

博士論文審査報告書

論文題目

デジタル信号処理による長距離・大容量
光ファイバ伝送システムの周波数利用効率向上

Spectral efficiency improvement using digital signal
processing in long-haul and high-capacity optical
transmission systems

申請者

小林	孝行
Takayuki	KOBAYASHI

--

インターネットや移動体通信の普及に伴い、情報通信需要は 20 年間に 3～4 桁のペースで飛躍的に増大してきた。今後も、5 G, IoT, 超高精細動画配信、車の自動運転などの新しいインフラやサービスの展開によって、引き続き高い伸び率の拡大が見込まれる。現時点で顕在化していない新サービス誕生の可能性も考慮すると、遠くない将来に、エクサビット級伝送容量の情報インフラが必要となり、その構築のために、光通信技術の一層の高度化が求められている。

現在の基幹光ファイバ伝送システムでは、0.2 dB/km 以下の超低損失光ファイバと、多波長光信号を一括増幅できる光ファイバ増幅器をベースに、長距離・大容量伝送を低コストで実現している。現在主に使われているエルビウム添加光ファイバ増幅器で波長多重できる帯域は C 帯と L 帯を合わせても 10THz ほどであり、たとえばペタビット級伝送容量の実現には、100 bit/s/Hz の周波数利用効率が必要である。古典的な 2 値強度変調方式の上限は 1 bit/s/Hz であり、周波数利用効率の大幅な向上のために、光増幅帯域の有効利用技術、および光信号の多値化・多重化技術の飛躍的高度化が求められている。

しかしながら多値信号の受信には、より高い信号対雑音比が必要となる。一方、通信の大容量化に伴う光パワー増大により、光ファイバの非線形光学効果の影響が深刻化する。とくに長距離伝送においては、光増幅器による自然放出光雑音の増加と同じく信号品質の大きな劣化要因となるため、これらの低減も重要な課題である。

以上のような背景のもとで、申請者は、デジタル信号処理に基づいて、光 OFDM 方式や SC-FDM 方式によるスペクトル整形と狭帯域化、光波の振幅・位相・偏光を利用する光多値信号の生成と検出に加えて、波長多重化や信号多値化に伴う波長分散・偏波分散と長距離化に伴う非線形光学効果の影響を補償するための新しい方法を提案し、1,200 km の長距離伝送実験や 100 Tbit/s の大容量伝送実験で、提案方式の有効性を実証し、1 コアあたり最大 9.1 bit/s/Hz までの周波数利用効率向上が可能であることを示した。さらに、マルチコアファイバの空間多重を併用すれば 1 Pbit/s の光増幅中継伝送が可能なることも実証している。本論文は、申請者が遂行した基幹系光ファイバ伝送システムの長距離・大容量化に関する一連の研究をまとめたものである。

本論文は 7 章から構成されている。各章の概要と評価を以下に述べる。

第 1 章は序論で、陸上系基幹光ファイバ伝送システムに求められている周波数利用効率向上の背景について述べ、申請者の研究の位置づけと意義を明らかにするとともに、本論文の構成を説明している。

第 2 章では、直交周波数分割多重 (OFDM) 方式による周波数利用効率向上とその課題について述べている。OFDM 方式では、シンボルレートと等しい周波数間隔をもつ複数のサブキャリアを用い、位相が直交するコサイン成分とサイン成分を利用することにより、サブキャリア信号の周波数間隔を狭

めて周波数利用効率を向上できる。それと同時に高速信号を多数の低速サブキャリア信号に分割してスペクトルを狭帯域化するため、波長分散の影響を低減できる。

申請者は、長距離伝送における光 OFDM 信号のサブキャリア数と伝送品質との関係をシミュレーションで調べ、光伝送での最適なサブキャリア数は無線伝送に比べて少なく、100 Gbit/s では 16 程度であることを明らかにした。また、少数サブキャリア OFDM 信号生成に適したダイレクト IQ 変調方式と、広帯域化 OFDM 信号生成のための電気 - 光多重融合方式を提案し、22 サブキャリア 110 Gbit/s の光 OFDM 伝送実験で、220GHz から 110GHz へのスペクトル狭帯域化と、80km 伝送における高品質送受信 ($Q > 11.7$ dB) によって提案手法の有効性を確認した。これは DA 変換器の動作速度の制限に縛られない光信号スペクトル狭帯域化により周波数利用効率を向上させた初めての実証実験として大きな価値が認められる。

第 3 章では、光信号の高次多値化による周波数利用効率向上について述べている。ここでは多値光信号の生成・受信方式について概説した後、デジタル PLL を用いる光 QAM 受信機の復調アルゴリズムを新たに提案している。この復調デジタル信号処理方式では、教師なし CMA-MMA (Constant Modulus Algorithm - Multi Modulus Algorithm) アルゴリズムと判定指向の LMS (Least Mean Square) アルゴリズムを切り替えて適応等化し、適応等化の収束度に合わせてデジタル PLL 制御用誤差関数も切り替えて周波数オフセットを補償している。そのためトレーニング信号などのオーバーヘッドの挿入なしに、安定かつ高精度な復調処理が実現できる。

申請者は、光電場を合成して 160 Gbit/s 偏波多重 16QAM 信号を生成し、長距離伝送および大容量波長多重伝送実験を行い、波長分散や非線形光学効果の影響下で、提案した復調アルゴリズムが安定に動作することを確認し、その有効性を実証している。さらに、69.1 Tbit/s の大容量波長多重伝送実験で偏波多重 16QAM 信号の周波数利用効率を 6.4 bit/s/Hz まで向上させた点は特筆に値する。

第 4 章では、光スペクトルの狭帯域化と光信号の高次多値化を両立させ、非線形光学効果補償用にパイロットトーンを挿入したシングルキャリア周波数分割多重 (SC-FDM) 方式を提案し、長距離伝送実験 (1 チャンネルあたり 400 Gbit/s, 64QAM) によりパイロットトーン方式による相互位相変調補償の有効性を確認した。

C 帯および拡張 L 帯の 11.2 THz を用い、548 Gbit/s の偏波多重 64QAM SC-FDM 信号を用いれば、周波数利用効率を 9.1 bit/s/Hz (102.3 Tbit/s, 240 km) まで高められることを実証した点は高く評価される。

第 5 章では、光ファイバ伝送の長距離化技術として、前方励起分布ラマン増幅の有効性を検討している。後方励起分布ラマン増幅を利用して光ファイバ伝送信号の信号対雑音比を改善する方法は実用化されている。これに対し

て前方励起の分布ラマン増幅では，光ファイバを介して励起光源の相対強度雑音(RIN)が信号に転写されて信号品質が著しく劣化する課題があった。申請者は，コヒーレント光源の代わりにインコヒーレント光源で励起することで雑音転写の抑圧をめざした。半導体増幅器(SOA)型インコヒーレント光源を用いる2次前方励起分布ラマン増幅で，偏波多重16QAM信号のL帯波長多重伝送実験を行い，その有効性を確認した。

第6章では，空間分割多重技術による周波数利用効率向上を検討している。単一コアシングルモード光ファイバの伝送容量限界とされる100 Tbit/sを超える大容量光伝送システムを実現するためには，空間分割多重技術の併用が有望である。申請者は，1波長当たり680 Gbit/sの偏波多重16QAM信号を用いて32コアのマルチコアファイバによる伝送実験を行い，C帯のみの波長多重で1 Pbit/sの光増幅中継伝送(205.6 km)が可能なことを実証した。

第7章は結論である。本論文を総括し，今後の課題について述べている。

以上のように本論文は，基幹光ファイバ伝送システムの長距離・大容量化に向けたデジタル・コヒーレント通信に関する申請者の研究をまとめたものである。その内容は，周波数利用効率を高める光伝送方式の提案，多値信号の安定な復調，非線形補償のための信号処理，前方ラマン増幅・空間分割多重の検討など，きわめて多岐にわたる。1,200 kmの長距離伝送および100 Tbit/sの大容量伝送で，提案方式の有効性を実証し，周波数利用効率を1コアあたり最大9.1 bit/s/Hzまで高められることを実証した点は高く評価される。申請者の研究成果は，基幹光伝送システムの継続的な大容量化と長距離化に役立ち，光情報通信の発展に寄与するところ大である。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2019年 12月

審査員

(主査) 早稲田大学 教授 理学博士(早稲田大学) 小松 進一

早稲田大学 准教授 博士(材料工学) 北陸先端科学技術大学院大学
北 智洋

早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 前原 文明

早稲田大学 名誉教授 博士(工学) 早稲田大学 中島 啓幾
