

2-2 Beyond 5G の根幹を支えるフォトニック ICT 技術の研究動向

2-2 Research in Photonic ICT Technology to Support Beyond 5G

赤羽 浩一 古川 英昭

AKAHANE Kouichi and FURUKAWA Hideaki

Beyond 5G 以降の情報通信サービスを担う通信システムには、多様なサービスや通信媒体に柔軟に対応するための利便性・可用性の向上や、増大し続ける通信量に対応するための継続的な容量強化が必要である。本稿では、光ファイバ通信と無線通信を融合したアクセスネットワーク構築のための、超広帯域光電変換デバイス技術、光ファイバ無線システムについて紹介する。また、コア・メトロ領域の光ネットワークの大容量化のための、マルチバンド波長多重技術、マルチコアファイバを用いた大容量伝送システムについて紹介する。

Beyond 5G communication systems will require higher convenience and availability to flexibly accommodate a variety of services and communication media, as well as huge capacity to handle ever-increasing communication traffic. This paper introduces ultra-wideband opto-electric conversion device technology and Radio-over-Fiber systems to efficiently convert radio signals on wireless system into optical signals on optical access system and vice versa. It also introduces multiband wavelength division multiplexing technology and large-capacity transmission systems using multi-core fibers to increase the capacity of optical networks in core and metro areas.

1 まえがき

2030 年代の Society5.0 社会では、人とモノが繋が^{つな}りあうサイバーフィジカルシステムを通じ、スマートシティやスマートファクトリ、防災・防犯システムが実現され、様々な社会課題の解決や経済活動の持続的な成長、安全・安心な社会の構築が期待されている。一方で、通信トラフィックは国内外で年率数 10 % の割合で増大を続けている。今後、AI(人工知能)、VR/AR(仮想／拡張現実)、IoT(Internet of Things)のための通信需要の更なる拡大が予想され、将来の通信インフラへの影響が懸念されている。このため、国内外において、サイバーフィジカルシステムの情報通信基盤となる Beyond 5G に関する研究開発が行われている。この中では、多数の利用者が接続する有線・無線アクセス網、多量のデータを扱うコア・メトロ領域の光ネットワークなどが重要な研究開発の対象となっている。本稿では、NICT のフォトニック ICT 研究センターで行われている Beyond 5G 以降に向けた光・電波融合アクセス基盤技術、フォトニックネットワーク技術の研究開発について紹介する。

2 光・電波融合アクセス基盤技術の研究開発

通信の高速、大容量性は 5G システムに至るまで、新システムの導入ごとに増加しており、これは Beyond 5G 以降も同様であると考えられる。より利便性、可用性の高いネットワーク実現には、大容量の無線、有線通信をシームレスに接続する技術が、今後も重要であると考えられる。本節では光ファイバ通信と無線通信を融合したアクセスネットワーク構築のための、デバイス技術、サブシステム技術について紹介する。

2.1 光電変換デバイスの超広帯域動作

モバイル通信の大容量化、データセンタ間の通信量の増大などに伴い、アクセス系ネットワークにおいては無線、有線(光ファイバ)を問わず、高速、大容量化が求められており、今後もこの傾向は続くと考えられる。このような動きに対応するため、電気信号を光信号に変換する光変調器、光信号を電気信号に変換する光検出器にはより高速、広帯域で動作するものが求められている。これに対して我々は 100 GHz 超で動作する超高速光変調器、光検出器を開発してきた。

光変調器においてはニオブ酸リチウム(LN)を用いた光変調器が実用化されているが、これまで 40 GHz

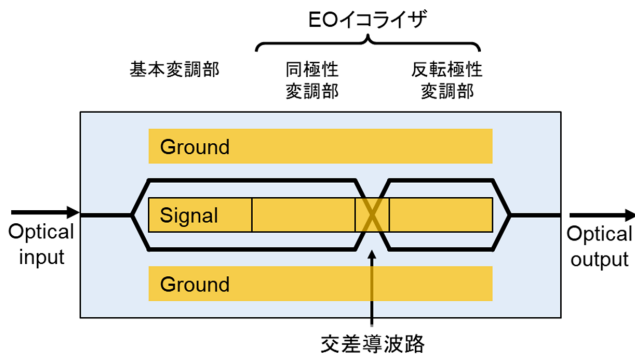


図1 光電融合周波数等化構造を用いた光変調器

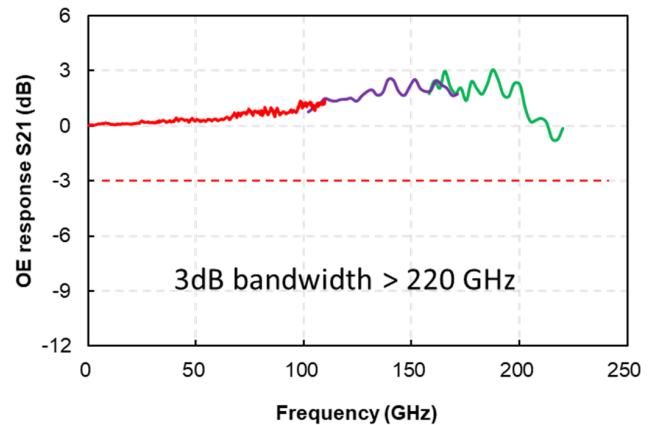


図3 構造最適化したUTC-PDの動作特性

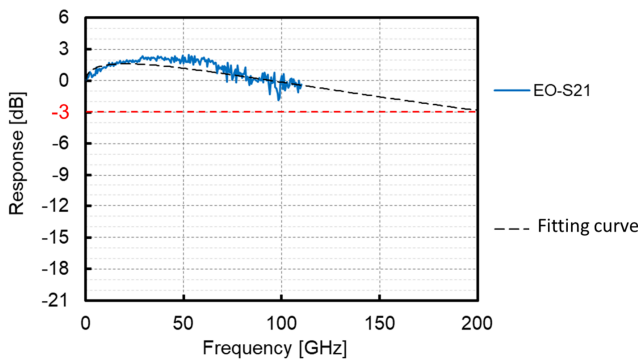


図2 作製した光変調器の動作特性

程度だった動作速度を更に向上させるため、薄膜LNを用いた光変調器の研究が活発に行われており、100 GHz程度のLN光変調器の試作が成されている。更なる動作速度向上のため、我々は電気信号の損失の影響を押さえる光電融合周波数等化構造を考案し、これを試作した[1]。図1に作製したLN光変調器の模式図を示す。

図中黒い線が光導波路部分になり、ここを光波が通過する際に黄色の電極部分により変調信号が載せられる。動作帯域の向上のため、光導波路は途中で交差させられ、反対側の電極位置に配置されることにより、遅い変調の時と早い変調の時の損失を打ち消しあう構造としてある。この変調器の動作特性を測定した結果が図2となる。110 GHzまでの周波数特性はほぼフラットなレスポンスを示しており、応答に対する損失は1 dB未満であるため、110 GHz超の変調動作が可能であることが明らかになった。また、70 GHz以上の応答特性低下の傾向を外挿すると、-3 dB帯域を考えた場合、200 GHzまでの変調動作が可能であることが分かる。動作電圧の低減などの課題は残るものの、このような構造を用いることにより超高速光変調が可能であることを実証した。

光検出器においては高速応答が可能な単一走行キャリア光検出器(UTC-PD)の高速動作化について検討を

行っている。光検出器においては一般的に半導体の光吸収により生成したキャリアがどのくらい早く電極に到達し、電気信号に変換されるかという特性と素子全体のインピーダンスマッチングにより動作速度律速をどの程度抑えられるかという特性により動作速度が決定される。これまでに我々は光生成キャリアの高速化として、移動度の高い電子のみを用いるUTC-PD構造の作製を行い、110 GHzまでの高速動作光検出器を実現してきたが、最近更にデバイス構造の最適化によるインピーダンスマッチングを厳密に行い、更なる高速化を目指す研究開発を行った。また、動作速度を評価する場合、既存の市販されている測定装置では、110 GHzまでしか評価できないという問題もあった。これについても、独自の2トーン光信号精製技術を用い、110 GHz以上の高速動作についても評価可能な手法を開発した。これらの技術を組み合わせDCから200 GHz以上の周波数で変調された光信号に対する応答を測定した結果が図3になる[2]。これまで動作可能であった110 GHzを大幅に超え、-3 dB帯域で200 GHz以上の応答速度が得られる結果となった。これらの光変調器や光検出器を用いることにより、最大で400 Gbps程度まで単純な強度変調によるデータ伝送が可能になるものと期待される。

2.2 光ファイバ無線技術

無線通信の大容量化に伴い、テラヘルツ (THz) 帯など高周波の電波を使った無線通信が検討されているが、高周波の電波は遮蔽物の影響を受けやすいなどの課題がある。この点を解決する一つの方法として、我々は光ファイバ無線 (Radio over Fiber: RoF) 技術を応用し、光ファイバ通信と無線通信をシームレスに接続する技術に関する研究を行っている[3]。

図4に構築したRoFシステムを示す。今回は無線区間の周波数として285 GHzのTHz帯を用いた。最初

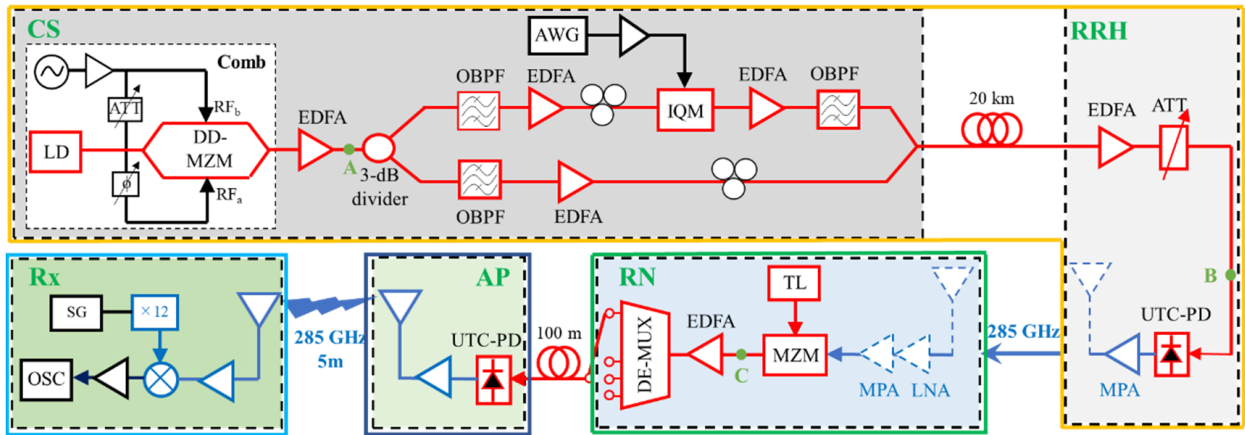
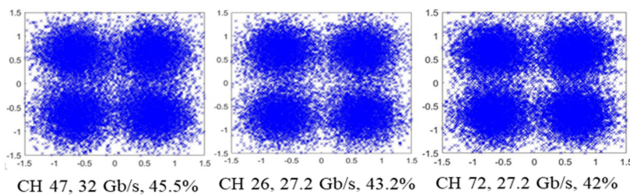


図4 285 GHz帯を用いた光無線システム

図5 構築したシステムにより伝送したQAM信号の一例
(48%未満でエラーフリー)

にコントロールステーション (CS) において光周波数コムを発生させ、(図中 A) 285 GHz の間隔を持つ 2 つの光波スペクトルをフィルターで取り出し、それを分岐して、その片方の波長にデータを載せるための光変調を行った。これを再び合波することにより 285 GHz のビート光の上にデータを載せたことになる。これを 20 km 伝送し、基地局に相当する部分 (RRH) において光電変換により 285 GHz の搬送波にデータ信号が載った電気信号を生成する。これを中継局 (RN: Relay Node) において光信号に変換し、光スイッチで行き先を決定した後、100 m の光ファイバ伝送の後に再び光電変換により電波に変換し、受信機 (Rx) において信号を検出するという構成である。

この構成では中継局において、波長により行き先を変更できる点が特徴的であり、例えば異なる部屋に高周波無線を配信したい場合、ここで経路を選択できる。以上の構成で OFDM 信号の伝送を行った結果を図 5 に示す。前述のとおり、中継局における波長の選択により信号の行き先を制御できるが、各チャンネルの伝送速度を評価したところ、最大で 32 Gbps でデータ伝送が可能であることが明らかになった。この結果より、遮蔽物の影響を受けやすい高周波無線信号を光ファイバ通信により迂回させ、必要な場所で無線通信に変換するというネットワーク構成が可能になったと言える。

3 超大容量フォトニックネットワーク技術の研究開発

3

2030 年頃のコア・メトロ領域の光ネットワークでは、光ファイバ一本あたり 1 Pbps の容量が期待されている。しかし、既存の波長多重分割多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) をベースとした光ネットワークでは、限られた波長帯域のみ使用されているため、将来に向けて十分な通信容量を確保することは難しい。そのため、近年、光ファイバの利用可能な波長帯を拡大したマルチバンド波長多重技術の研究が進んでいる。また、光ファイバの中の空間的な経路数を増やして通信容量を増加させるマルチコア光ファイバやマルチモード伝送方式を用いた空間分割多重 (SDM: Space division multiplexing) 技術 [4] の研究も行われている。本節では、マルチバンド波長多重技術、SDM 技術を用いた超大容量の光ファイバ光伝送技術の最新の研究成果について紹介する。

3.1 マルチバンド波長多重技術

現在使用されている光ネットワークにおいて、マルチバンド波長多重技術によって新たな波長帯を導入することが可能となると、光ファイバケーブル増設などの多額の設備投資をせずに、伝送容量を経済的に増加させることができる。現在の長距離向けの商用光ネットワークでは、主に C 帯 (Conventional band、波長 1,530 ~ 1,565 nm) が利用されていて、使用されている波長数は 80 程度である。また、L 帯 (Long wavelength band、波長 1,565 ~ 1,625 nm) も一部で商用に利用されている。そのほかに、T 帯 (Thousand band、波長 1,000 ~ 1,260 nm)、O 帯 (Original band、波長 1,260 ~ 1,360 nm)、E 帯 (Extended band、波長 1,360 ~ 1,460 nm)、S 帯 (Short wavelength band、波長 1,460 ~ 1,530 nm)、U 帯 (Ultralong wavelength band、波長

2 Beyond 5G の要素技術

1,625 ~ 1,675 nm) の波長帯があり、利用が検討されている (図 6)。

光ネットワークにおいて新しい波長帯を利用可能にするためには、光ファイバ伝送時の光信号損失を補償するための光増幅器の開発が必要不可欠である。これまでに我々は、希土類添加光ファイバを使った増幅器とラマン増幅の増幅方式を駆使して、商用で利用されている C 帯、L 帯に加え、一般的に商用化されていない S 帯も使用した光ファイバ伝送システムを構築し、

大容量伝送を実証してきた [4]。最近、E 帯用のビスマス添加ファイバ光増幅器や光スペクトル整形器を開発し、E、S、C、L 帯にわたる 212.3 nm 波長範囲 (波長 1,410.8 nm から 1,623.1 nm まで) のほぼ全域に相当する、世界最大の 27.8 THz の周波数帯のマルチバンド波長多重技術を活用し、合計 1,097 波長チャンネルの波長多重信号を、実用化されている標準的な単一コア・単一モードファイバで 150 km まで伝送することに成功した。伝送距離 50 km では、毎秒 301 テラビットの伝送容量を実証し、単一コア・単一モードファイバでの伝送容量記録を 23 % 更新した [5]。さらに、O 帯向けビスマス添加ファイバ光増幅器や U 帯ラマン増幅器、O 帯・U 帯用の光スペクトル整形器などを開発し、波長範囲を O、E、S、C、L、U 帯に拡張し、標準的な



図 6 光通信の波長帯

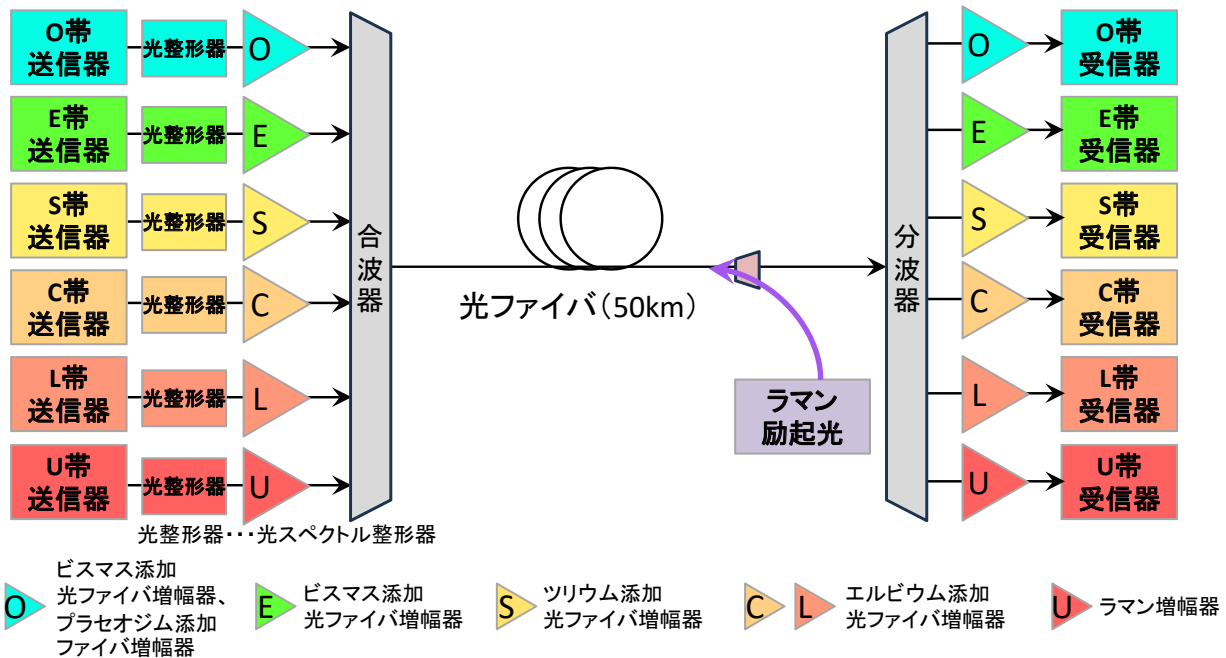


図 7 マルチバンド波長多重技術を用いた伝送システム

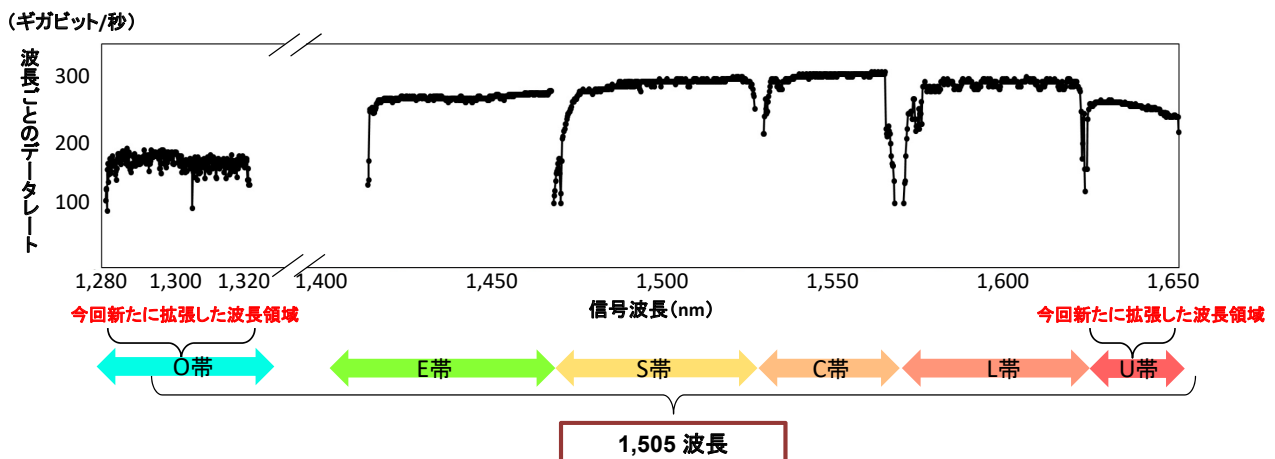


図 8 伝送実験の結果

単一コア・単一モードファイバにおいて 37.6 テラヘルツの周波数帯、毎秒 378.9 テラビットの伝送実験に成功し、周波数帯域と伝送容量の世界記録を更新した [6]。図 7 は、今回開発したマルチバンド波長多重技術を用いた伝送システムの概略図を表している。図 8 の実験結果のグラフは、誤り訂正を適用した後の波長ごとのデータレートを示しており、1,505 波長合計で毎秒 378.9 テラビットとなる。これらのマルチバンド波長多重技術は、研究が進んでいる SDM 技術と組み合わせることも可能であり、光ネットワークの更なる大容量化が可能となる。

3.2 空間分割多重技術を用いた大容量光ファイバ伝送

従来用いられてきた標準型シングルモードファイバは、クラッド中に単一のコアを持ち、単一の伝搬モードを有するものである。一方、SDM 技術の一つとして、同一クラッド中に複数のコアを配置したものがマルチコアファイバであり、それぞれのコアを用いて光信号の伝送を行う。そのため、シングルコアファイバと比較して、コア数分の大容量化が可能である。また、伝搬モードと呼ばれるコア内の光路を複数利用し、異なる光信号を同時に伝送するマルチモード伝送技術がある。コア径を大きくすることで複数のモードも伝搬

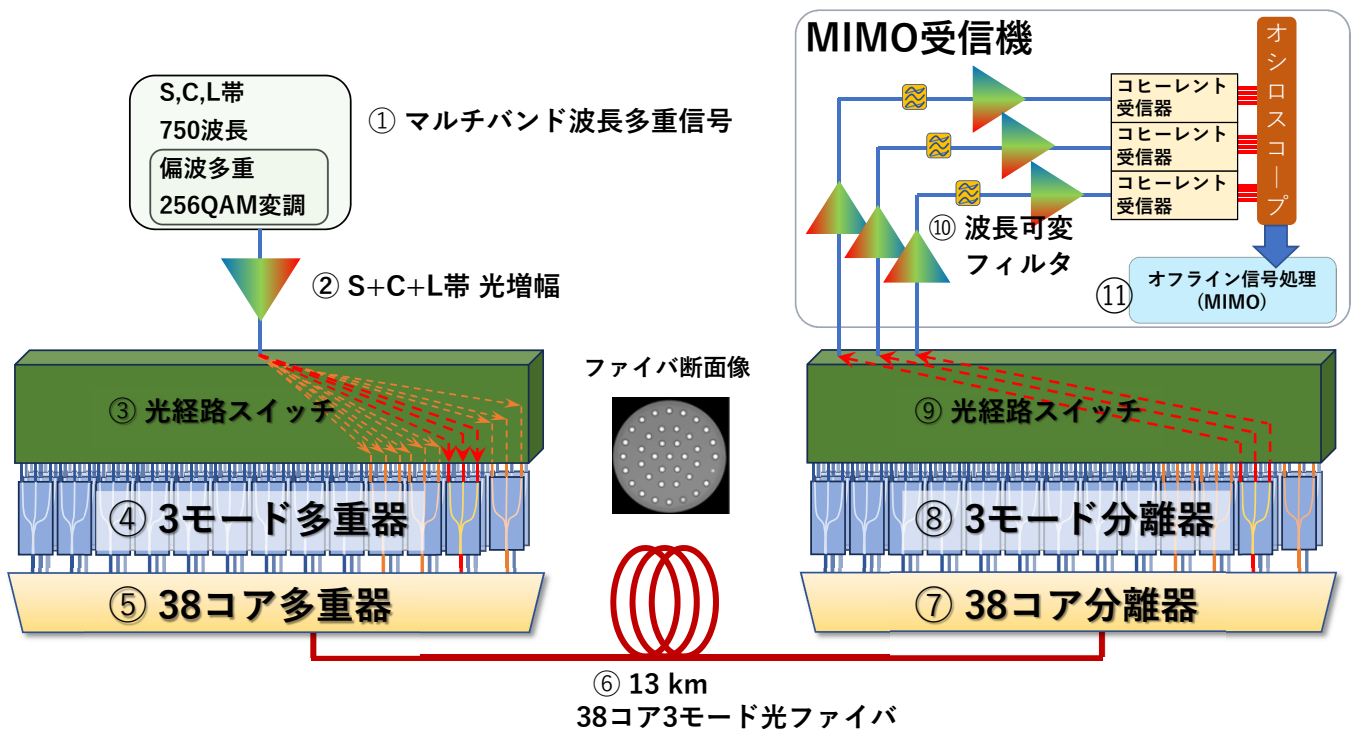


図 9 38 コア・3 モードファイバを用いた大容量伝送システム

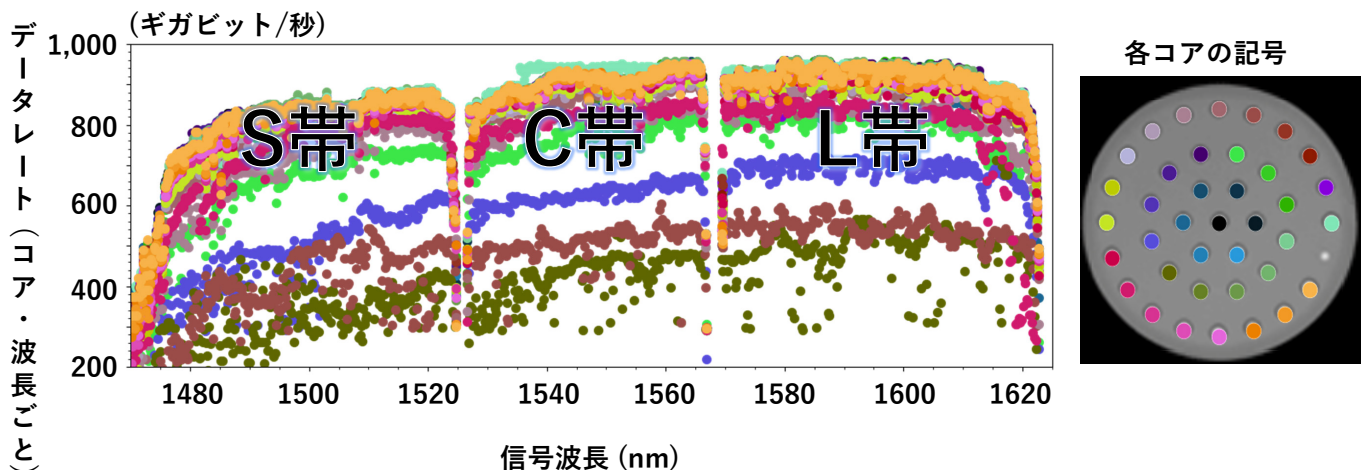


図 10 伝送実験の結果

可能となるため、モード数分の大容量化が可能である。

これまでに我々は、38 コアで各コアが 3 伝搬モードのマルチコア光ファイバ(クラッド径:0.312 mm)を用いた伝送実験を行い、光ファイバ 1 本あたりの伝送容量世界記録である毎秒 10.66 テラビットの伝送を実証してきた [7]。最近、S、C、L 帯を活用したマルチバンド波長多重技術をマルチモード伝送に導入し、合計 750 波長チャネルの波長多重信号を 38 コア 3 モード光ファイバの各空間チャネルで伝送、毎秒 22.9 ペタビットの伝送容量を実証し、光ファイバの伝送容量世界記録を 2 倍以上更新した [8]。図 9 は、今回開発した伝送システムの概略図を表している。使用した波長数は、S 帯で 293 波、C 帯と L 帯で 457 波の合計 750 波で、18.8 THz の周波数帯域を使用した。信号の変調には、情報量が多い偏波多重 256 QAM 方式を使用した。図 10 の実験結果のグラフは、コア・波長ごとのデータレートを示しており、合計で毎秒 22.9 テラビットとなる。この容量は、現在の商用光通信システムにおける光ファイバ 1 本あたり伝送容量の 1,000 倍超となるものであり、将来の大容量光ネットワークの実現可能性を示唆する重要な成果である。

一方、標準型シングルモードファイバと同じクラッド径 (0.125 mm) のマルチコアファイバ(標準外径マルチコアファイバと呼ぶ)の研究開発も活発に取り組まれている。標準外径マルチコアファイバは、10 以下のコア数に留まる一方、既存の光ファイバやケーブルの製造技術、コネクタなど既存の周辺技術が活用できるため、早期の実用化が期待される。現在、2 コアファイバや 4 コアファイバの実用化が推進されている。

4 結論

Beyond 5G を支えるネットワークの通信容量の大容量化や利便性・可用性の向上を実現するためには、デバイス技術、システム技術、伝送技術などの種々のフォトニック ICT 基盤技術を確立する必要がある。今回、超広帯域光電変換デバイス技術、光ファイバ無線システム、マルチバンド波長多重技術、マルチコアファイバ大容量伝送システムについて、最新の研究開発成果を紹介した。今後、これらの技術を更に深化させるとともに、実システムへの導入を推進していく。

【参考文献】

1 Yuya Yamaguchi, Pham Tien Dat, Shingo Takano, Masayuki Motoya, Yu Kataoka, Junichiro Ichikawa, Satoshi Oikawa, Ryo Shimizu, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Kanno, and Tetsuya Kawanishi, "Low-Loss Ti-diffused LiNbO3 Modulator Integrated with Electro-Optic Frequency-Domain Equalizer for High Bandwidth Exceeding 110 GHz," European Conference on Optical Communication (ECOC2022), Tu4E.2, Basel, Sept. 2022.

2 Toshimasa Umezawa, Pham Tien Dat, Yuki Yoshida, Shinya Nakajima, Atsushi Matsumoto, Atsushi Kanno, Kouichi Akahane, and Naokatsu Yamamoto, "DC-226 GHz well-impedance-matched high-speed photoreceiver for multi-band signal detection," Optical Fiber Communication Conference (OFC2024), Tu3D.2, March 2024.

3 Pham Tien Dat, Yuya Yamaguchi, Keizo Inagaki, Shingo Takano, Shotaro Hirata, Junichiro Ichikawa, Ryo Shimizu, Isao Morohashi, Yuki Yoshida, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, and Kouichi Akahane, "Transparent Relay and Switching of THz-wave Signals in 285-GHz Band Using Photonic Technology," Optical Fiber Communication Conference (OFC2024), Th4A.6, March 2023.

4 B. J. Puttnam, R. S. Luis, G. F. Rademacher, Y. Awaji, and H. Furukawa, "1 Pb/s Transmission in a 125µm diameter 4-core MCF," Proc. of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2022), no. JTh6B.1, May 2022.

5 B. J. Puttnam, R. S. Luis, Y. Huang, I. Phillips, D. Chung, N. K. Fontaine, G. F. Rademacher, M. Mazur, L. Dallachiesa, H. Chen, W. Forsyiaik, R. Man, R. Ryf, D. T. Neilson, and H. Furukawa, "301 Tb/s E, S, C+L-Band Transmission over 212 nm bandwidth with E-band Bismuth-Doped Fiber Amplifier and Gain Equalizer," European Conference on Optical Communication (ECOC2023), Th.C.2.4, Glasgow, Oct. 2023.

6 B. J. Puttnam, R. S. Luis, I. Phillips, M. Tan, A. Donodin, D. Pratiwi, L. Dallachiesa, Y. Huang, M. Mazur, N.K. Fontaine, H. Chen, D. Chung, V. Ho, D. Orsuti, B. Boriboon, G. F. Rademacher, L. Palmieri, R. Man, R. Ryf, D. T. Neilson, W. Forsyiaik, and H. Furukawa, "402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band Transmission," Optical Fiber Communication Conference (OFC2024), Th4A.3, March 2024.

7 G. F. Rademacher, B. J. Puttnam, R. S. Luis, J. Sakaguchi, W. Klaus, T. A. Eriksson, Y. Awaji, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Takahata, T. Kobayashi, H. Furukawa, and N. Wada, "10.66 Peta-Bit/s Transmission over a 38-Core-Three-Mode Fiber," Optical Fiber Communications Conference (OFC2020), Th3H.1, San Diego, March 2020.

8 B. J. Puttnam, M. van den Hout, G. Di Sciullo, R. S. Luis, G. F. Rademacher, J. Sakaguchi, C. Antonelli, C. Okonkwo, and H. Furukawa, "22.9 Pb/s Data-Rate by Extreme Space-Wavelength Multiplexing," European Conference on Optical Communication (ECOC2023), Th.C.2.1, Glasgow, Oct. 2023.



赤羽 浩一 (あかはね こういち)

ネットワーク研究所
 フォトニック ICT 研究センター
 光アクセス研究室
 室長
 博士(工学)
 光エレクトロニクス、半導体結晶成長
 【受賞歴】
 2024 年 第 69 回前島密賞
 2012 年 E-MRS Best Poster Award
 2007 年 応用物理学会講演奨励賞



古川 英昭 (ふるかわ ひであき)

ネットワーク研究所
 フォトニック ICT 研究センター
 フォトニックネットワーク研究室
 室長
 博士(工学)
 フォトニックネットワーク、光情報処理
 【受賞歴】
 2022 年 第 17 回電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞(チュートリアル論文賞)
 2015 年 第 47 回市村学術賞功績賞
 2013 年 文部科学大臣表彰 若手科学者賞