

〈一般研究課題〉 高効率な都市規模光ファイバ通信ネットワーク

助成研究者 名古屋大学 森 洋二郎



高効率な都市規模光ファイバ通信ネットワーク

森 洋二郎
(名古屋大学)

Highly Efficient Fiber-Optic Metro Networks

Yojiro Mori
(Nagoya University)

Abstract :

Intra- and inter-datacenter traffic is now exploding. To process both kinds of traffic cost-effectively, intra- and inter-datacenter converged network architectures that use cost-effective transponders are needed. In this paper, we first propose a novel optical circuit switch architecture based on spatial super-channels which is basis of the intra- and inter-datacenter converged network. We construct part of a 1536×1536 optical switch and its performance is experimentally confirmed. Next, we propose a novel network architecture based on Kramers-Kronig (KK) receivers. KK-receiver-based systems can handle both intra- and inter-datacenter traffic more cost-effectively than coherent systems and attain higher transmission quality than legacy non-coherent systems. To confirm the feasibility of our proposed network architecture, we construct part of a 640×640 optical circuit switch and evaluate its performance when handling intra-datacenter traffic and inter-datacenter traffic; chromatic dispersion is managed in the receiver-side digital signal processing. 80 wavelengths in the C-band are fully evaluated through bit-error-ratio measurements.

1. はじめに

ストリーミングサービスやクラウドサービスの普及により、情報通信の基盤である光ファイバ通信ネットワークは人々の生活に不可欠なものとなっている。増加の一途をたどる通信需要に対応す

るためには、高効率な光ファイバネットワークの構築が急務である。通信トラフィックの多くは都市規模の光ネットワークに設置されるデータセンタにより処理される。データセンタにかかわる通信トラフィックの割合はデータセンタ内部で始終端するものが支配的であり、その量は全体の約7割を占める。一方で、成長率の点から評価するとデータセンタ間に発生する通信トラフィックが最も高い。このため、データセンタ内通信とデータセンタ間通信の双方を統合した高効率な都市規模光ファイバ通信ネットワークが必要とされている。データセンタ内では10km以下の短距離通信が必要とされるため、低性能ではあるが安価なIntensity modulation/direct detection (IM/DD)方式が用いられている。一方で、データセンタ間の通信には高価ではあるが高性能なコヒーレント検波方式の導入が望ましい。しかし、100km程度の比較的短距離の通信であるデータセンタ間通信に5000km以上の通信を可能とする高価なコヒーレント受信器を導入することはコスト効率の観点から課題がある。

本研究ではこの課題を解決するべく、データセンタ内ネットワーク及びデータセンタ間ネットワークを有機的に統合した都市規模光ネットワークを提案する。これを実現するために、直接検波受信方式を基本としながらも、デジタル信号処理による信号再生技術により100km程度の通信を可能とするクラマース・クロニヒ受信方式を導入する。この技術によりデータセンタ内及びデータセンタ間の通信を低コストで統合・共有化することが可能となることから、高効率な都市規模光ファイバ通信ネットワークの実現が期待できる。本研究ではまず、基礎的な光スイッチ構成として、データセンタ内通信向け光スイッチの大容量化を実現する手法について検討する。その後、データセンタ内ネットワークとデータセンタ間ネットワークを接続する光スイッチシステム構成についての検討を行う。

2. データセンタ内光スイッチの大容量化を実現する技術

まず、基礎的な光スイッチ構成として、データセンタ内通信向け光スイッチの大容量化を実現する手法について検討を行う。

2.1. 光スイッチの大容量化への課題

我々はこれまでに波長分割多重技術を利用した波長ルーティングスイッチと空間スイッチを組み合わせた光スイッチ構成を提案し、ポート数1536、総スループット1536Tbpsの光スイッチについて実証を行った[1]。この構成を用いて更なるスイッチの大容量化を実現するためには、波長ルーティングスイッチのスループットおよび空間スイッチのポート数を拡大する必要がある。しかしながら、波長ルーティングスイッチのスループットは使用する光増幅器の増幅帯域の制限により制限される。一方で、空間スイッチのポート数を増加させるとそれに伴って空間スイッチを構成するカプラの損失も増加する。これにより、空間スイッチのポート数の増加についても制限がある。さらに空間スイッチを構成する素子のコストはスイッチのポート数に対して非線形に増加する[2]。これらの理由から、従来の構成では光スイッチの大容量化には制約がある。

上記の制約を踏まえて更なる光スイッチの大容量化を実現するべく、波長分割多重と空間スイッチに加えて、空間分割多重技術に基づく空間スーパーチャネルを用いた新たなスイッチ構成を提案する。提案構成の実現可能性を確認するためにポート数1536(波長ルーティングスイッチポート数：96、空間スイッチポート数：16)の光スイッチの一部を構成し、7つの空間サブチャネルを用

いて1チャンネルあたり1.4Tbpsの偏波多重16QAM (DP-16QAM) 信号を生成し、使用した96波長全てについて伝送特性を評価した。これにより総容量2.1Pbpsの光スイッチの構成が可能であることが確認された。

2.2. 空間スーパーチャネルを用いた光スイッチ構成

提案する光スイッチの構成を図1に示す。スイッチは MN 個の空間スーパーチャネル対応波長可変送信器、 LN 個の $M \times M$ 空間スイッチ、 LM 個の $N \times N$ 波長ルーティングスイッチ、 MN 個の空間スーパーチャネル対応受信器で構成される。ここで L は空間サブチャネル数を表し、 N は使用する波長数を表す。波長可変送信器は N 波長に対応する。 $M \times M$ 空間スイッチは M 個の $1 \times M$ セレクタと M 個の $M \times 1$ カプラで構成される。 $N \times N$ 波長ルーティングスイッチは n 個の $(N/n) \times 1$ カプラ、 n 個のエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)と、 $n \times N$ 損失均一化波長周回性アレイ導波路回折格子(ULCF AWG)で構成される。例として 2×8 ULCF AWGを用いた 8×8 波長ルーティングスイッチの構成を図2に示す。 $1 \times N$ AWGを用いる代わりに、 $n \times N$ ULCF AWGを用いることで、波長ルーティングスイッチに用いられるカプラの次数を n 分の1に減らし、損失を抑えることが可能になる[1]。送信器は目的の受信器に割り当てられた波長に合わせて信号を生成する。生成された L 個のサブチャネルは、 L 本の単一コアファイバまたは L コアファイバを通り、 L 個の $M \times M$ 空間スイッチにそれぞれ入力される。各空間レイヤの空間スイッチはそれぞれ M 個の波長ルーティングスイッチから信号の出力先を選択して入力信号を伝送する。波長ルーティングスイッチでは、 n 個の $(N/n) \times 1$ カプラが最大 N 波の信号を多重する。多重された信号はEDFAによって増幅されたのち、 $n \times N$ ULCF AWGの各入力ポートへと入力される。 $n \times N$ ULCF AWGによって分波された各空間レイヤの信号は、空間スーパーチャネル対応受信器へと送られ受信される。空間サブチャネル間の遅延については補償する必要があるが、受信器側でデジタルバッファを挿入することで容易に補償が

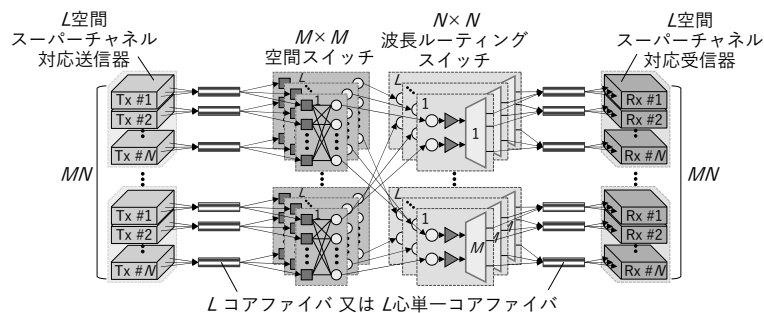


図1. 提案光スイッチ構成

可能である。

空間分割多重の導入により、空間スイッチのポート数を増加させることなくスイッチの大容量化が可能になる。提案光スイッチ構成と従来のスイッチ構成における、スイッチを構成するために必要な素子数の比較を表1に示す。提案構成においてハードウェアコストはスループットに対して線形に増加する。すなわちビットあたりコストは増加しない。

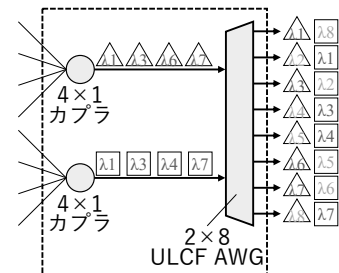


図2. 2×8 ULCF AWGを用いた 8×8 波長ルーティングスイッチ

表1. $MN \times MN$ スイッチを構成するために必要なスイッチ素子数. B は(サブ)チャンネルあたりのビットレートを表している. 提案構成は従来構成の L 倍のスループットを実現する.

	従来構成 (スループット: MNB)			提案構成 (スループット: $LMNB$)		
	全体	ポートあたり	ビットあたり	全体	ポートあたり	ビットあたり
空間スイッチ数	N	$1/M$	$1/MB$	LN	L/M	$1/MB$
1×2 セレクタ数	$NM(M-1)$	$M-1$	$(M-1)/B$	$LN(M-1)$	$L(M-1)$	$(M-1)/B$
EDFA 数	M	$1/N$	$1/NB$	LM	L/N	$1/NB$
AWG 数	M	$1/N$	$1/NB$	LM	L/N	$1/NB$

※ $M \times M$ 空間スイッチには $M(M-1)$ 個の 1×2 セレクタが使用される.

2.3. シミュレーション

提案光スイッチ構成により実現可能なスイッチの規模をシミュレーションにより明らかにした. 各空間サブチャンネルに100Gbpsの偏波多重QPSK (DP-QPSK) 信号または200Gbps のDP-16QAM 信号を使用し, 全C帯において50GHzグリッド上に整列された96波長の使用を仮定した. 空間多重度 L およびサブチャンネルごとの送信器出力をパラメータとした. 送信器から出力された信号は $M \times M$ 空間スイッチに入力される. このとき, 送信器と空間スイッチを接続する伝送路の損失は, 接続損失を含めて3.5dBとした. $M \times M$ 空間スイッチの損失はカプラの過剰損失を含め $\text{ceil}(\log_2 M) \times 4$ dBとした. なお, $\text{ceil}()$ は天井関数である. $M \times M$ 空間スイッチを通過した信号は 96×96 波長ルーティングスイッチへ伝送される. 波長ルーティングスイッチのパラメータ n の値は12とした. すなわち空間スイッチを通過した信号は 8×1 カプラによって合波され, EDFAによって増幅される. 増幅によって空間スイッチおよび 8×1 カプラの損失が補償された信号は, 1×2 スプリッタを通過し, 12×48 ULCF AWGに入力される. ここで, ULCF AWGの周波数ずれの影響を緩和するために, 12×96 ULCF AWGを用いる代わりに, 1×2 スプリッタと 12×48 ULCF EDFAを用いて 12×96 の波長ルーティングを実現している. この構成は 12×96 ULCF AWGを用いた場合に比べて 1×2 スプリッタの分損失が大きくなるが, 本構成の信号対雑音比はほとんどEDFA入力電力によって決定されるため, 損失の増加は信号品質にほとんど影響を与えない[1]. 8×1 カプラ, 1×2 スプリッタ, 12×48 ULCF AWGの損失はそれぞれ, 10.5dB, 3.5dB, 9dBとした. EDFAの雑音指数は5dB, 飽和出力は20dBmとした.

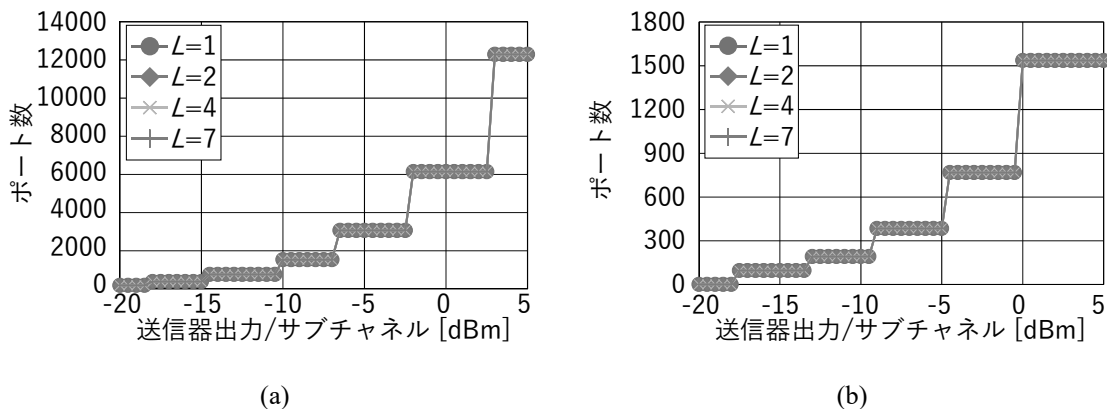


図3. 提案構成による実現可能スイッチ規模の見積もり. (a): サブチャンネルに100Gbps DP-QPSK信号を使用. (b): サブチャンネルに200Gbps DP-16QAM信号を使用. L は空間サブチャンネル数を表す.

図3(a)および図3(b)に結果を示す。図3(a)は各空間サブチャネルに100GbpsのDP-QPSK信号、図3(b)は200GbpsのDP-16QAM信号をそれぞれ用いた結果である。目標ビット誤り率(BER)は 10^{-2} とした。いずれの結果においても送信器出力に対する実現可能なポート数は空間サブチャネル数によって変化しない。サブチャネルあたりの送信器出力が0dBm、空間多重度が7の時、1.4TbpsのDP-16QAM信号を用いて 1536×1536 スイッチの構成が可能である。

2.4. 実験

提案光スイッチ構成の実現可能性を実験により確認した。空間スイッチのポート数を16、使用波長数を96として、ポート数1536の光スイッチの一部を構成した。7空間スーパーチャネル伝送を想定し、送受信器とスイッチの接続には7コアファイバを用いた。サブチャネルあたり200GbpsのDP-16QAM信号を用いて、7つの空間サブチャネルおよび使用したC帯上の96波長のすべての組み合わせについてBERを測定した。図4に実験系の構成を示す。任意波形発生器およびニオブ酸リチウムIQ変調器を用いて200Gbps DP-16QAM信号を生成した。送信器の出力パワーはシミュレーション結果に2dBのマージンを加え、2dBmとした。送信器の出力は1kmの7コアファイバを通り 16×16 空間スイッチの一部に入力された。このとき7コアファイバおよびファンイン、ファンアウトの損失は合計で3.5dBであった。 16×16 空間スイッチを通過した光信号は波長ルーティングスイッチに入力され、 8×1 カプラによって95波長のノンターゲット信号と合波された。 16×16 空間スイッチおよび 8×1 カプラの損失はそれぞれ16dBおよび10dBであった。合波された96波の信号はEDFAによって増幅されたのち、 1×2 スプリッタを通過し、 12×48 ULCF AWGに入力された。 12×48 ULCF AWGの他の11個の入力ポートにはクロストークとしてターゲット信号と同じ波長の信号を入力した。使用した 12×48 ULCF AWGの消光比は入出力ポートおよび波長に依存し、最小32dB、最大39dBであった。ULCF AWGの出力は1kmの7コアファイバを通過したのち受信器へと入力された。図5に実験結果を示す。横軸が各波長番号を表し、プロットの7種の記号がそれぞれの空間サブチャネルに対応する。全ての波長および空間サブチャネルの組み合わせでBERが目標値である 10^{-2} を下回っていることが確認できる。このときスイッチの総スループットは約2.1Pbps ($1536 \times 7 \times 200$ Gbps)となる。

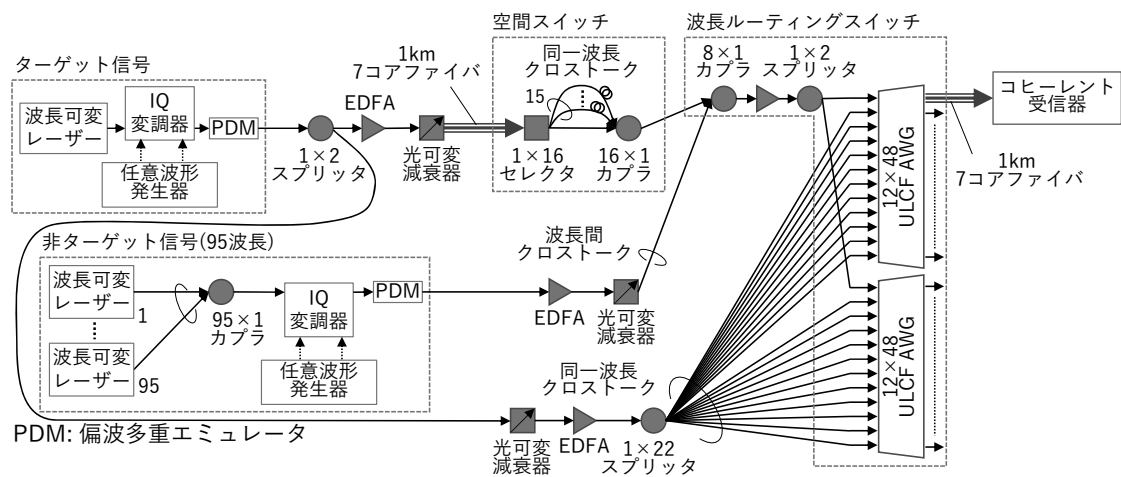


図4. 実験系構成

3. データセンタ内およびデータセンタ間統合光スイッチネットワーク

続いて、データセンタ内ネットワークとデータセンタ間ネットワークを統合した光スイッチネットワーク構成についての検討を行った。なお、本章で提案するデータセンタ内およびデータセンタ間統合光スイッチネットワークに用いる光スイッチの基本構成は、前章で検討を行ったデータセンタ内通信向け光スイッチと同様である。したがって、前章で提案した光スイッチの大容量化を実現する技術を適用することが可能である。

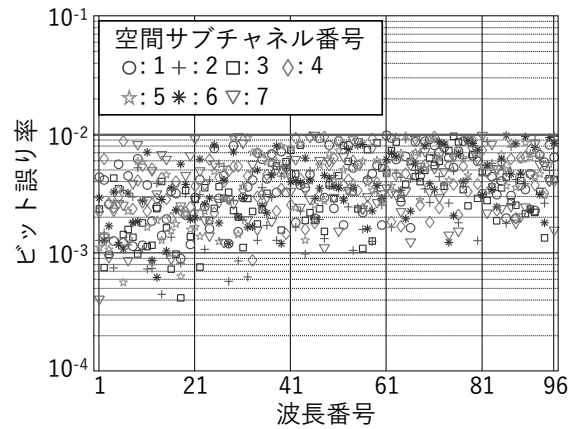


図5. 実験結果

3.1. 光スイッチネットワーク構成

図6に提案する光スイッチネットワークの構成を示す。本システムではデータセンタ内及びデータセンタ間通信用の送受信器と、図7に示す光スイッチを用いる。この光スイッチはMN個の波長可変送受信器、N個のM×M空間スイッチ、S個のN×1カプラおよび(M-S)個のN×N波長ルーティングスイッチで構成され、ブロッキングのないスイッチ処理が実現可能である。この光スイッチの(M-S)個の波長ルーティング部に設けられた出力ポートにはデータセンタ内のラックに備えられたトップオブラック(Top of rack: ToR)スイッチの受信器が接続され、データセンタ内の通信トラフィックをスイッチングする。一方、光スイッチの一部はデータセンタ内のToRスイッチではなくメトロネットワークと接続

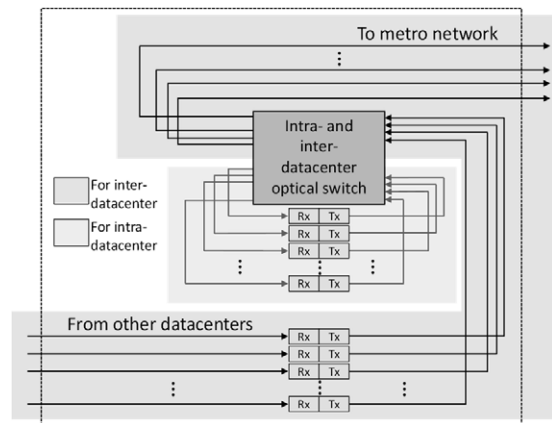


図6. データセンタ内及びデータセンタ間統合光スイッチネットワーク

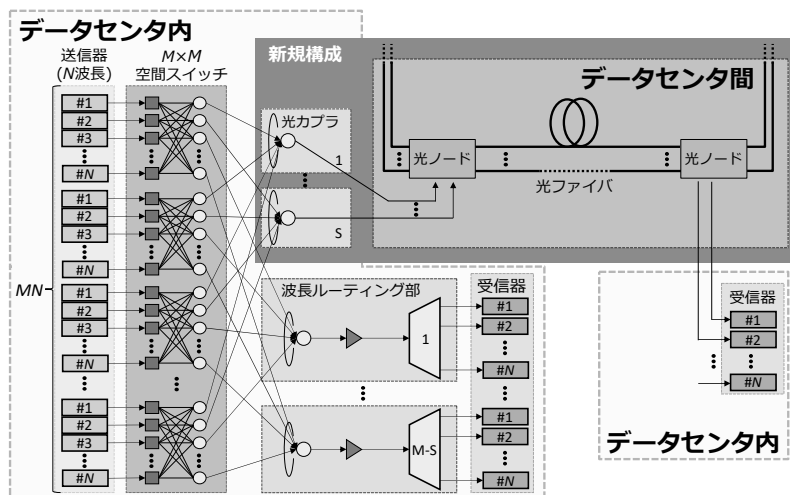


図7. データセンタ内及びデータセンタ間統合光スイッチ構成

されており、波長可変送信器と空間スイッチ部で適切な波長と接続ファイバを選択して信号をメトロネットワークに挿入することにより任意のデータセンタへ信号を送信することができる。他のデータセンタから送信された信号は、目的のデータセンタ内部の送受信器に入力される。この送受信器で光信号は光電気変換および電気光変換され、データセンタ内部の光スイッチに入力される。送信器で適切な波長を選択して送信することで、光信号は光スイッチを通過し目的のToRスイッチへと入力される。

3.2. クラマース・クローニッヒ受信方式

ここで、データセンタ間通信の送受信器は波長分散補償機能を有していなければならない。現行方式では、コヒーレント受信器の使用が検討されているが、高価なコヒーレント受信器を比較的短距離の通信に利用することはコスト効率の観点から課題がある。一方、近年研究が進められているクラマース・クローニッヒ受信方式は直接検波方式を基本としながらもデジタル信号処理(Digital signal processing: DSP)により波長分散補償を行うことができる。クラマース・クローニッヒ受信方式を提案する光スイッチネットワークへ導入することにより、高価なコヒーレント受信器を用いることなく、データセンタ間の通信が可能となる。さらに、データセンタ内の通信とデータセンタ間の通信を同一の送受信方式で行うことにより、メトロネットワークへの接続時に高消費電力な光電気変換および電気光変換を必要としない低コスト光スイッチシステムの実現が可能である。

クラマース・クローニッヒ受信方式を実現するためには、受信された信号が最小位相条件を満たしていることが必要である[3]。この条件を満たしつつ受信された信号の位相は、ヒルベルト変換を用いることでその強度情報から一意に求められる。最小位相条件を満たす信号を $h(t)$ とすると、その位相 $\phi(t)$ と強度 $|h(t)|$ の関係は以下の式で表される。

$$\phi(t) = \frac{1}{\pi} \text{p. v.} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \frac{\log[|h(t')|]}{t-t'}$$

信号が最小位相条件を満たしていることは、複素平面上で信号が原点に対して回転していないことに等しい[3]。

しかし、通常のQAM信号の複素電界振幅は複素平面上の原点を中心に変動しており、そのままでは最小位相条件が満たされず、クラマース・クローニッヒ受信方式による復調はできない。QAM信号が最小位相条件を満たすためには信号に連続波を加算して複素電界の振幅にオフセットを与える必要がある。情報を伝送する信号成分を $E_s(t)$ とし、この信号の帯域幅が B であるとする。加える連続波の振幅を E_0 とすると、クラマース・クローニッヒ受信方式で受信可能な信号 $E(t)$ は、 $E(t)=E_s(t)+E_0\exp(-i\pi B)$ とあらわされる[3]。連続波は情報を伝送する信号スペクトルの左右どちらかの端に周波数を設定して加えられる。また連続波の振幅 E_0 は最小位相条件を満足するために、 $|E_0| > |E_s(t)|$ の関係を満たす必要がある。この信号 $E(t)$ をフォトダイオードで自乗検波すれば、その出力電流 $I(t)$ は $I(t)=|E(t)|^2$ とあらわされる。情報を伝送する信号 $E_s(t)$ は以下に示すクラマース・クローニッヒの関係式によって、この電流 $I(t)$ から求められる[3]。

$$E_s(t) = \{\sqrt{I(t)}\exp[i\phi_E(t)] - E_0\} \exp(i\pi Bt),$$

$$\phi_E(t) = \frac{1}{2\pi} \text{p. v.} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \frac{\log[I(t')]}{t-t'}.$$

クラマース・クローニッヒ受信方式によって受信された信号はその強度から位相が完全に回復されるため、コヒーレント方式を用いて受信された信号と同様にDSPによる様々な補償技術の適用が可能である。これによりDSPを用いた波長分散補償が可能になり、直接検波方式でありながら波長分散の影響が無視できない100kmを超える伝送路での通信も可能である。

実際のシステムにおいては図8(a)に示すように、信号生成時にQAM信号に連続波をあらかじめ加えたうえで送信する場合、あるいは図8(b)のように受信器の直前で連続波を合波して検波する場合のいずれにおいてもクラマース・クローニッヒ受信方式の導入は可能である。また、送信する信号については連続光を加えて最小位相条件を満たす必要がある以外には特別なスペクトル整形などは必要なく、コヒーレントシステムに導入されているQAM信号に連続光をカプラなどで合波するのみで受信が可能である。

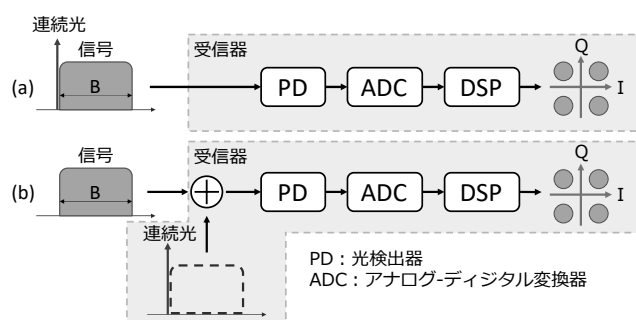


図8. クラマース・クローニッヒ受信器の構成。
(a)QAM信号にあらかじめ連続波を加える場合及び
(b)受信器の直前で連続波を加える場合

3.4. 実験

提案する光スイッチネットワークの有効性を実験により確認した。空間スイッチのポート数を8、使用波長数を80として、ポート数640の光スイッチの一部を構成した。実験系を図9に示す。クラマース・クローニッヒ受信方式の使用を想定した43Gbps QPSK信号を使用し、C帯上の80波についてデータセンタ内伝送およびデータセンタ間伝送の両方についてビット誤り率(Bit-error ratio: BER)を測定した。目標BERは誤り訂正能力を考慮し 10^{-2} とした。送信器で生成された43Gbps QPSK信号は、最小位相条件を満たすように連続波が付加されたのち、スイッチネットワークへ挿入された。このときQPSK信号の出力パワーは-1dBmで連続波のパワーは信号パワーのおよそ8倍とした。信号はデータセンタ内の伝送を想定した2kmのシングルモードファイバ(Single-mode fiber: SMF)を通過したのち640×640光スイッチへ入力された。ファイバの損失は0.2dB/

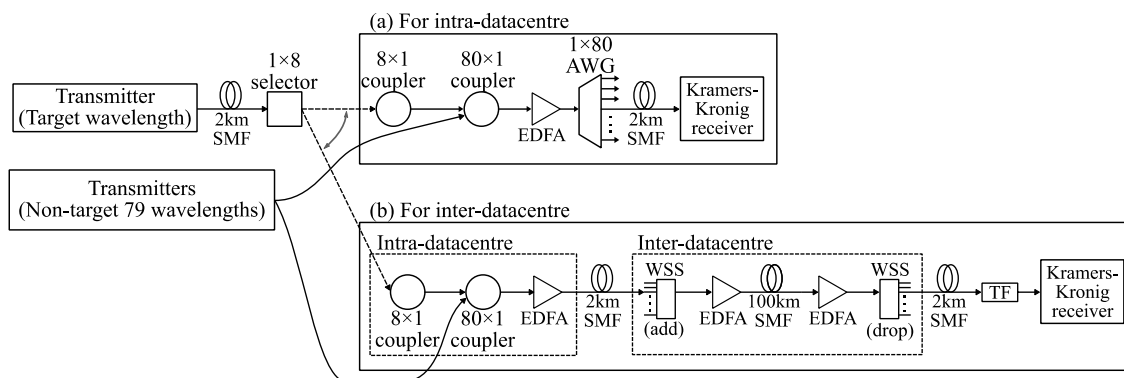


図9. 実験系構成

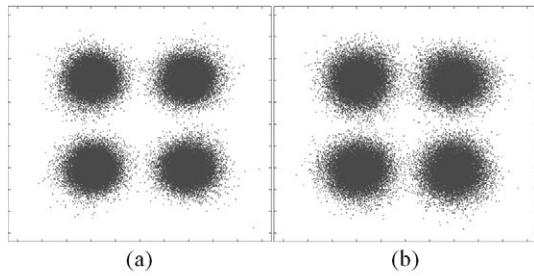


図10. 受信信号のコンスタレーションマップ.
(a): データセンタ内. (b): データセンタ間.

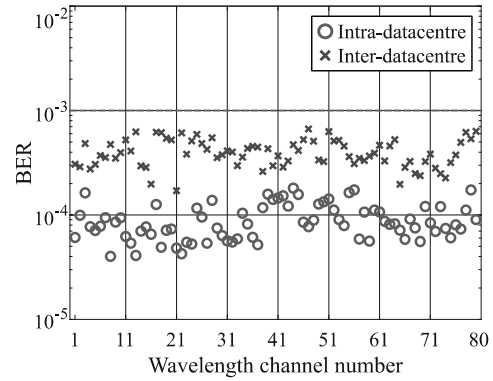


図11. データセンタ内通信信号及びデータセンタ間通信信号のBER.

km, 分散パラメータは 16.5ps/nm/km とした. 8×8 空間スイッチ部を通過したのち, データセンタ内通信信号は波長ルーティング部へと入力され, 80×1 カプラによって79波のノンターゲット信号と合波された. 8×8 空間スイッチおよび 80×1 カプラの損失はそれぞれ 11dB および 23dB であった. その後80波の信号はEDFAによって増幅され, 1×80 AWGによって波長ごとに分波された. AWGから出力されたターゲット信号は再び 2km のSMFを通過したのち受信器へと入力された. 一方, データセンタ間通信信号は 8×8 空間スイッチ部を通過した後, 波長集約部へと入力され79波の非ターゲット信号と合波されたのちEDFAによる損失の補償が行われた. 80波の信号はその後, 2km のSMFを通過したのち波長選択スイッチ(Wavelength-selective switch: WSS)によってメトロネットワークへと挿入された. メトロネットワークでは 100km の光ファイバおよび光増幅器を通過することで, 波長分散と雑音が付加された. その後, 信号はWSSおよび 2km のSMFを通過したのち目的のデータセンタ内の受信器に入力された. 受信端ではフォトダイオードにより自乗検波が行われたのち, 3.2節に示すクラマース・クローニッヒの関係式を用いて受信複素電界の位相を復元する. その後, DSPにより波長分散補償が行われ, 信号が復元されたのち, BERが計算された.

図10(a)および図10(b)はそれぞれデータセンタ内通信信号およびデータセンタ間通信信号の受信後のコンスタレーションマップを示している. データセンタ内通信およびデータセンタ間通信のいずれの場合においてもシンボルの状態が明確に分離されていることが確認できる. また, データセンタ間通信信号においては, コヒーレント受信器を用いることなくDSP処理により分散補償が行われたことが確認できる. 図11に測定されたBERのプロットを示す. 横軸が各波長番号を表し, 2種の記号がそれぞれデータセンタ内伝送時とデータセンタ間伝送時のBERに対応する. データセンタ間通信信号はデータセンタ内通信信号と比較するとBERの数値が高いことが確認できる. これはデータセンタ内通信に比べて長距離を伝送したことによるものである. しかし, データセンタ内通信およびデータセンタ間通信の両方において全ての波長のBERが目標値である 10^{-2} を下回っていることが確認できる.

4. 結論

本研究では, まず波長分割多重および空間分割多重を用いた新たな光スイッチ構成を提案した. 従来のスイッチに用いられている波長分割多重および空間スイッチに加えて空間スーパーチャネルを導入することで, ビットあたりコストを増加させることなくスイッチの大容量化が可能となる.

ポート数1536, 総スループット2.1Pbpsのスイッチを構成し, シミュレーションおよび実験にて提案構成の実現可能性を確認した. 本構成に用いられている空間スーパーチャネル技術は次に提案したデータセンタ内及びデータセンタ間統合光スイッチネットワークにも適用可能である.

続いて, クラマース・クロニッヒ受信方式を用いたデータセンタ内及びデータセンタ間統合光スイッチネットワークを提案した. 直接検波に基づく受信方式でありながらDSPによる波長分散補償が可能なクラマース・クロニッヒ受信方式を用いることで, 大規模かつ低コストにスイッチネットワークの構築が可能である. 640×640規模のデータセンタ内光スイッチの一部を構成し, 4kmのデータセンタ内伝送および106kmのデータセンタ間伝送を想定した実験により, 提案光スイッチネットワークの実現可能性を確認した.

参考文献

- [1] H. Nagai, Y. Mori, H. Hiroshi, and K. Sato, “Design and verification of large-scale optical circuit switch using ULCF AWGs for datacenter application”, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 10, pp. 82–89, 2018.
- [2] K. Sato, “Realization and Application of Large-Scale Fast Optical Circuit Switch for Data Center Networking”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 36, pp. 1411–1419, 2018.
- [3] A. Mecozzi, C. Antonelli, and M. Shtaif, “Kramers–Kronig Coherent Receiver”, OSA Optica, vol. 3, pp. 1220–1227, 2016.