

3-7 高効率光コミュニケーション技術の新展開

3-7 Highly Efficient Optical Communication Technologies

宮崎哲弥 成瀬 誠

MIYAZAKI Tetsuya and NARUSE Makoto

要旨

波長多重数の拡大や波長ごとのビットレート高速化による光通信技術の改善には限界が生じ始めている。環境対応のための低消費電力化などの新たな要求にも対応しながら、膨張し続ける情報伝送ニーズに対応できる、高効率光コミュニケーション技術が求められている。本稿では、信号の多値化による光信号伝送容量の拡大技術及び近接場光による回折限界を超えた空間域での高集積光信号処理などの新しいアプローチを中心に、高効率化を目指した最新の技術展開を概説する。

Highly efficient optical communication technologies are becoming important since the conventional strategies, such as denser wavelength multiplexing or higher time-domain multiplexing, are approaching their physical limits. Power-efficiency and volume-efficiency are additional important demands required in optical communications. In this paper, we show our recent development in high-efficient optical communications such as multi-level transmission technologies and high-density optical signal processing performed in a scale smaller than the diffraction limit of light.

[キーワード]

高効率光通信, 多値, 同期検波, ナノフォトニクス

Highly efficient optical communication, Multi-level, Synchronous detection, Nanophotonics

1 はじめに

膨張し続ける情報伝送ニーズに対して、これまでの光通信技術は 2.5 Gb/s → 10 Gb/s → 40 Gb/s のように波長チャネル当たりのビットレートの高速化や、波長多重数の増加により対処してきた^[1]。しかし、ビットレート増大に伴って分散による波形歪はますます深刻となり、また波長多重数は中継増幅器の増幅帯域の制限を受けるため、増幅帯域の異なる複数以上の光増幅器を並列に用いるなどの方策が必要で、結果として中継系の消費電力の増大などの問題を招く。さらに、光データルータのように光領域での極限的機能性の獲得も重要な課題であるものの、光の回折限界(通信波長で約 1 μm、LSI の線幅よりもおよそ 100 倍も大)が全体システムの集積性において大きな障壁となっており、ブレイクスルーが期待されている。すなわち、様々な意味での効率(周波数利用効率、エ

ネルギー利用効率、空間体積占有率等)の根本的改善を目指した光技術の開発が求められている。そこで本稿では、信号の多値化による光信号伝送容量の拡大技術(2章)及び近接場光を用いた回折限界を超えた空間域での光信号処理集積技術(3章)を中心に、高効率を目指した光信号処理の最新の展開を示す。

2 時間領域高効率光信号処理技術(多値光通信方式)

同一の信号帯域幅で 2 倍、4 倍、あるいはそれ以上の情報伝送を可能とする高効率光通信方式として、多値光通信方式が期待されている^{[2]–[8]}。光ファイバ通信は周波数利用効率の点では既にシャノン限界に迫っている無線通信に比べると技術的に極めて未開拓であり、情報伝送効率の向上や信号処理技術などの更なる展開の余地がある。こ

れまで光多値変調方式として強度変調 (ASK : Amplitude Shift Keying) と差動位相変調 (DPSK : Differential Phase Shift Keying) を併用した ASK-DPSK (APSK) 方式 [2]、光位相のみを用いる DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) [3]、など各種方式が報告されてきた。しかし、光位相/強度変調を併用する ASK-DPSK 方式では、光強度変調 (AM) 成分が光位相変調 (PM) 成分に与える混変調による波形歪みが問題となっていた。また、DQPSK 方式を実用する際には複雑な演算を要する符号化器が電気信号段で不可欠であり [3]、シンボルレート 40 Gb/s 以上の高速化実現の障害となっている上、8 PSK (8 相) 以上の多値化のためには無線通信同様に差動位相変復調は困難となるが、位相雑音耐力に優れ安定に動作する実時間光多値位相同期変復調技術は、著者の知る限りいまだ確立されていない。本章では、混変調の少ない多値通信システムとして提案した反転光パルス信号に光位相変調を重畳する反転光パルス重畳変調方式の良好な混変調抑圧性能について紹介する。さらに、超高速多値通信実現を目指し、位相雑音耐力に優れ安定に動作する Pilot-Carrier 自己遅延光位相同期検波方式について紹介する。

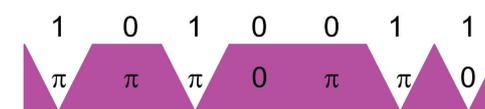
2.1 反転光パルス重畳変調方式 [5]

図 1 に提案する反転光パルス重畳変調方式のタイミングチャートを示す。パルス光を反転 RZ 変調器に導入することで、光強度変調用データ信号 (図 1 中 “1010011”) の “1” 符号はディップ (ダーク光パルス) に、“0” 符号はハイレベルとなるデューティ比が 50 % 以上の反転 RZ 光パルスに変換される (図 1 (b))。反転 RZ 光パルスには更に位相変調が重畳される (図 1 中 “ $\pi\pi\pi\pi\pi\pi\pi$ ”)。従来の光強度 + 光位相変調重畳方式においては (図 1 (a))、消光比を劣化させて “0” 符号に相当する低レベル光パルスに位相変調を重畳するため、光強度・光位相の 2 信号成分の品質をバランスさせるために微妙な消光比調整が必要である上、位相変調のタイムスロットを強度変調に正確に一致させる必要があるが、反転 RZ 光パルスであれば光パルスのデューティが 50 % 以上あるため必ずしも強度変調と位相変調のタイムスロットを同期させる必要はない (図 1 (b))。受信部において光信号

は光強度検波部及び光位相検波部に分岐され各々独立に復調される。図 2 に 20 Gb/s 光位相/光強度重畳変調時 (2 bit/Symbol : 2 倍情報伝送効率時) における光位相検波波形の本提案方式受信時 (a)、従来方式受信時 (b) を示す (20 ps/div.)。提案方式では光強度成分から光位相変調データ成分への混変調による波形ゆがみが従来方式よりも顕著に低減できることが確認できる。さらに反転 RZ 光パルスに DQPSK 変調を重畳することにより、30 Gb/s, 3 bit/Symbol (3 倍情報伝送効率時) 動作時においても強度変調による混変調が効果的に抑圧され、符号誤り率 10^{-9} 以下のエラーフリー特性が得られることも確認されている [5]。

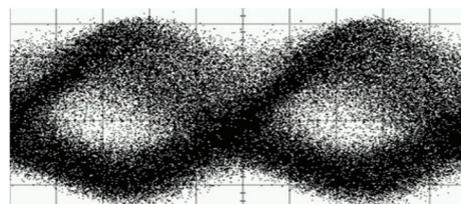


(a) 従来方式 : AM → PM クロストーク大きい

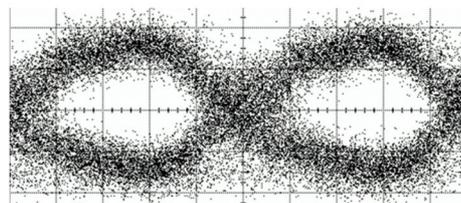


(b) 提案方式 : AM → PM クロストーク小さい

図 1 反転光パルス重畳変調方式のタイミングチャート



(a) 従来方式



(b) 提案方式

図 2 20 Gb/s 光位相/光強度重畳変調時の位相検波波形

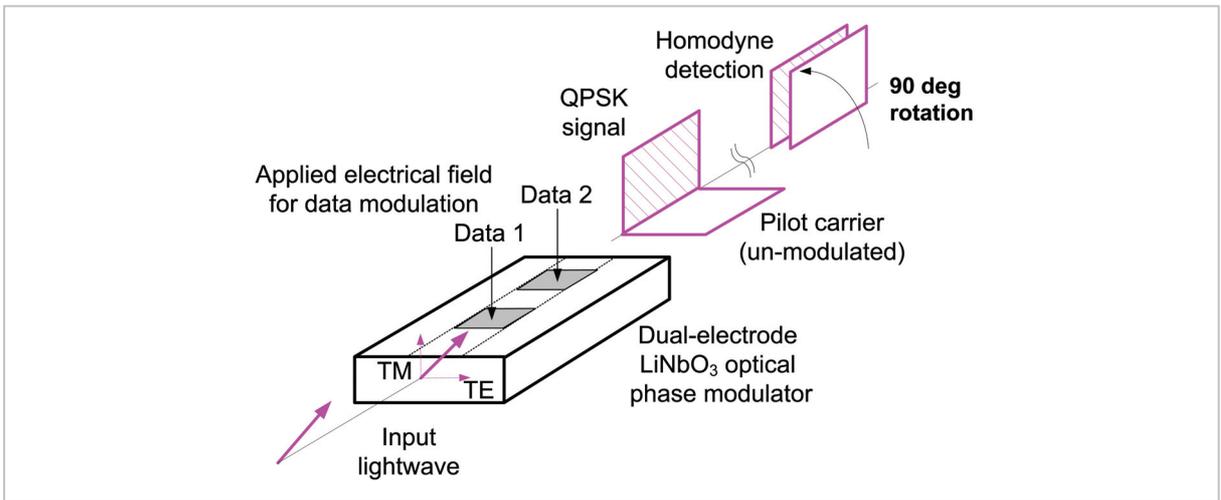


図3 Pilot-Carrier 自己遅延光多値位相同期検波方式

2.2 Pilot-Carrier 光多値位相同期検波方式^{[6][7]}

図3に、提案する光多値位相同期検波方式の2 bit/Symbol 動作時(QPSK)概念図を示す。従来の光位相同期検波方式では送信側で不完全な位相変調によりわずかにキャリアを残留させ、受信側で光位相同期ループ(光PLL)により微弱キャリアを追尾するため光源に極めて厳しい位相雑音性能が要求される上に、安定な位相同期検波動作が困難であった[8]。そこで、送信側でTM方向の光にのみ位相変調が施される位相変調器に45度直線偏光を入射することにより、位相多値変調光信号(TM)と無変調CW光(TE)をPilot-Carrierとして生成した。受信側ではPilot-Carrier光成分のみを90度偏波回転してホモダイン検波するための偏光ビームスプリッタ、半波長板、光位相調整器、合波器などがLN導波路に集積化されたモジュールを用いた(図4)。受信系には偏波制御が必要であるが偏波分散変動も含め位相制御系は狭帯域の相対位相調整で十分であるため、従来の局発光源を用いる光PLLに比べ光源のスペクトル線幅に対する要求は大幅に緩和される。また、差動位相変復調方式と比べ1ビット前のビットとの演算がなくなるため超高速化のネックとなる複雑な電子回路処理を要する符合/復号化部は不要となり、受信部においてはバランスドホモダイン検波により強度変調成分による混変調抑圧及び強度雑音抑圧も期待できる。

図5に、試作したLN集積化モジュールによる

ホモダイン同期検波時の光強度雑音抑圧度(CMRR: Common Mode Rejection Ratio)のRF周波数特性を示す。受信信号の周波数が1 GHz、10 GHz のとき、30 dB、15 dB もの良好な光強度雑音抑圧度が得られることが確認できた。また、図6に20 Gb/s(2 bit/Symbol) QPSK ホモダイン同期検波時の符号誤り率 10^{-9} で定義した受信感度の光源のスペクトル線幅(半値全幅)依存性を示す。これまで受信系に局発光源を用いたQPSK

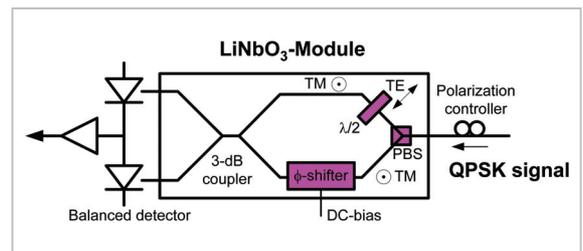


図4 LN集積化モジュール

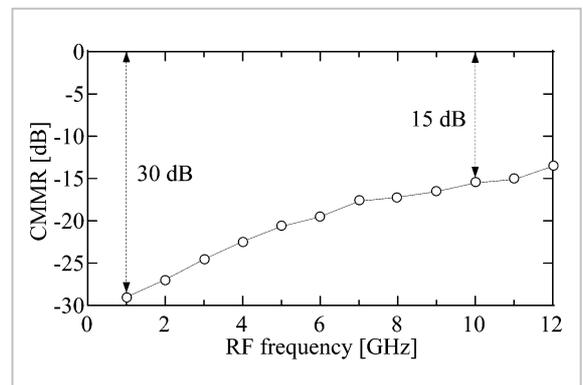


図5 同期検波時の光強度雑音抑圧度のRF周波数特性

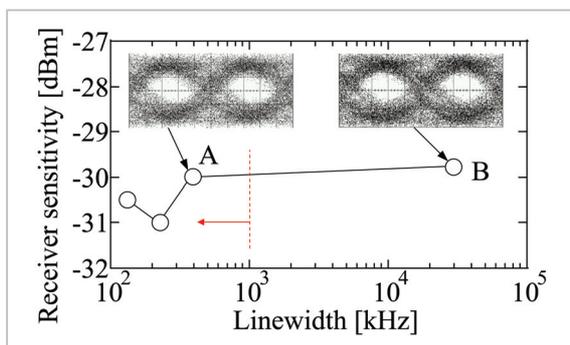


図6 QPSK ホモダイン同期検波時の受信感度の光源のスペクトル線幅依存性

位相同期検波の実験報告例 [4] [8] では、光源のスペクトル線幅はすべて数 100 kHz オーダーの領域 (図中点線より右側) であったが、提案方式では 30 MHz の線幅の光源 (図中 B) で線幅が 300 kHz の時 (図中 A) と比較しても受信感度はほぼ劣化せず、極めて良好な受信波形が得られている。これは提案方式が信号成分と同一の位相雑音を含む Pilot-Carrier を LN モジュールを用いて自己ホモダイン検波することにより、位相雑音がキャンセルされているためである。

3 空間域高効率光信号処理技術 (超高集積光信号処理)

2 章で示された時間領域での高効率化に加えて、空間領域での高効率化も次世代光システムの重要課題の一つである。すなわち、光には回折限界 (通信波長でおよそ $1 \mu\text{m}$) が存在するため、システムの集積化における根本的限界要因を与えている。そこで我々は近接場光相互作用を中核としているナノフォトニクス技術に注目し、光データルータにおける光宛先検索や光 CDM のような機能的要求とナノフォトニクスに顕著な物理原理を踏まえ、空間域での高効率光信号処理 (高集積光信号処理) の基盤的課題を検討した。

3.1 近接場光相互作用の局在性と信号処理機能の大域性

ここでは、光データルータで必要になる入力パケットの宛先とルーティングテーブルとの照合演算 (光宛先検索) を例題に、近接場光相互作用に基づく光信号処理の基礎を考える [9]。検索機能一般

では次の二つの基本的な機構が要請される。まず、(1) 一般に入力データは複数のビットにより構成され、それらビット全体に対して評価結果を得る必要である。すなわち、単に個別のビットのマッチ/非マッチを明らかにするだけでは不十分で、グローバルな評価機構 (global summation) が要請される。次に、(2) 入力データは数多くの検索対象データに対して供給されること、すなわちデータの同報 (broadcast) 機構の実現である。仮に (1) の素過程を回折限界以下のナノ空間に集積できたとしても、これらが大量に存在する超並列システムとして全体を機能させる必要がある。

ここで、上記 (1)、(2) のような大域的な機能性には、実際には伝搬光が大変適しており、従来の光信号処理で決定的な役割を果たしてきた。すなわち、伝搬光の文字通りの伝搬特性ゆえに、レンズや光導波路を用いれば大域的機能性は自然に実現される。しかし、その重大な課題の一つが回折限界であり、機能システムを実現するには全体サイズが非現実的に大きくなる。一方で近接場光の特徴は光が伝搬しないこと (局在性) であるので、物理的な局在性に依拠しつつも機能的には大域性を達成することが基本的な問題の一つとなる。そこで、以下では近接場光の次の二つの特徴、①近接する量子ドット間の共鳴的エネルギー移動機構、②このエネルギー移動は従来の伝搬光では禁制であること、を活用したアーキテクチャ例を示す。

3.2 データの和算機構 (global summation)

近接する量子ドット間の近接場光による相互作用を用いて、特定の量子ドットへ信号 (励起子) を移すことができる。例えば大きさが a の量子ドットと大きさが $\sqrt{2}a$ の量子ドットの間には共鳴エネルギー準位が存在し、この共鳴レベルを介して小さなドットに発生した信号 (励起子) は大きなドットへ移動することができる [10]。そこで、図 7 に示されるように小さなドットが大きなドットを取り囲む構造を取れば、小さなドットに存在する励起子は大きなドットへ移動する。これにより大域的演算である積算機構 $\sum x_i$ は適当なサイズの量子ドットの適当な配置によってナノスケールで実現されることになる。

ここで、励起子の移動機構は若干詳細には下記

のようになる。例えば、大きさ a の量子ドット QD_A と大きさ $\sqrt{2}a$ の量子ドット QD_B 間では共鳴エネルギー準位 (QD_A の (1, 1, 1) 及び QD_B の (2, 1, 1)) が存在して、この準位を介して QD_A の励起子は QD_B へ移動し、 QD_B の下準位 (1, 1, 1) に遷移する。エネルギーの散逸は QD_B でのサブレベル緩和だけなので、既存の光技術ばかりでなく LSI に比べても消費電力が極めて小さいことも特徴である。 QD_B の下準位が出力信号に関与する。ここで QD_B の下準位が他のドットからの信号によって既に占有されているときはパウリの排他律のためにエネルギー移動が許されないが、 QD_B の下準位が空くまで QD_A と QD_B の上準位の間において励起子が行き来を繰り返す章動現象が起きるため、最終的には励起子は QD_B の下準位へ移動できる。このように信号の双方向性が部分的に許容されることも global summation の基礎をなす。図 7 は CuCl 量子ドットを用いた原理実験であり、3 系統の異なる周波数の入力光 (381.3 nm, 376 nm, 325 nm) の組合せに対する出力信号 (384 nm) を示す。入力信号の数に応じた出力信号レベルが得られており、また、回折限界以下のスケールに集積されている様子が分かる [11]。

3.3 データのブロードキャスト (Broadcast)

入力データは数多くの検索対象データに対して供給する必要があるが、仮に個々のデータに対して個別の導波路などが必要となれば、それに必要な物理的体積が深刻な配線ボトルネックとなる。ただし broadcast 構造に着目すれば、近接場光相互作用による信号の移動機構が伝搬光では禁制であることを活用できる。例えば、 QD_B の上準位 (2, 1, 1) は伝搬光では励起することができないので (双極子禁制)、ナノデバイス内部の動作に影響を及ぼさない適当な周波数の光を選べば、波長スケール程度の内部に存在する複数の機能ブロックに対して一括してデータを供給することができる。すなわち、ナノデバイスの内部動作に介入するエネルギーレベル Ω_{int} 、入出力に介入するエネルギーレベル Ω_{in} 、 Ω_{out} に重ならない設計とすれば、異なる周波数の光を伝搬光で照射することで複数のビットをブロードキャストできる。図 8 は先と同じく CuCl 量子ドットを用いた原理実験の例であり、サンプル中に存在している複数の光スイッチ (■、●、◆) が全体に対して一様に照射された光で同様に動作している様子が分かる。すなわちデータの broadcast 機構が実現されている [12]。

以上の summation と broadcast 機構は非常に

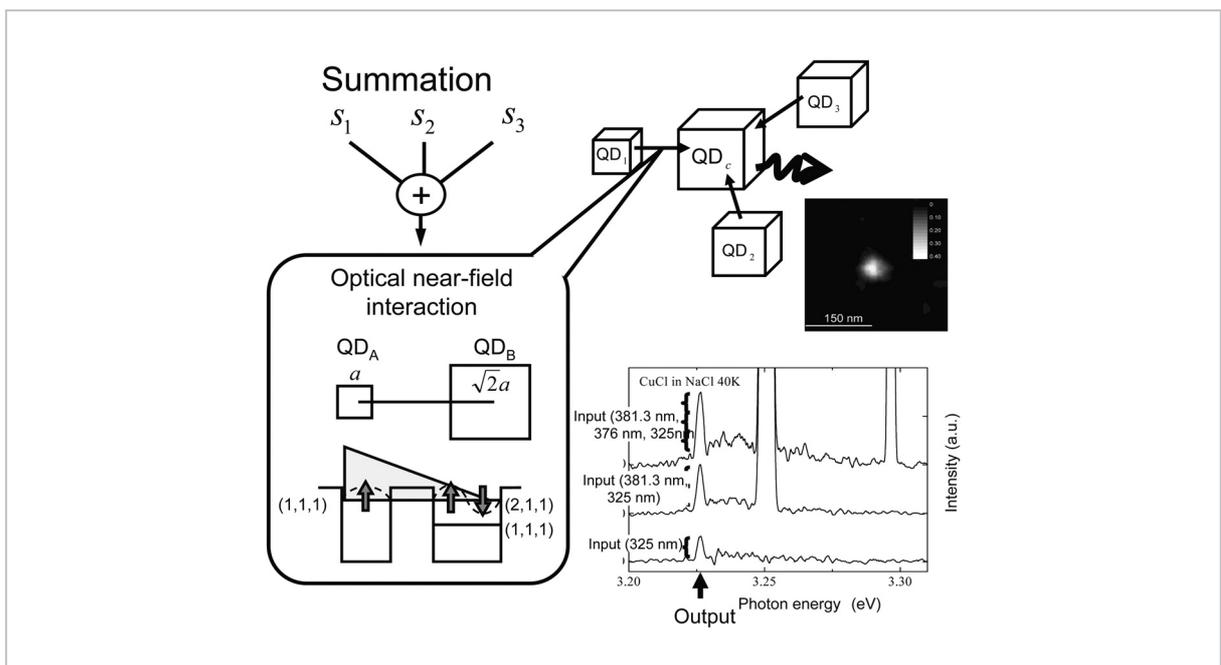


図7 近接場光相互作用によるデータの summation 機構

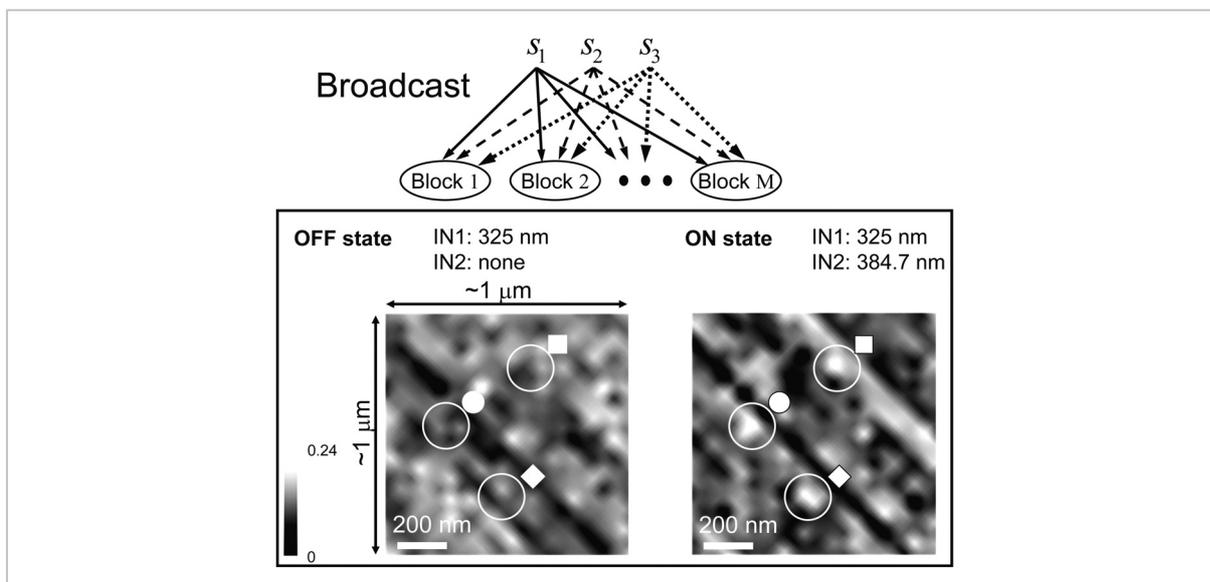


図8 近接場光相互作用に基づくデータの broadcast 機構

基本的な過程ではあるが、システムとしてはこれにより光宛先検索構造の最も基本的要件を満たしたことになっており、様々な展開を示唆できる。また、実用的には室温安定動作や通信波長帯動作が重要であるが、半導体量子ドット技術による原理確認も示しており [13]、更なる発展を目指している。

4 今後の展開

2010年ごろの導入が検討される 100 Gb イーサでは、現状の光中継増幅帯域不足が懸念されており、高効率多値光通信方式は伝送容量拡大とネットワークシステムの消費電力抑制を両立する技術の切り札の一つとして期待されている。さらには、動的に変動するトラフィックを所望信号品質を維持した上で効率的に收容するため、情報転送効率を適応的に 2~4 bit/Symbol 以上に設定可能とする

適応的高効率変調方式についても、これまでに NICT が開発してきた高効率光変調器(3-6 参照)や民間企業の持つ高性能 FEC 技術などと連携して検討を進めたい。また、超高集積光信号処理の基礎となるナノフォトニクス技術は、量子ドットや金属ナノ構造などの高度な実現技術と結びつき、次世代の光技術の中心的技術領域として、世界的に急激に研究開発が活発化している。次世代の重要技術の早期獲得を目指し、基盤技術を着実に押さえながら研究開発の進展を図りたい。

謝辞

日ごろよりご議論いただく東京大学大津元一教授、独立行政法人科学技術振興機構川添 忠研究員、情報通信研究機構松島裕一情報通信部門長、久保田文人研究主管及び関連の皆様へ深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1 “図解でわかる 最新 光ネットワーク技術のすべて”，第 1 章，NICT 超高速フォトニックネットワークグループ，日本実業出版社，2005.
- 2 K.Sekine, N.Kikuchi, S.Sasaki, S.Hayase, C.Hasegawa, and T.Sugawara, "Proposal and Demonstration of 10-Gsymbol/sec 16-ary (40 Gbit/s) Optical Modulation / Demodulation Scheme", in ECOC '04, We3.4.5, 2004.

- 3 R.A.Griffin and A.C.Carter, "Optical differential quadrature phase-shift key (oDQPSK) for high capacity optical transmission", in OFC'02, WX6, pp.367-368, 2002.
- 4 D.-S.Ly-Gagnon, K.Katoh, and K.Kikuchi, "Unrepeated optical transmission of 20 Gbit/s quadrature phase-shift keying signals over 210km using homodyne phase-diversity receiver and digital signal processing", Electron. Lett., Vol.41, No.4, pp.206-207, 2005.
- 5 T.Miyazaki and F.Kubota, "Superposition of DQPSK over inverse-RZ for 3-bit/symbol modulation/ demodulation", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.16, No.12, pp.2643-2645, 2004.
- 6 T.Miyazaki and F.Kubota, "PSK self-homodyne detection using a pilot carrier for multi-bit/symbol transmission with inverse-RZ signal", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.17, No.6, pp.1334-1336, 2005.
- 7 T.Miyazaki, "Linewidth-Tolerant QPSK Homodyne Transmission Using a Polarization-Multiplexed Pilot Carrier", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 2, pp. 388-390, 2006.
- 8 S.Norimatsu, K.Iwashita, and K.Noguchi, "An 8 Gb/s QPSK optical homodyne detection experiment using external-cavity laser diodes", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.4, No.7, pp.765-767, 1992.
- 9 M.Naruse, T.Miyazaki, T.Kawazoe, K.Kobayashi, S.Sangu, F.Kubota, and M.Ohtsu, "Nanophotonic computing based on optical near-field interactions between quantum dots", IEICE Transaction on Electronics Special Section on Nanophotonics, Vol.E88-C, No.9, pp.1817-1823, 2005.
- 10 T.Kawazoe, K.Kobayashi, J.Lim, Y.Narita, and M.Ohtsu, "Direct Observation of Optically Forbidden Energy Transfer between CuCl Quantum Cubes via Near-Field Optical Spectroscopy", Physical Review Letters, Vol.88, pp.067404-1-4, 2002.
- 11 M.Naruse, T.Miyazaki, F.Kubota, T.Kawazoe, K.Kobayashi, S.Sangu, and M.Ohtsu, "Nanometric summation architecture using optical near-field interaction between quantum dots", Optics Letters, Vol.30, No.2, pp.201-203, 2005.
- 12 M.Naruse, T.Kawazoe, S.Sangu, K.Kobayashi, and M.Ohtsu, "Optical interconnects based on optical far- and near-field interactions for high-density data broadcasting", Optics Express, Vol.14, pp.306-313, 2006.
- 13 T.Kawazoe, K.Kobayashi, K.Akahane, N.Yamamoto, and M.Ohtsu, "Demonstration of nanophotonic NOT-gate using near-field optically coupled quantum dots", Applied Physics B, to appear.



みやざき 哲弥

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループリーダー(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループリーダー) 工学博士
光通信技術



なるほ 誠

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員) / 兼東京大学大学院工学系研究科特任助教授(客員) 博士(工学)
光システム、ナノフォトニクス