

## 論文の内容の要旨

論文題目 集積フォトニクスを用いた短距離コヒーレント光伝送システムに関する研究

氏名 石村 昇太

クラウドコンピューティングや5G無線通信システムの普及により、通信トラフィックは近年指数関数的に増大している。これら大容量通信を支える技術として、光ファイバ通信も近年飛躍的な進歩を遂げている。90年代には波長多重技術や光ファイバ増幅技術が確立され、海底系システムにおいてはテラビット級の伝送レートが達成可能となった。しかしながら、当時の光変調方式の主流は光の強弱に情報をのせる強度変調であり、さらなる伝送容量拡大のため、2000年代からコヒーレント伝送技術の研究開発が盛んに行われた。コヒーレント伝送技術とは、光の強度だけでなく位相も情報伝達に用いる手法である。これにより光通信システムにおいても、無線通信システムのような高度な変調方式を採用することができるようになった。その後コヒーレント伝送技術は実用化され、現在では海底系システムをはじめ、都市と都市をつなぐ長・中距離系の伝送システムでも採用されるに至っている。

ところで、近年GoogleやFacebookなどの大規模データを扱う事業者が、メガデータセンターと呼ばれる超大型データセンターを各地に建設している。このメガデータセンター内では、莫大な数のサーバーがスイッチなどを介して接続されており、サーバー間で交換される通信量も莫大なものとなる。このようなデータセンター向けアプリケーションにおいてはコストの制限が非常に厳しく、超高速かつ安価な通信インターフェイスが必要とされている。コヒーレント伝送技術を、そのままこの様な短距離向けのシステムに適用することで大容量化は実現可能だが、一方でコストの増加は避けられない。そこで本論文では、上記の課題を解決する新たなコヒーレント伝送技術を2つのアプローチから提案する。

まず1つ目のアプローチとして、従来用いられている送信器及び受信器を簡素化し、より少ない部品点数でコヒーレントシステムを実現する構成について提案する。コヒーレントシステムの受信器には、偏波・位相ダイバーシティホモダイナ受信器が用いられ

ている。一般に位相ダイバーシティホモダイン受信器は、信号光と局発光を干渉させるカプラと、2つのバランスフォトダイオードあるいは4つのフォトダイオードから構成されている。さらにこれを偏波ダイバーシティ構成にすると、上記の位相ダイバーシティホモダイン受信器が2組（4つのバランスフォトダイオードあるいは8つのフォトダイオード）、信号光を分離するための偏波ビームスプリッタ及び、局発光を分離し偏波を合わせるためのビームスプリッタと偏波回転器が必要になる。そこで本論文ではストークスアナライザと呼ばれる、光の偏波状態を解析するための光回路構成をコヒーレント受信器に応用した、新たなコヒーレント受信器を提案する。本受信器では信号光と局発光を直交させることで、ストークスアナライザの $S_2$ 及び $S_3$ と呼ばれる両偏波間のビート成分から、信号光と局発光の積を抽出する。これによって必要なフォトダイオードの個数が、従来の8個から6個へと削減される。さらに信号光と局発光の合分波を、1つの偏波ビームスプリッタで行うことができる。原理検証のため、このストークスアナライザ型コヒーレント受信器を、空間光学系を作って実際に実装し、それを用いて100kmの伝送実験を実施した。実験では120Gb/sの偏波多重QPSK及び8QAM信号の伝送に成功した。

さらに本論文では、簡素なコヒーレントシステム向け偏波多重器構成を提案する。従来の偏波多重送信器は、位相変調器4つから構成されるIQ変調器2組を用意し、さらに偏波ビームスプリッタ及びコンバイナを用いて、それぞれのIQ変調器への光の分岐及び合波を行う。一方提案構成においては、位相変調器の数は2台のみでよく、位相変調器の間には1台の45度偏波回転器を配置する。通常コヒーレント伝送システムでは、QAMのような振幅及び位相を同時に変化させる変調信号は、IQ変調器を用いて生成するが、振値一定のPSKのような変調方式であれば、位相変調器1台でも生成可能である。本構成はこの性質を利用し、まず $x$  ( $y$ ) 偏波上の光に、位相変調器を用いてPSK変調をかける。次に45度偏波回転器を用いて両偏波上に同じ信号をコピーする。2段目の位相変調器には、理想的には極めて強い偏波依存性を有する位相変調器を用いる。すると、ある一方の偏波には変調はかかるが、もう片側には全く変調がかからない、という状況が実現できる。これによって $y$  ( $x$ ) 偏波のみをPSK変調する。この際、両偏波間の“相対位相”にPSK変調がかかることになるが、これはある種の差動符号化であり、 $x$ 偏波を基準として $y$ 偏波を変調している状況になる。一方で、位相変調自体の非線形性や2重変調によるスペクトルの広帯域化が、本手法のデメリットとなる。そのため受信側では、より広い帯域を必要としてしまう。本論文ではシミュレーションを通してこの広帯域化の影響を調べ、シンボルレート程度の帯域があれば、ペナルティを許容可能な範囲内に抑えられることを示す。

1つ目のアプローチとして、コヒーレントシステムそのものを簡素化する手法について論じてきたが、これらを用いても線幅に対する要求や温調による波長制御の必要性など、レーザーに求められる性能要求を緩和するには至っていない。これについては、更

なる低コスト化を実現する上では、避けては通れない課題である。そこで本論文では、2つ目のアプローチとして自己干渉型のコヒーレントシステムを提案する。これは現在セルフコヒーレントという形で、積極的に研究されている。セルフコヒーレントの最大の特徴は、局発光を受信側で送信側と独立に用意するのではなく、送信側にて信号光と同じ光源から生成し伝送する点である。従って原理的には、直接検波のようにレーザー位相雑音の無依存化が実現できる。また当然同じ光源を用いているため、局発光のレーザー波長を制御する機構も不要である。セルフコヒーレントには様々な形態があり、例えば最もシンプルなものは2芯ファイバを用いて、それぞれで信号光と局発光を送信する形態である。また局発光の周波数をずらして、信号光と周波数多重して送ることもできる。さらには局発光を偏波多重して送ることもできる。前者はある種のセルフヘテロダイン構成と考えられるが、受信側で単一PDを用いてこの信号を受信した場合、非線形なビート雑音の影響が避けられない。一方後者は、ストークスアナライザーを用いることで、このビート雑音を抑えつつ、かつ伝送路の偏波回転を信号処理で補償することもできる。そこで本論文ではこの偏波多重型の構成に着目する。

セルフコヒーレントの1つの問題点は、信号光と局発光のパスに経路差が存在する場合、レーザーの位相雑音の影響が無視できなくなる点である。これについては、これまでにいくつかの論文でも指摘されており、数値的な解析も行われている。一方本論文では、古くから知られている、線幅測定のための遅延セルフヘテロダイン干渉法の解析を応用し、議論の一般化を行う。これにより、本質的に性能に影響するパラメータが明確される。また理論解析とシミュレーション、さらに実験も行い、これらが十分に一致することを確認した。これらの議論から、セルフコヒーレントで高次QAM信号を伝送するための条件も明確化され、特に256QAMなどの信号伝送においては、集積フォトニクスを用いて経路差を最小化することが必須であることがわかった。

そこで実際にシリコンフォトニクスを用いて、偏波多重型セルフコヒーレント受信器向けのストークスアナライザーの実装を行った。ストークスアナライザーには、偏波分離及び回転の機構が必須であるが、シリコンフォトニクス上では、この目的のためテーパ導波路でのモード変換を用いたものが使用されることが多い。この構造では、TE<sub>0</sub>及びTM<sub>0</sub>モードが、テーパ導波路伝搬後にTE<sub>0</sub>及びTE<sub>1</sub>モードに変換される。両者を分離するために、通常非対称な導波路構造を有する方向性結合器を用いる。しかし非対称導波路による分岐は、それぞれでロスなどが異なるため、本論文では導波路構造が分岐後も対象なY字分岐を採用し、片側の分岐にTE<sub>0</sub>モードとTE<sub>1</sub>モードの和、もう片方にはそれらの差が出力されるような構成を用いた。この対象導波路型ストークスアナライザーを用いて、実際に入力信号の偏波状態を変化させながら偏波状態が取得できていることを、実験的に確認した。また変調信号を用いた伝送実験を行い、実装した受信器で信号が受信できていることも確認している。

以上の2つのアプローチから、短距離向け新規コヒーレント技術の提案を行った。こ

これらの成果は、今後の情報通信分野の発展に寄与するものであると考える。