

2-4 テラビット級アクセスネットワーク技術

2-4 Terabit Class Transmission Technologies for Access Network

品田 聡 清水 智 ルーベン ソアレス ルイス ボリブーン ブッサラ
SHINADA Satoshi, SHIMIZU Satoshi, Ruben Soares LUÍS, and BORIBOON Budsara

ネットワークの高速化需要に応えるため、コストや消費電力の要件が厳しいアクセスネットワークにおいても、100 Gbaud を超える高速変調技術やコヒーレント伝送技術の研究開発が進められている。NICT では、そのような変調技術と空間分割多重 (SDM) 伝送技術を組み合わせることによる 10 Tb/s 級の短距離向け伝送技術の確立を目指している。本稿では、IMDD (強度変調・直接検波) 伝送方式をベースとしたマルチコアファイバを用いた 12.8 Tb/s の空間・波長多重伝送実証や、結合共振器構造により変調帯域を拡大させた単一モード面発光レーザによる 100 Gb/s 超の直接変調技術や並列接続技術について紹介する。さらに、短距離向けのコヒーレント伝送方式として、簡易な送受信器構成により実現できるセルフホモダイン検波方式を用いた伝送技術について紹介する。

To meet the demand of future high-speed access networks, high-speed modulation technologies exceeding 100 Gbaud and coherent transmission technologies are developed. NICT aims to establish 10 Tb/s class short-distance transmission technology by using such modulation technologies and spatial multiplexing technologies. This paper presents a demonstration of 12.8 Tb/s space and wavelength division multiplexing transmission using multi-core fibers based on an IMDD-based transmission system. Then, a direct modulation technology over 100 Gb/s by a single-mode transverse coupled cavity VCSEL and its parallel coupling technology are presented. Finally, we present a self-homodyne detection technology using a simple transceiver as a coherent transmission technology for short distance communications.

1 まえがき

通信トラフィックは増加の一途をたどっており、今後も 5G (第 5 世代移動通信システム) の本格普及や、AI (人工知能)、VR/AR (仮想 / 拡張現実)、IoT (Internet of Things) などに関する新しい通信需要の拡大から、ネットワークの高速化のニーズはますます高まると考えられる。イーサネットは、テレコム網、データセンタ網、エンタープライズ網等で適用されている Point to Point (P2P) の伝送規格であるが、伝送速度や伝送距離に応じて様々な規格の標準化が進んでおり、技術動向や市場要求を色濃く反映している [1]。近年、標準化が完了した 400 GbE では、光の変調方式として新たに強度信号を多値化する PAM4 (4 値パルス振幅変調) が採用され、また一部の規格で約 50 Gbaud まで変調速度の高速化も進められたほか、40 km を超える距離の規格でコヒーレント光伝送方式が初めて採用された。既に次世代のイーサネット規格として、

800 GbE や 1.6 TbE を対象とする議論が始まっており、そこでは 100 Gbaud を超える変調速度の採用も視野に入ってきている。

現在、短距離向けのトランシーバには、送受信器の構成が簡素で安価な強度変調・直接検波 (IMDD: Intensity Modulation, Direct Detection) 伝送方式が採用されている。主に、半導体レーザをベースとした直接変調レーザ (DML: Directly Modulated Laser) や電界吸収型変調器集積レーザ (EML: Electro-absorption Modulator integrated with DFB Laser) が用いられているが、昨今の 100 Gbaud を超える高速化の要求を踏まえ、近年これらの高速化技術に大きな進展が見られる。DML に関しては、光閉じ込め効果の拡大や、結合共振器構造内での光フィードバックが引き起こすフォトン・フォトン共鳴 (PPR: Photon-Photon Resonance) の利用により、100 GHz 以上の変調帯域と 256 Gb/s の PAM4 伝送が達成されている [2]。EML に関しても、変調電極構造の最適化等により、420 Gb/s の PAM8 伝

2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

送が報告されている [3]。いずれも次世代イーサネットが必要とする 100 Gbaud 超の送信デバイスとして期待される。一方、IMDD 伝送方式は高速化に伴い伝送距離の維持が難しくなることから、将来の高速なイーサネットでは 10 km 程度の短距離通信からコヒーレント伝送方式を採用することも検討されている。しかし既存のコヒーレント伝送方式は、送受信器の構成が複雑であり、デジタル信号処理 (DSP: Digital Signal Processing) の負荷も大きいことから、短距離通信への導入に際しては、送受信器構成の簡素化や DSP 負荷の低減等を通じ、コストや消費電力を削減することが課題となる。

NICT では、100 Gbaud 超の高速変調技術やコヒーレント伝送技術と空間分割多重 (SDM: Space Division Multiplexing) 伝送技術を組み合わせた、10 Tb/s 級の短距離向け伝送技術の確立を目指している。本稿では、初めに 200 Gb/s の強度多値信号を波長と空間で多重化した 12.8 Tb/s 信号のマルチコアファイバ (MCF: Multi Core Fiber) 伝送及びスイッチング実証について紹介する。次に、高速 DML の一つとして期待される結合共振器面発光レーザによる、100 Gb/s 超の並列高速伝送技術について紹介する。最後に、短距離向けのコヒーレント伝送方式として、セルフホモダイン検

波方式を用いた簡易なコヒーレント伝送技術について紹介する。

2 短距離向け 10 Tb/s 級空間多重伝送技術

近年、データセンタ (DC) におけるトラフィックの増加は著しく、全世界の DC で扱われるトラフィック量は年間 20 ゼタバイトを超え、今後も年率約 25% で増加すると予想されている [4]。こうしたトラフィックのうち、約 85% が DC 内や短距離の DC 間で処理されており、DC ネットワークにおける高速リンクの需要も高まっている。

我々は、SDM 技術を用いた並列高速伝送をこうしたリンクに適用することを検討している [5]。図 1 (a) は、近年の主流である 2 階層型の DC ネットワークの構成を示している。主に、多数のサーバからのデータを集約する Leaf スイッチと、それを更に束ねる Spine スイッチの 2 段のスイッチから構成される。両スイッチ間は、約 500 m から 10 km に達するリンクであるが、将来的には、10 Tb/s 級の高速リンクが要求され、SDM 技術による大容量化が有効であると考えている。

ここでは従来型の、全 Spine スイッチと全 Leaf スイッチとを完全に接続する構成 (図 1(a)) と、両スウィ

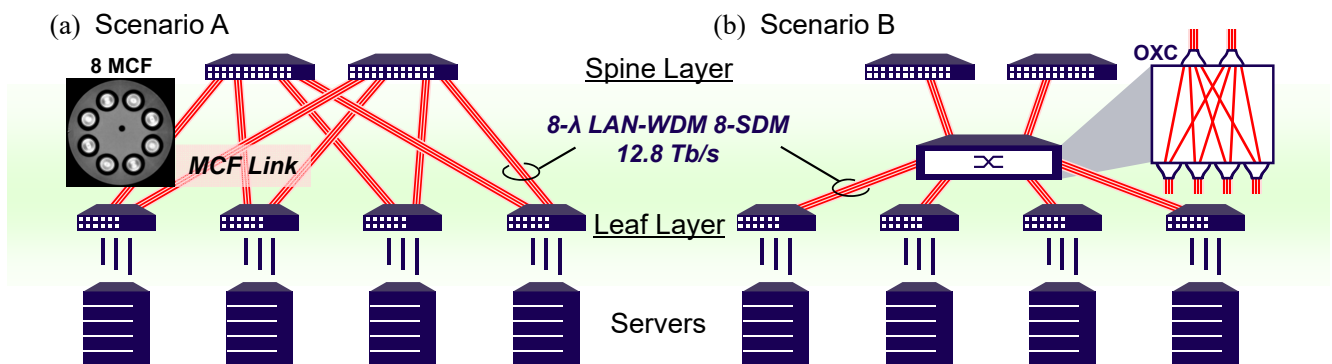


図 1 データセンタ (DC) ネットワークへの SDM 伝送技術の導入
(a) Spine-Leaf 間のフル接続と (b) 光スイッチ (OXC) を介した接続

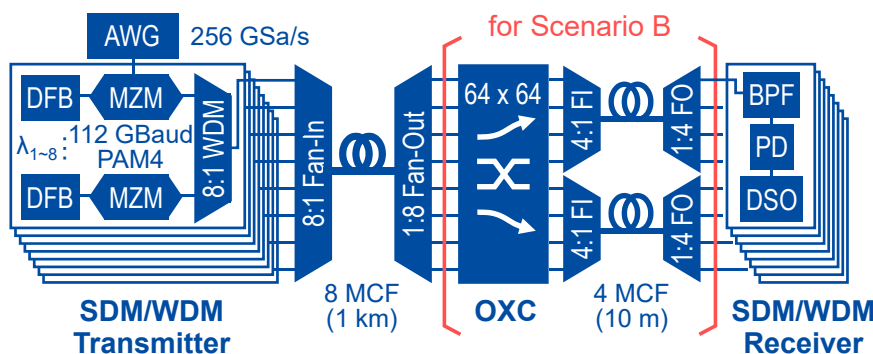


図 2 12.8 Tb/s 信号の 8 MCF 伝送 (+ スイッチング) の実験系

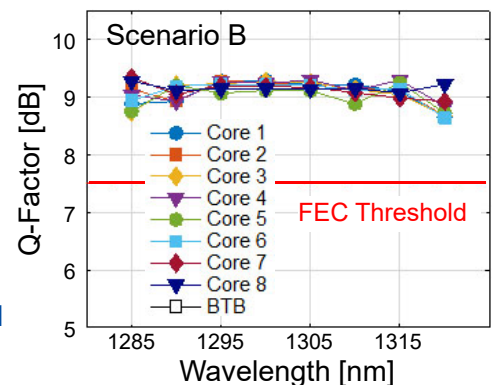


図 3 各波長 / 空間 ch の受信信号品質

チ間に光スイッチ (OXC: Optical Cross Connect) を設置することにより、リンク数を削減し、スイッチの追加導入に対する拡張性の高い構成 (図 1 (b)) を検討した。図 2 は、送受信器及び光スイッチの構成を示している。送信器では、ゼロ分散波長である $1.3 \mu\text{m}$ 帯のレーザを 8 波長分用意し、外部変調器 (MZM: Mach-Zehnder Modulator) を用いて 1 波長あたり 200 Gb/s の強度多値信号 (112 GBaud PAM4) を生成した。8 波長の波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 後の伝送容量は 1.6 Tb/s となり、これを標準外径 8 コアファイバ (8 MCF) の各コアを用いて伝送することにより、ファイバあたりの伝送容量は 128 Tb/s に達する。図 1 (b) を模擬した実験では、8 MCF の後に光スイッチ ($64 \times 64 \text{ MEMS}$ スイッチ) を設置し、スイッチング後に、 10 m の標準外径 4 コアファイバ (4 MCF) 2 本を接続することにより、全体として 1 入力 2 出力のスイッチを構成した。

図 3 は、スイッチ後の受信信号の品質 (Q 値) を示している。光スイッチの有無に依らず、全チャンネルで硬判定の符号誤り訂正による復調が可能な信号品質が保たれており、 10 Tb/s を超える PAM4、SDM/WDM 信号のマルチコアファイバ伝送及び一括スイッチングが実証された。

3 半導体レーザの 100 Gbaud 超直接変調技術

前節の 10 Tb/s 超の伝送実験では、 200 Gb/s の信号生成に外部変調器 (ニオブ酸リチウム (LiNbO_3) 光変調器) を代用したが、低コスト化や集積化を考慮した DML や EML、Si フォトニクス変調器 [6] やポリマー変調器 [7] 等の高速な送信デバイスの研究開発も並行して進めている。特に本節では、東工大と共同研究を進めている結合共振器面発光レーザを用いた 100 Gb/s 級伝送実験について紹介する。

面発光レーザ (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は、半導体基板上で活性領域 (Active region) を上下の多層膜反射鏡 (DBR: Distributed Bragg Reflector) で挟み込む構成により垂直共振器を形成しており、基板に対して垂直方向にビームを出射する (図 4)。後述する様に、他のレーザよりも空間的拡張性に優れるという利点をもつ。一般には、面発光レーザの共振器長は 1 波長周期で設計されるため、縦モードは必然的に単一 (シングルモード) になるが、横モードのシングルモード化には活性領域のサイズ制限が必要である。また半導体レーザの変調帯域を決める緩和振動周波数は、一般にレーザ出力が強いほど大きくなる。より高出力が得られるマルチモード VCSEL

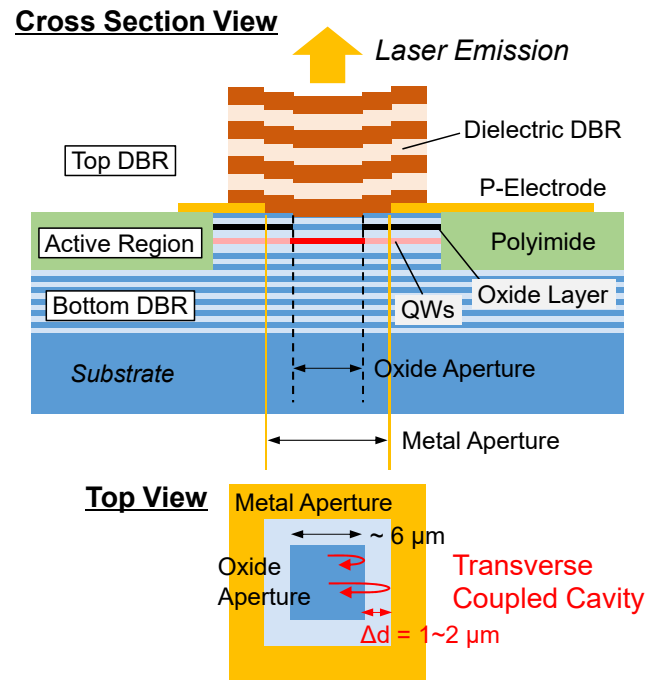


図 4 結合共振器面発光レーザの構造概要

(複数の横モードで発振) では、 100 Gb/s を超える直接変調が実現されている [8] が、マルチモードファイバのモード分散により伝送距離は 100 m 程度に制限される。このため伝送距離を延ばすためには、シングルモードの VCSEL (単一の横モードで発振) が必須であり、横モードを単一に保ちつつ、レーザ出力を高めることが延伸化及び高速化に重要となる。しかしながら、単一横モード化と高出力化は、活性領域サイズの相反する制御が必要になるため、2 つの両立が大きな課題となる。

ここで VCSEL の共振器に対して垂直 (基板面内方向) に新たな共振器構造を導入し、共振器同士を結合させて光フィードバックを生じさせると、共振モード間のビートが生じ、結果的に緩和振動周波数を高め高速化を図れる。これまで東工大のグループは、このような結合共振器型の VCSEL の開発を進めてきている [9]-[11]。レーザ出射面の金属 (電極) 開口を共振器構造とする $1,060 \text{ nm}$ 帯の結合共振器 VCSEL を製作した結果、単一横モード出力の高出力化と、 30 GHz 近くの 3 dB 周波数を実現している。

図 5 (a) は、この $1,060 \text{ nm}$ 帯結合共振器 VCSEL を用いて NICT で実施した伝送実験系、(b) は、レーザの周波数応答特性、(c) は、 2 km の単一モードファイバ伝送前後におけるビットエラーレート及び受信信号波形 (128 Gb/s NRZ 信号及び 144 Gb/s PAM4 信号) を示している。DSP による等化処理を要したが、シングルモード VCSEL で 100 Gb/s を超える伝送実験に世界で初めて成功した [12]。結合共振器の結合強度を最適

2 次世代情報通信インフラを創る光ファイバ通信技術

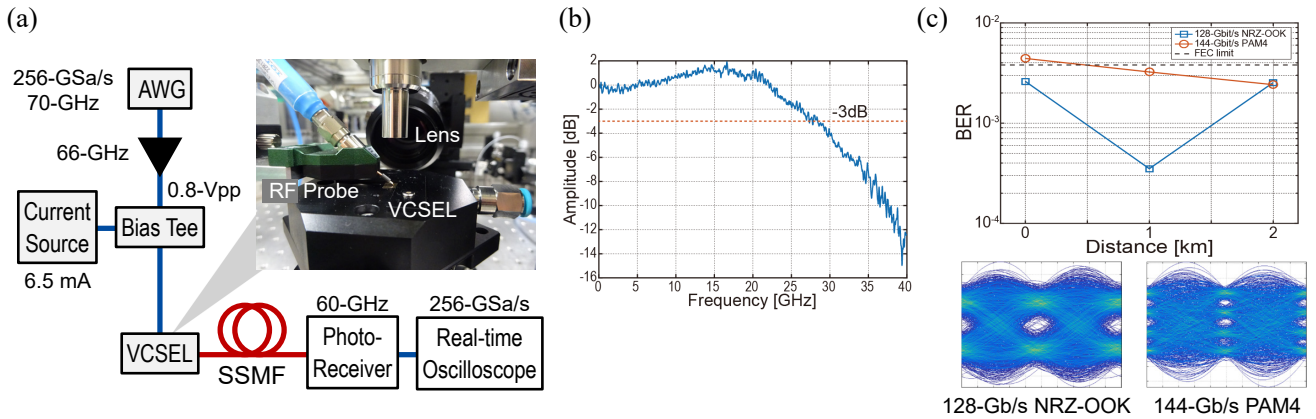


図5 (a) 結合共振器 VCSEL の直接変調伝送の実験系、(b) 周波数応答特性
(c) 128-Gb/s NRZ-OOK 及び 144-Gb/s PAM4 信号のビットエラーレート特性とアイ波形

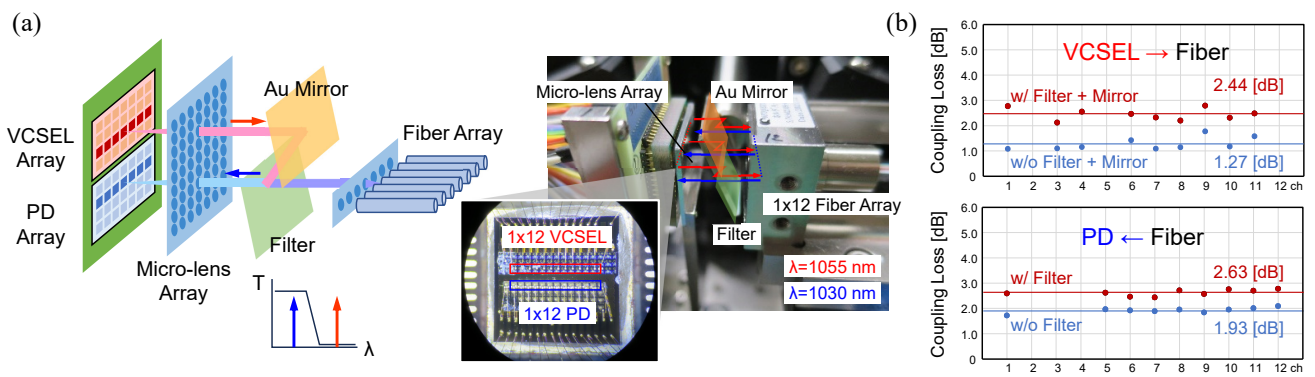


図6 (a) 12 ch VCSEL/PD アレイの並列双方向接続実験、(b) VCSEL/PD アレイとファイバアレイ間の結合損失

化することにより、更なる高速化が可能であると考えている。

微小な共振器構造をもつ VCSEL は、他の DML と比較し、より低消費電力で高速化を実現できる可能性がある [10]。また、基板平面内に多数のレーザをアレイ状に配置できるため、整合した配置をもつファイバアレイやマルチコアファイバと面と面での結合が可能である。さらに出射ビーム形状が円形であることから、レンズによるビーム整形が不要で、ファイバとの直接結合 (Butt coupling) も可能である。このように優れた VCSEL の空間拡張性を活用し、100 Gb/s 級 VCSEL を 10 ch 以上並列に接続して 1 Tb/s 級 トランシーバを実現するのが開発ターゲットの一つである。

図6(a)は、12 ch の VCSEL アレイ及び光検出器 (PD: Photo Diode) アレイと、12 芯のファイバアレイを用いた並列双方向接続の実験系を示している。上りと下りで異なる波長を用い、波長選択フィルタで両者を分離することにより、一芯で双方向接続を実現する。図6(b)は、VCSEL からファイバ、またはファイバから PD への結合損失を示している。ファイバ及びマイクロレンズアレイの周期に合わせて、異種基板上的 VCSEL と PD の間隔を精密に制御して実装しており、低損失

なファイバ結合を実現している。平面アレイの拡張により、100 ch (例えば 10×10 アレイ) 以上の並列化も可能であり、10 Tb/s 級の トランシーバへの拡張も実現できると考えている。

4 セルフホモダイン検波方式を用いた短距離向けコヒーレント伝送技術

低コストや低消費電力が要求される短距離通信システムでは、送受信器をより簡素に構成できる IMDD 伝送方式が基本であり、前節のような 100 Gbaud 超の高速化も検討されていることを紹介した。しかしながら、IMDD 伝送方式は、高速化が進むほどファイバ中の分散の影響が大きくなるため、10 km を超えるような距離での高速伝送は、受信感度がより高いコヒーレント伝送方式が優位となってくる。IMDD 伝送方式も、変調速度を抑えつつ波長多重を用いることにより容量拡大を図れるが、複数波長のレーザや波長多重器・分離器を用いた比較的複雑な構成を必要とする。そのため両方式の構成はコストや消費電力面も含めて比較され、適応領域の議論も行われている。

我々は、既存の方式より簡素な構成でコヒーレント

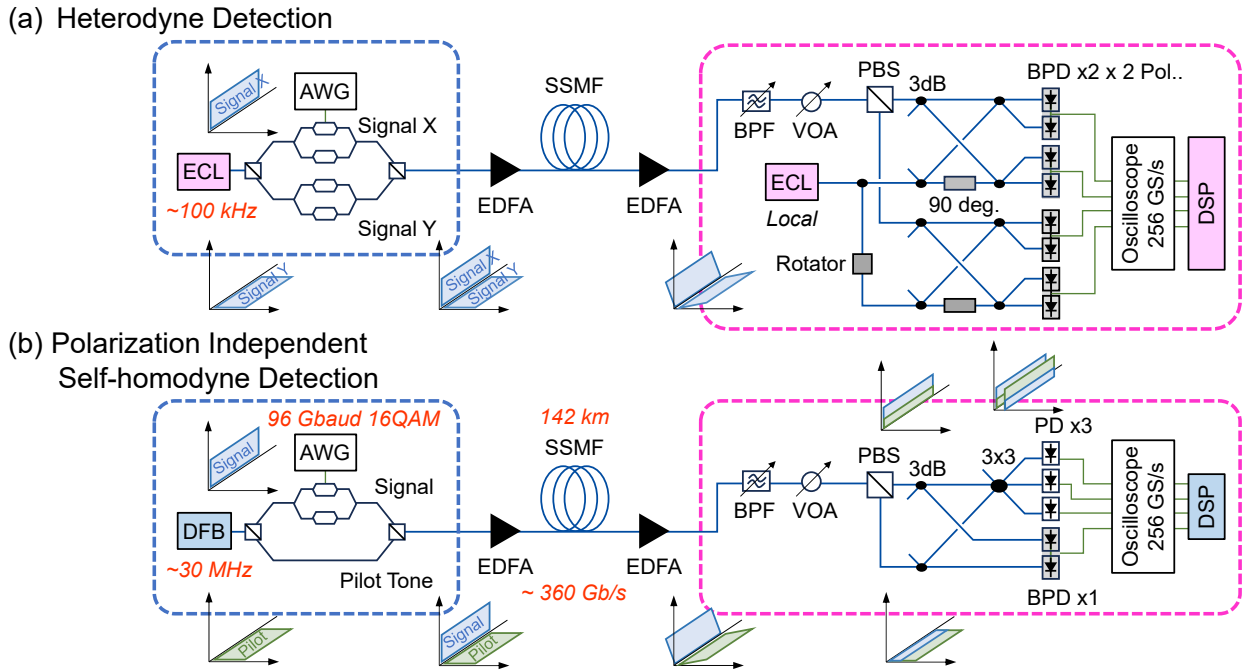


図7 従来の(a)ヘテロダイン検波方式と(b)偏波無依存セルフホモダイン検波方式の送受信器構成の比較

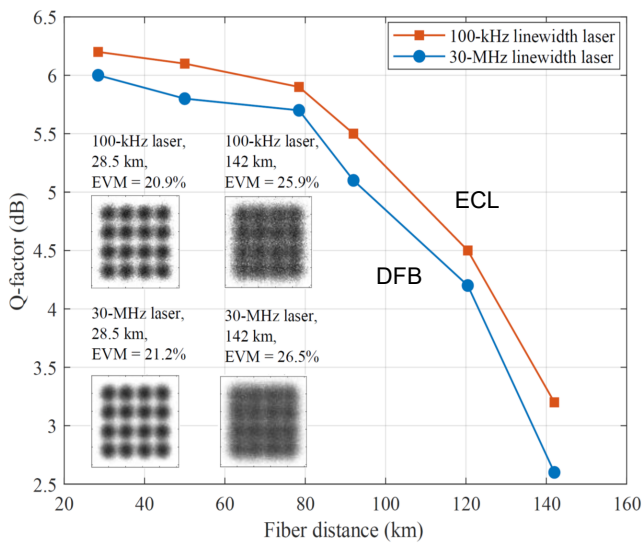


図8 セルフホモダイン検波した受信信号の品質と伝送距離

伝送を実現できるセルフホモダイン検波方式に着目し、短距離向けコヒーレント伝送技術として研究開発を進めている [13]。図7は、一般的なコヒーレント伝送方式であるヘテロダイン検波方式と、偏波無依存セルフホモダイン検波方式の構成を比較したものである。一般に、送信器の信号光光源及び受信器に置かれる局発光光源には、位相雑音が少ない狭線幅の高価な外部共振器レーザ (ECL: External Cavity Laser) が使用される。受信器においてこれら信号光と局発光を干渉させたのち、DSPにより位相信号を再生する。一方、セルフホモダイン検波方式は、信号光とパイロット光を同

時に送信し、受信器において、両者を分離し互いに干渉させることにより信号の位相信号を再生する。DSPの負荷が比較的小さく、さらに受信器に局発光光源が不要になるほか、送信器に狭線幅レーザも不要になることから、低コストかつ低消費電力な送受信器を構成できる。一方で、信号光とパイロット光は偏波状態を直交させて送信するため、従来の偏波多重伝送の半分の伝送容量に制限される。また、受信信号品質が、受信器に入る信号光とパイロット光の入射偏波状態に依存するため、偏波ダイバーシティや偏波追尾などの機能を付与しないと、信号品質が保証されないことが問題となる。

我々は、この入射偏波依存の問題を改善するため、Stokes Vector 検波方式 [14] をベースとして、DSPにより入射偏波依存特性を補償する受信方式を提案し、実証に成功した [15]。実証実験では、狭線幅(100 kHz)のECLと通常(線幅30 MHz)のDFB(Distributed Feedback)レーザを送信器の光源として用意し性能を比較した。レーザ出力を2つに分離したのち、一方に360 Gb/s(90 Gbaud 16 QAM)の変調を加える。もう一方はパイロット光とし、両者を偏波多重して光ファイバを伝送させる。受信器では、ファイバ伝搬中に偏波回転した信号光とパイロット光を固定の偏波分離器により直交成分に分離し、それらの差分成分と複素干渉成分を、3台のPD(Photo Diode)と1台の差動型PD(BPD: Balanced PD)で検出する。これらをMIMO処理することにより、入射偏波や光源の位相雑音に依らない信号再生を実現することが特徴である。

図8は、伝送距離に対する受信信号の品質変化を示している。142 kmの伝送後も、軟判定の符号誤り訂正により復調可能な2.5 dB以上の信号品質を維持している。線幅30 MHzのDFBレーザを用いた場合でも信号品質の劣化は少なく、位相雑音に対する耐性が強いセルフホモダイン検波方式の有効性が確認される。

このように簡素な送受信器構成を維持しつつ、偏波無依存化を実現したセルフホモダイン検波方式は、短距離通信システムの要求に応え、高速化と延伸化を実現する新しいコヒーレント伝送技術として期待される。

5 まとめ

アクセスネットワークに向けた短距離通信システムにおいても、100 Gbaudを超える変調速度の高速化や、コヒーレント伝送方式の適応を図る研究開発が進められている。NICTでは、短距離向け10 Tb/s級伝送技術の確立を目指しており、本稿では、その要素技術として、標準外径8コアファイバを用いた10 Tb/s超伝送・スイッチング技術、結合共振器VCSELによる100 Gb/s超直接変調技術、簡易な偏波無依存セルフホモダイン検波方式を用いたコヒーレント伝送技術について紹介した。

謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業」(JPNP20017)の委託事業の結果得られたものである。

【参考文献】

- 1 <https://ethernetalliance.org/technology/ethernet-roadmap/>
- 2 S. Yamaoka, N. P. Diamantopoulos, H. Nishi, R. Nakao, T. Fujii, K. Takeda, T. Hiraki, T. Tsurugaya, S. Kanazawa, H. Tanobe, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, F. Koyama, and S. Matsuo, "Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate," *Nature Photonics*, vol.15, pp.28–35, 2021.
- 3 H. Asakura, K. Nishimura, S. Yamauchi, Y. Nakai, T. Suzuki, Y. Yamaguchi, K. Tani, R. Nakajima, and K. Naoe, "420 Gbps PAM8 Operation Using 93 GHz Bandwidth Lumped-Electrode Type EA-DFB Laser at 50°C beyond 400 Gbps/lane," *Proc. ECOC2022, Th1E.3, Basel, 2022.*
- 4 Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021.
- 5 R. S. Luis, B. J. Puttnam, G. Rademacher, S. Shinada, T. Hayashi, T. Nakanishi, Y. Saito, T. Morishima, and H. Furukawa, "12.8 Tb/s SDM Optical Interconnect for a Spine-Leaf Datacenter Network with Spatial Channel Connectivity," *Proc. ECOC2022, Tu2D.2, Basel, 2022.*
- 6 J. Sun, R. Kumar, M. Sakib, J. B. Driscoll, H. Jayatileka, and H. Rong, "128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator With Integrated Thermo-Optic Resonance Tuning," *J. Lightw. Technol.*, vol.37, no.1, pp.110–115, 2019.
- 7 G. W. Lu, H. B. Zhang, S. Shinada, J. Hong, Y. Cheng, and S. Yokoyama, "Power-efficient O-band 40 Gbit/s PAM4 Transmitter based on Dual-drive Cascaded Carrier-depletion and Carrier-injection Silicon Mach-Zehnder Modulator with Binary Driving Electronics at CMOS Voltages," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol.27, no.3, 3500308, 2021.
- 8 T. Zuo, T. Zhang, S. Zhang, and L. Liu, "850-nm VCSEL-based Single-Lane 200-Gbps PAM-4 Transmission for Datacenter Intra-Connections," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.33, no.18, pp.1042–1045, 2021.
- 9 H. Dalir, and F. Koyama, "29 GHz directly modulated 980 nm vertical-cavity surface emitting lasers with bow-tie shape transverse coupled cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol.103, pp.091109-1-4, Aug. 2013.
- 10 H. R. Ibrahim, A. M. A. Hassan, X. Gu, S. Shinada, M. Ahmed, and F. Koyama, "1060nm Single-mode Metal-aperture VCSEL Array with Transverse Resonance and Low Power Consumption below 50 fJ/bit," *Proc. ECOC2021, Tu3D.5, Bordeaux, 2021.*
- 11 S. Hu, X. Gu, H. R. Ibrahim, M. Nakahama, S. Shinada, and F. Koyama, "1060-nm single-mode transverse coupled cavity VCSEL with intracavity surface relief for 58-Gbps modulation and 5-km single-mode fiber transmission," *Appl. Phys. Lett.*, vol.120, pp.261110-1-6, 2022.
- 12 S. Shimizu, C. Ge, L. Dong, X. Gu, A. Matsumoto, S. Shinada, and F. Koyama, "Record High-baud-rate 128-Gbit/s NRZ-OOK Direct Modulation of 1060-nm Single-mode VCSEL for Transmission over 2-km Standard SMF," *Proc. OECC2023, PDP, Shanghai, 2023.*
- 13 R. S. Luis, B. J. Puttnam, J. M. D. Mendiñeta, Y. Awaji, and N. Wada, "Experimental demonstration of a polarization-insensitive self-homodyne detection receiver for optical access," *Proc. ECOC2015, Tu.3.4.7, Valencia, 2015.*
- 14 D. Che, A. Li, X. Chen, Q. Hu, Y. Wang, and W. Shieh, "160-Gb/s Stokes Vector Direct Detection for Short Reach Optical Communication," *Proc. OFC2014, Th5C.7, 2014.*
- 15 B. Boriboon, R. S. Luis, G. Rademacher, B. J. Puttnam, S. Shinada, and H. Furukawa, "Polarization Insensitive Self-Homodyne Detection Receiver for 360 Gb/s Data Center Links," *Proc. ECOC2022, Th3A.2, Basel, 2022.*



品田 聡 (しなだ さとし)

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
 研究マネージャー
 博士(工学)
 超高速光ファイバ通信、光デバイス、光信号処理
 【受賞歴】
 2015年 第47回市村学術賞 功績賞



清水 智 (しみず さとし)

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
 主任研究員
 博士(工学)
 超高速光ファイバ通信、光信号処理、光デバイス



Ruben Soares LUÍS (ルーベン ソアレス ルイス)

Senior Researcher,
Photonic Network Laboratory,
Photonic ICT Research Center,
Network Research Institute
Ph.D.
Optical Communication, Datacenter
Networks, Optical Switching and
Networking, Signal Processing

【受賞歴】

2020年 第65回(令和元年度)前島密賞
2016年 第30回 独創性を拓く 先端技術大賞
企業・産学部門 特別賞
2015年 Nature Photonics Best
Postdeadline Paper Award



Boriboon Budsara (ポリブーン ブッサラ)

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
研究員
Ph.D.
超高速光ファイバ通信、光信号処理