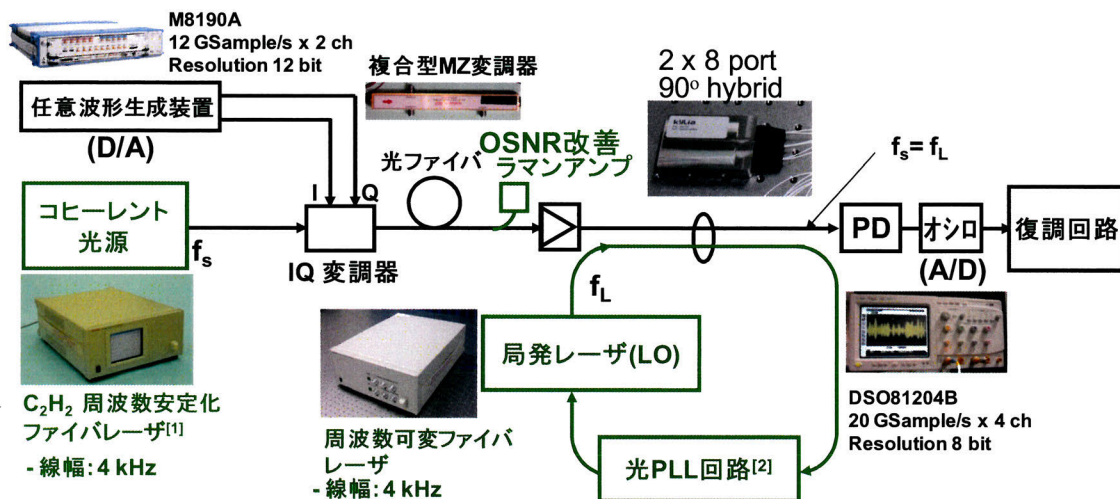


図 2 コヒーレント光 OFDM 伝送系の構成

第3章 光サイドバンドを用いた 420 Gbit/s, 64 QAM-OFDM 伝送実験

本章では光サイドバンドを用いて伝送容量を増大させた 420 Gbit/s, 64 QAM-OFDM 伝送実験について述べた。FFT サイズが 1024 点の設定で生成した OFDM 信号に対し FDE 法による波形歪み補償を適用し、Back-to-back 時の復調特性の改善を図った。FDE 適用前後のコンステレーションマップを図 3 に示すが、FDE を用いることで EVM 値を 5.1 から 3.7 % に低減した。さらに、160 km 伝送後の受信信号に対し逆伝搬法による波形歪み補償を適用し、BER が 2×10^{-3} (FEC リミット) におけるパワーペナルティを 3.3 から 1.2 dB に低減した。これらの波形歪み補償技術を用いて、10 bit/s/Hz 以上の高い周波数利用効率を有するコヒーレント伝送において 400 Gbit/s 以上の伝送容量を初めて実現した。

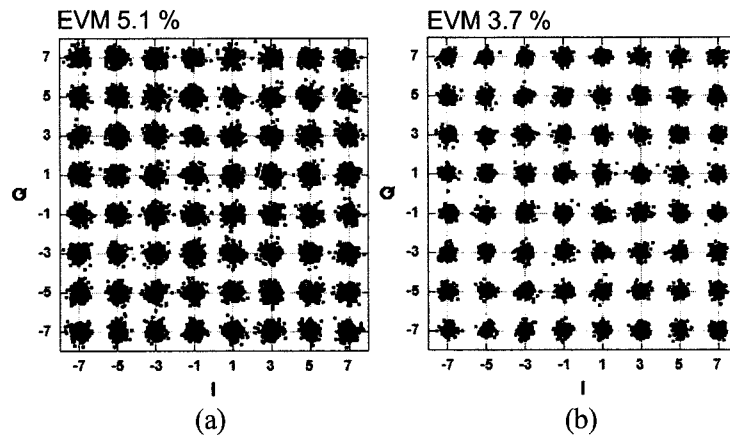


図3 Back-to-back 受信時の復調信号のコンステレーション(a)FDE 適用前、(b)適用後

第4章 400 G~1 Tbit/s, 256 QAM-OFDM 伝送実験

本章では多値度を 64 から 256 値へ増大させて行った、400 G~1 Tbit/s, 256 QAM-OFDM 伝送実験について述べた。まず多値度を向上させるために FDE 法による波形歪み補償効果の改善を図った。OFDM 信号の FFT サイズを 1024 から 8192 点に拡大することで、FDE による波形歪み補償時の周波数分解能を 11.7 から 1.47 MHz に高め、その結果、Back-to-back 復調時の EVM を 1.46 から 1.14% に低減することに成功した。さらに複数シンボル周期のデータに対し一括で FDE を適用する方法を新たに採用し、これにより OFDM 信号を形成する各サブキャリア信号に割り当てられる FDE 補償時の補正点数を拡大した。その結果、Back-to-back 復調時の EVM 値をさらに 0.82 % にまで低減することに成功した。これらの FDE 補償効果の改善の後に、伝送容量が 400 Gbit/s の 256 QAM-OFDM 伝送実験を行い、14.0 bit/s/Hz の高い周波数利用効率で 720 km の長距離伝送を実現した。このとき、周波数利用効率と伝送距離との積は 10,080 km · bit/s/Hz に達し、10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率を有するコヒーレント伝送システムでは最大の値を実現した。さらに、OFDM 信号のシンボルレートと光サイドバンド数を増大させ、その伝送容量を 1 Tbit/s まで拡大させた 256 QAM-OFDM 信号の長距離伝送実験を行い、560 km 伝送時に FEC リミット以下の BER を達成した。10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率を有する伝送システムにおいて、伝送容量が 1 Tbit/s のデータの 500km 以上の長距離伝送実験は初めてのものであり、本 OFDM 伝送システムの高い有効性を示した。

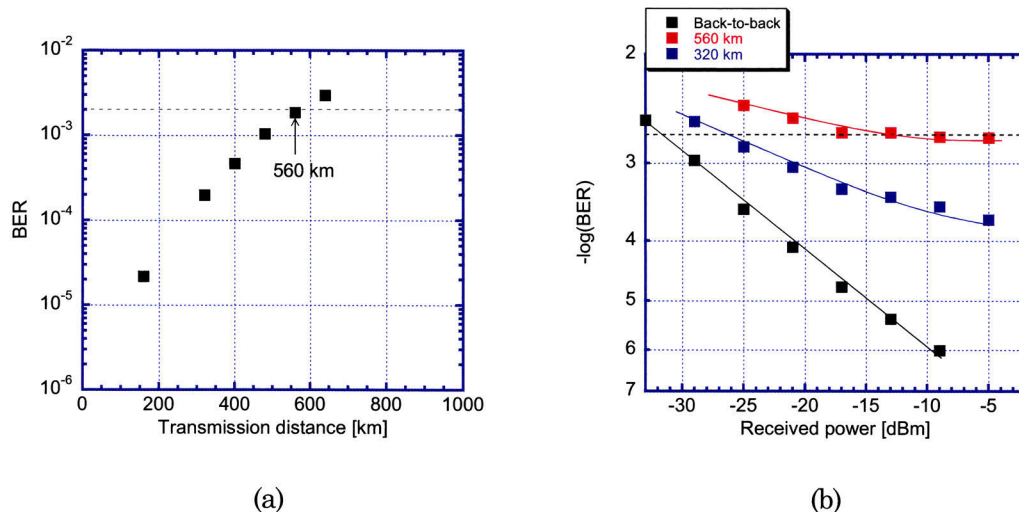


図 4-25 伝送距離(a)および受信パワー(b)に対する BER 特性

第 5 章 OFDM 伝送特性の数値解析

本章では、4 章で述べた 256 QAM-OFDM 伝送の復調特性について数値解析を行なった結果について述べた。まず、1 Tbit/s, 256 QAM-OFDM 伝送特性について、数値解析結果と実験結果がよく一致することを示した。つぎに伝送距離の制限要因について数値解析をもとに考察した。その結果、Back-to-back 復調時に残留する波形歪みの影響に比べ、光ファイバ伝送路中の非線形光学効果による影響が強いことを明らかにした。また、伝送距離の拡大に向けた対策の 1 つとして、光ファイバの非線形係数を低減させることによる復調特性の改善効果について数値解析した。現在使用しているファイバ($\gamma=1.35$ /W/km)の代わりに大コア径($A_{\text{eff}}=120\mu\text{m}^2$)を有する γ が 0.8 /W/km と低いファイバを伝送路に用いることで、伝送可能な距離を 600 km から 780 km へ拡大できることを明らかにした。もう一つの対策として、A/D の ENOB の値をパラメータとして数値解析を行った。ENOB の値を現行の 5.8 bit から 8 bit に改善することで、伝送可能な距離を 600 km から 890 km へ拡大できることを明らかにした。言い換えると A/D 変換の際にアナログ信号を高精度でデジタル化することで逆伝搬法による非線形光学効果に対する波形歪み補償精度が増大し、その結果伝送距離を大幅に拡大できることを明らかにした。さらに、チャンネル数を 200 に増大させた 10 Tbit/s, 256 QAM-OFDM 信号の伝送特性を解析し、伝送容量を拡大するための課題について考察した。以上の結果より、非線形光学効果による波形歪みに対する補償効果の改善が大変重要であることが分かった。

第 6 章 結論

本章では本研究の成果を総括するとともにコヒーレント光 OFDM 伝送における今後の課題についてまとめている

論文審査結果の要旨

近年ブロードバンド通信の急速な普及に伴い、その基盤となる光ファイバネットワークの大容量化が重要になってきている。従来の On-Off-Keying (OOK) 伝送方式では、光増幅器の帯域限界や光ファイバが溶けるファイバフューズ現象による伝送可能な光電力の上限により、一本の光ファイバで伝送できる容量は限界に近付きつつある。そのため周波数利用効率の向上を目的として超多値変調を用いたデジタルコヒーレント光伝送技術に高い関心が寄せられている。これまでにコヒーレント光 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)あるいは直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送方式により 10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率が実現されているが、このような超多値光信号を 1 Tbit/s 以上の伝送容量で 500 km 以上長距離伝送させることは困難であった。著者は光 OFDM 伝送方式における多値度の増大、ならびに周波数領域等化 (FDE: Frequency Domain Equalization) 法および逆伝搬法による高精度な波形歪み補償技術を組み合わせることにより、14 bit/s/Hz の高い周波数利用効率を有する 1 Tbit/s、256 QAM-OFDM 信号の 560 km 伝送を実現している。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 6 章より成る。

第 1 章は序論であり、超多値コヒーレント光通信に関する研究動向について述べ、本研究の目的と位置づけを明らかにしている。

第 2 章では、高い周波数利用効率を有する超多値伝送に不可欠な周波数安定化レーザ光源、および光 PLL (Phase-Locked Loop) による高精度光位相同期技術について述べている。また、FDE 法による光および電子デバイスの周波数依存性に起因した波形歪みの補償ならびに逆伝搬法による光ファイバ伝送路中の分散および非線形歪み補償の原理を述べ、これらの手法が超多値光伝送の性能向上に大変有効であることを示している。

第 3 章では、7 チャンネル周波数分割多重 420 Gbit/s、64 QAM-OFDM 伝送実験について述べている。FDE 法および逆伝搬法による波形歪み補償技術を用いることにより、10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率で 400 Gbit/s 以上の伝送容量を初めて実現している。

第 4 章では、64 から 256 QAM へ多値度の増大による 1 Tbit/s への高速化について述べている。FDE の高分解能化を図り、その波形歪み補償効果を大幅に改善することにより多値度を 256 まで拡大し、その結果 14 bit/s/Hz という高い周波数利用効率で 400 Gbit/s、256 QAM-OFDM 信号の 720 km 伝送を実現している。さらに、1 チャンネルのシンボルレートと光サイドバンドの本数を増大させてその伝送容量を 1 Tbit/s まで拡大し、その 560 km 伝送を達成している。これは、10 bit/s/Hz 以上の周波数利用効率でテラビット信号の長距離伝送を世界で初めて実現したものであり、極めて重要な成果である。

第 5 章は第 4 章で示した 256 QAM-OFDM 信号の伝送特性に関する計算機解析について述べている。1 Tbit/s、256 QAM-OFDM 信号の伝送距離を制限する支配的要因が、逆伝搬補償後も僅かに残留する光ファイバ伝送路中の非線形波形歪みにあることを明らかにするとともに、低非線形ファイバによる伝送距離拡大の可能性を示している。

第 6 章は結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、高分解能 FDE ならびに逆伝搬法による高精度な波形歪み補償技術を用いて 10 bit/s/Hz 以上の高い周波数利用効率を有するテラビット光 OFDM 伝送の長距離化に成功したものである。これらの成果は次世代の高効率・大容量光通信システムの実現に有益な知見を与えるもので、光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。