

## 3-2 非同期コヒーレント光 CDMA の最新技術

### 3-2 Emerging Technologies for Asynchronous Coherent OCDMA

王 旭 和田尚也 北山研一

Xu Wang, WADA Naoya, and KITAYAMA Ken-ichi

#### 要旨

本稿では非同期のコヒーレント光 CDMA の実現のためのキーテクノロジーについて最近の状況を概説する。具体的には、スペクトル位相符号化に対応した空間光位相変調器 (SLPM : spatial lightwave phase modulator) とマイクロリング共振器 (MRR : micro-ring resonator) 及び時間拡散符号化に対応した超格子構造ファイバブラッググレーディング (SSFBG : superstructured fiber Bragg grating) とアレイ導波路格子 (AWG : arrayed wave guide) による符号・復号器などの新しい符号・復号器並びに周期分極ニオブ酸リチウム (PPLN : periodically poled lithium niobate) と光ファイバの非線形性を用いた光閾値処理技術である。最近では FEC も光 CDMA システムに応用されている。

さらに最近筆者らは 16×16 ポートの AWG 型符号・復号器及び FEC を伝送する ITU-T G.709 勧告の OTN フレームを用い、12×10.71 Gbit/s という画期的スループットの非同期光 CDMA システムを実証したのでこれを報告する。

#### [キーワード]

光符号分割多重接続, 光ノイズ, 多重接続インタフェース, ファイバブラッググレーディング, アレイ導波路格子, スーパーコンティニウム, 光閾値回路, 順方向誤り訂正  
Optical code division multiple access, Optical noise, Multiple access interference, Fiber Bragg grating, Arrayed waveguide grating, Supercontinuum, Optical threshold, Forward error correction

## 1 光CDMAの背景

通信ネットワークで最も重要なセグメントがラスト・ワンマイル(最後の1マイル)であることはよく知られている。これが最も重要である理由は、収益源となる企業や個人ユーザへのリンクがこの部分によってもたらされるためである。次世代のラスト・ワンマイル網(アクセス網)は、次世代サービス(イーサネット、動画及び音声)をすべて同時に提供することができ、通信分野の次のブームをもたらす新たな起爆剤になるものと期待される。その要求に対して十分な帯域を提供できるのは光だけであり、具体的には PON (passive optical network) がそれである。それを実現する光アクセス方式には、既に時分割多重接続 (TDMA : time division multiple access)、波長分割多重接続

(WDMA : wavelength division multiple access)、副搬送波多重接続 (SCMA : sub-carrier multiple access) 及び符号分割多重接続 (CDMA : code division multiple access) がある。図 1 にこれらの方式の違いを示す。

CDMA 方式はワイヤレス通信で大きな成功を収めた方式であり、ユーザに一意のコード(符号)を割り当てることによって多重接続を行う [1]。この考え方は 80 年代半ばに光 CDMA (OCDMA) として光ファイバ通信システムに対する応用が提案された。この方式では符号化・復号化の処理がすべて光領域で行われる [2] - [4]。光 CDMA ネットワークでは異なるユーザに異なる符号を割り当てて伝送する。光 CDMA の特徴及び利点には次のようなものがある [4] - [9]。

(1) 全光処理：ワイヤレス CDMA とは異なり、

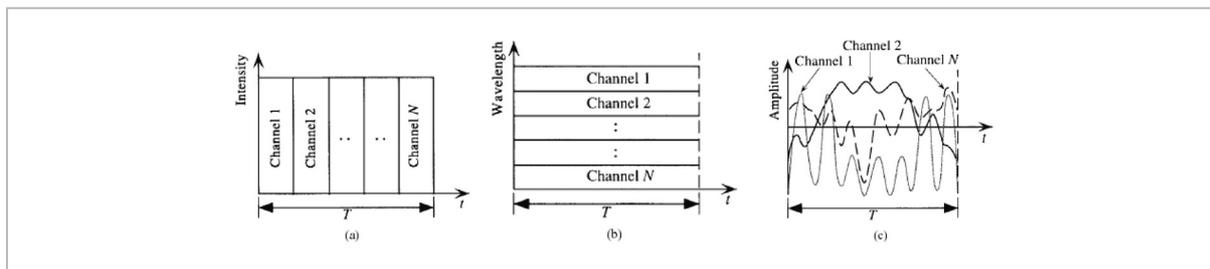


図1 光多重接続の方式

(a) TDMA、(b) WDMAとSCMA、(c) 光CDMA

光 CDMA では符号化処理はすべて光で行われる。これは PON の条件として好都合である。

- (2) 完全非同期アクセス：光 CDMA ネットワークは完全な非同期アクセスで動作し、複雑かつ高価な電子機器やプロトコルが必要ない。完全に非同期の伝送モードをサポートするという他にはない利点により、光 CDMA はバースト性トラフィックのネットワークに最適である。
- (3) 低遅延アクセス：光 CDMA では符号化処理が全光的かつ受動的に行われるため、遅延の少ないアクセスが実現する。
- (4) 帯域の動的割当てとオンデマンドなソフトキャパシティ：新規加入者のネットワークへの登録と解約者のネットワークからの削除がこの機能によって大幅に簡単になる。
- (5) プロトコルのトランスペアレンシと分散型アーキテクチャ：符号化処理を物理層で行うことにより、複数プロトコルのトラフィックが容易にサポートできる。同時に、分散型の単純なネットワーク・アーキテクチャによってネットワーク管理が簡素化される。

- (6) QoS (サービス品質) 制御の柔軟性向上：光 CDMA ネットワークにおいて異なる符号を与えることにより QoS の保証が物理層で管理できるようになる。

以上より、次世代の広帯域ネットワークとして光 CDMA は極めて有望な候補であり、現在、注目度が高まっている。図 2 は、 $N \times N$  の基本的なブロードキャスト型光 CDMA のネットワーク・アーキテクチャを示したものである。図では、各トランスミッタからの信号が各レシーバに送られている。各ノードには、波長可変の光 CDMA 符号器を備えた波長可変トランスミッタと、波長固定の光 CDMA 復号器及び後続のローパスフィルタと閾値回路を備えた波長固定レシーバが設けられている。

これまで幾つかの光 CDMA スキームが提案されてきたが、それらは図 3 に示すように二つの基準を用いて分類できる [9]。一つ目の基準は動作原理である。「インコヒーレント光 CDMA」では光パワーに基づいて符号化が行われる。そのため、光符号 (OC : optical code) はユニポーラ型 (0, 1) で処理される。一方、「コヒーレント光 CDMA」

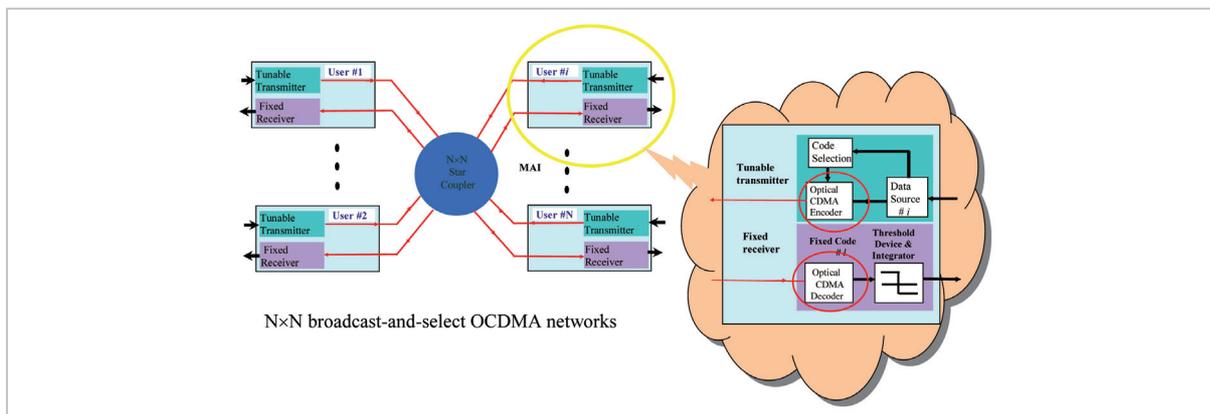


図2 光 CDMA 網の例

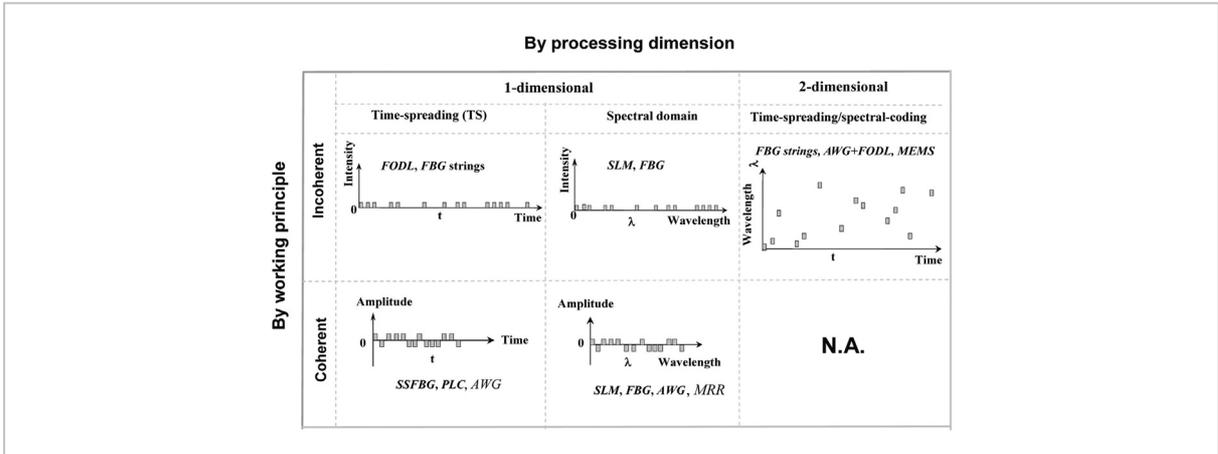


図3 光CDMAスキームの分類

では場の振幅に基づいて符号化が行われる。この場合 OC はバイポーラ型 (-1, -1) で全光的に処理される。もう一つの基準は処理次元である。符号化の方法には、「時間領域」又は「周波数領域」のいずれかで行う 1 次元 (1D) と、「時間領域」と「周波数領域」で同時に行う 2 次元 (2D) とがある。

これまで光 CDMA 用の符号・復号器として用いられてきた素子には、光ファイバ遅延線 (FDL: fiber delay line)、空間光変調器 (SLM: spatial lightwave modulators)、アレイ導波路格子 (AWG: arrayed-waveguide-grating)、平面光導波路 (PLC: planar light wave circuits)、ファイバブラッググレーティング (FBG: fiber-Bragg-gratings)、超格子構造 FBG (SSFBG: superstructured FBG)、マイクロリング共振器 (MRR: Micro-ring resonator) 及び MEMS (micro-electro-mechanical system) がある。図 3 には各光 CDMA スキームに使われる素子のタイプも記載した。

## 2 キーテクノロジー

### 2.1 符号・復号器

(1) SLPM と MRR による高分解能のスペクトル符号化

SPECTS (Spectral Phase EnCoded-Time Spreading) 光 CDMA は、パルス整形の考え方に基づいている。この方式では、パルスのスペクトルの異なる領域に異なる位相シフトを与えることによってパルスの包絡線を操作する [17]。与えた位相シフトによってフェムト秒パルスがノイズ状バーストのように立ち現れるときに符号化が起こり、そのバーストに対して逆位相シフトを与えると復号化が起こって元のパルスが復元される。図 4 は、別々のグループによって開発された 3 種類の SLPM (空間光位相変調器) について構成と動作を示したものである。図 4 (a) は基本構成の SLPM 型光 CDMA 符号・復号器であり、31 チップの M 系列を使用してスペクトル位相符号化を

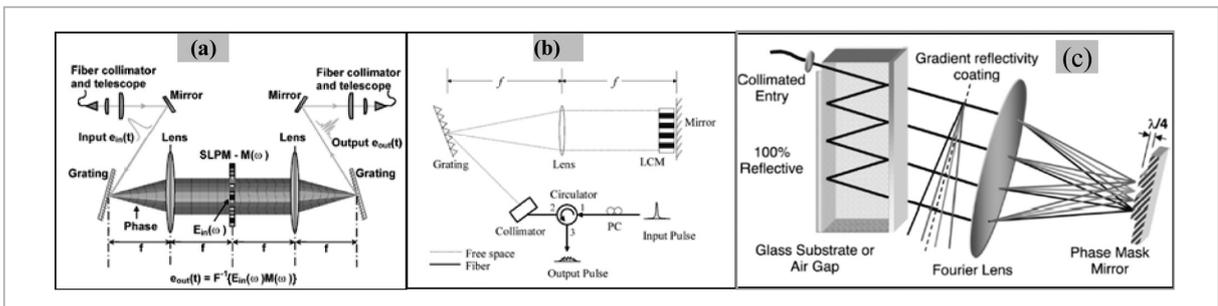


図4 SLPM型光CDMA符号・復号器の構成と動作

(a) SLPM型光CDMA符号・復号器 [19]、(b) 液晶変調器タイプの光CDMA符号・復号器 [18]、(c) 光CDMA用の超微細光DMUX [20]

行う。異なるチップとの周波数間隔は約 75 GHz である [19]。図 4 (b) は液晶変調器を用いた反射構成の光 CDMA 符号・復号器であり、127 チップの M 系列を使用してスペクトル位相符号化を行う。異なるチップとの周波数間隔は約 15 GHz である [18]。図 4 (c) は光 CDMA の符号・復号に超微細光デマルチプレクサを用いた構成である。16 チップのアダマール符号を使用し、チップ間隔は約 5 GHz である [20]。

上の方式はバルク光学系に基づいており、挿入損失が大きくコンパクトさに欠ける。この用途ではマイクロリング共振器 (MRR) 素子が理想的である。これは超高周波数分解能を実現するとともに、プログラム可能で安定的かつ正確な位相制御による微調整が可能である。MRR 型符号・復号器は共通の入力バスと共通の出力バスを持つほか、両者の間には 4 次のマイクロリング共振器を備えており、波長選択性を持つクロスコネクトとして機能する。この構成を示したのが図 5 である。リング型とバス型の導波路は Hydex の材料系で製造され [21]、コア対クラッドの屈折率比は 17% であった。隣り合う二つの周波数ビン間の相対位相シフトは熱光学位相シフタ (薄膜ヒータ) によって制御される。これは図 5 において網掛けで示した部分である。位相は 0 から  $\pi$  まで連続的に変化

できる。実証には 10 GHz/チップの 4 チップ・アダマール符号を用いた。

これらすべての素子は優れた可変性を備えており、光 CDMA において大きな柔軟性を持つ。コヒーレント SPECT 光 CDMA における一つの課題は周波数効率の低さである。符号化のパフォーマンス向上と利用可能符号の増強のためには、一つの光 CDMA システムにおける符号長を長くすることが好ましいが、そのためには多くの周波数リソースが必要となり、周波数効率が低下する。これを改善するには超高分解能の符号化デバイスを使用し、光源から出る超短光パルスの個々のモードを個別に制御することが必要になる。しかし、光源から出る波長線を符号化デバイスの通過帯域と一致させることは極めて困難であり、レーザー光源と符号化デバイスの両方に対して厳しい安定性が要求されることになる。

(2) SSFBG と AWG によるコヒーレントな時間拡散

SSFBG は、屈折率変調の分布が長さ方向にゆっくり変動する FBG だと定義される [12] [14]。SSFBG では図 6 (a) に示すように異なるセグメント間に位相シフトを挿入することにより、完全な複素屈折率変調分布を実現することができる。位

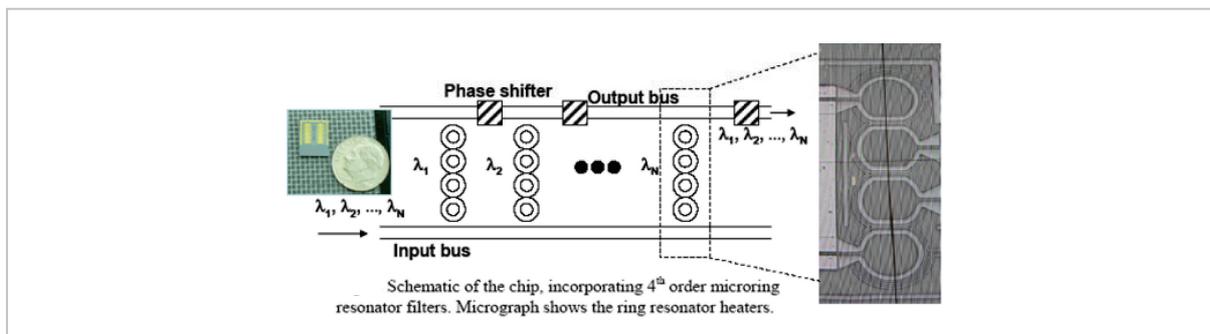


図5 MRR 型 SPECT 光 CDMA 符号・復号器

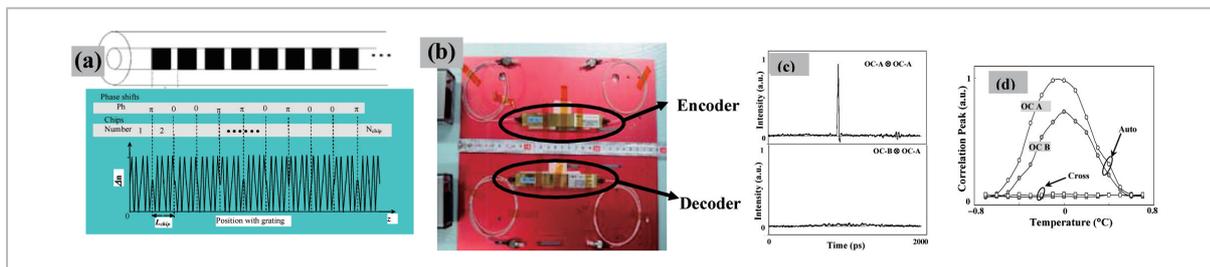


図6 超長光符号処理に適した位相シフトされた SSFBG 型光 CDMA 符号・復号器

(a) 構成図、(b) 511 チップ SSFBG の写真、(c) 自己相関と相互相関、(d) 符号化能力と温度の関係

相シフトしたこの SSFBG に短い光パルスを注入すると、コヒーレントな短い光パルス列が生成できる。位相は SSFBG 内における位相シフトパターンによって決まる。もし屈折率変調がグレーティング全体にわたって一定であれば光はグレーティングの全長を透過でき、グレーティングの個々のセグメントが反射応答に及ぼす寄与はほとんど等しくなる。そのため位相シフトした SSFBG は光トランスバーサルフィルタとして作用し、そのインパルス応答から 2 位相偏移変調 (BPSK : binary phase-shift-key) [12] 又は 4 位相偏移変調 (QPSK : quaternary-phase-shift-key) [13] の光符号を生成するほか、符号認識のために相関を実施することもできる。このように位相シフトされた SSFBG は、一つの短い位相マスクを用いて連続格子描画 [12] 又はホログラフィ法 [15] によって作製できる。これらの方法は異なる超長光符号を作る上で大きな柔軟性を発揮する。BPSK や QPSK のほか、ときにはそれより位相レベルの多い光符号に対して高精度の位相制御が実現する。

SSFBG タイプの符号・復号器が持つ利点には、超高チップレートを持つ超長光符号を生成する能力、偏波に影響されないパフォーマンス、符号長に左右されない低挿入損失、光ファイバシステムとの本質的な適合性、高いコンパクト性及び低コストがある。図 6 (b) に示すのは画期的に長い 511 チップ、640 Gchip/s の SSFBG [15] [16] である。チップ長とグレーティングの全長はそれぞれ 0.156 mm と 80 mm であり、これは光符号が約 800 ps で生成される 640 Gchip/s のチップレートに相当する。この SSFBG はホログラフィ法によって作製された。中心波長は 25 °C で 1550 nm だった。図 6 (c) に自己・相互相関を示す。これは非常に高いコントラスト比を示している。SSFBG の中心波長は環境温度によってシフトし得る。図 6 (d)

は、温度変化が自己相関と相互相関のピークに影響を与える様子を示す。OC-A に対する温度変位許容差は  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  であったが、これはこのパッケージの温度安定性の範囲内 ( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) である。このような超長 SSFBG の光 CDMA 符号・復号器を使うことにより、非同期のマルチユーザ光 CDMA の実験が実証された [16]。

もう一つの新しい光符号の符号・復号器である AWG 型は、もともとは光パケット交換の実験において光ラベル処理を行うために提案されたものであった [22] [23]。図 7 (a) は AWG 型のマルチポート型光 CDMA 符号・復号器を示す。このタイプのもは、一連の時間拡散光符号の生成と取り出しを一つのデバイスで同時に行うことができる [22]。図 7 (b) は  $16 \times 16$  ポートの AWG 型符号・復号器の写真である。複数の光符号を一つのデバイスで同時に処理できるという独自の機能により、費用対効果の高い交換局向けの光 CDMA 網デバイスになり、符号化デバイスの数を削減できる。AWG 符号・復号器のもう一つの魅力は、SLPM や SSFBG といった他の符号化デバイスに比べて自己相関信号と相互相関信号のパワーコントラスト比 (PCR) が極めて高い点である。511 チップ、640 Gchip/s の SSFBG と  $16 \times 16$  ポート、200 Gchip/s の AWG 符号・復号器を筆者らが測定したところ、それぞれ図 7 (c) と (d) に示す結果が得られた。AWG 型の符号・復号器ではほとんどのケースで 15~20 dB の PCR が得られたのに対し、SSFBG の PCR は 1 dB 強であった。このことは、同じ符号長に対して AWG 復号器を使えば干渉レベル  $\xi$  が大幅に低下し得る (最大 20 dB) ことを意味している。そのためこのデバイスには、非同期光 CDMA 網に光閾値回路を設けなくても、よりアクティブなユーザを高データレートにおいて許容できる可能性が秘められている [11]。

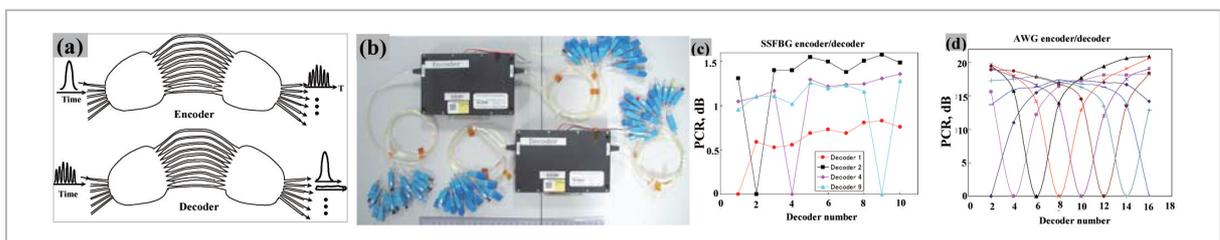


図7 AWG構成のコヒーレント時間拡散光CDMA符号・復号器

(a) 構成図、(b)  $16 \times 16$  の AWG 符号・復号器の写真、(c) 511 チップ SSFBG の PCR、(d)  $16 \times 16$  の AWG 符号・復号器の PCR

## 2.2 検出技術

理想的な光 CDMA 網ではチップレート検出の使用が前提とされる[9]。数百 Gchip/s もの高いチップレートを持つ長い光符号を使用するコヒーレントな時間拡散光 CDMA [14] [15]、あるいは超短光パルスを使用するコヒーレントなスペクトル符号化スキーム [18]–[20] では、レシーバの帯域がチップレート検出条件と一致しないことがある。そのため「チップレート」の代わりに「データレート」を使用する現実的なシステムでは、MAI ノイズ (多重アクセス干渉ノイズ (MAI: multiple access interference)) が依然として深刻な問題となる。レシーバの帯域制限によるビットエラーレート (BER) の低下が生じる [9] [24]。時間ゲートを使えばゲートウィンドウに入らない MAI ノイズは除去されるので BER は改善される [25] [26] もの、チップレベルの厳密な同期化が必要となるため非同期の光 CDMA には適さない。そのためデータレート検出を可能にして現実的な非同期光 CDMA システムを実現するには、光閾値方式を用いることが不可欠になる [9] [16] [18]–[20]。

これまで幾つかの光閾値方式が実施されてきた。具体的には、周期分極ニオブ酸リチウム (PPLN: periodically-poled lithium niobate) [18] と分散シフトファイバの非線形効果 [27] [28] を用いたもの、高非線形光ファイバ (HNLF: high nonlinear fiber) [19] を用いたもの、ホーリーファイバ [30] を用いたもの及び通常の分散フラットファイバ (DFF: dispersion flattened-fiber) を用いたものがある。これまでのところ PPLN に 2 次高調波発生 (SHG: second-harmonic-generation) を用いたものが上記の中で最低の動作パワーを達成している。しかしながら PPLN を用いたデバイスは偏波に依存するため、システム内に新たな偏波モード分散ノイズが加わることになる。特に非同期光 CDMA 網ではビートノイズが信号の偏波状態に大きく左右されるため、これは重大な問題になる可能性がある [18]。一方、光ファイバを用いたデバイスでは偏波依存性はそれほど大きくないと考えられる。非線形光ループミラー (NOLM: Nonlinear optical loop mirror) は復号化したパルスのペダスタルを低動作パワーで抑えることができると報告された [28] が、NOLM のパワー伝達関数は明確な閾値特性を持たないため、光閾値処理に

は適さない可能性がある。これに対し、自己位相変調 (SPM: self-phase-modulation) による信号スペクトル拡張を用い、その後段にロングパスフィルタを設ければ [19] [27] [29]、閾値処理の性能が向上する可能性があるが、現在のところ動作パワーはまだ比較的高い。光閾値処理には通常の DFF におけるスーパーコンティニウム (SC) 発生も利用できる。この方法は偏波依存性がなく、低挿入損失、明確な伝達関数及びパルス整形能力などの特徴を持つ [30]。それぞれの光閾値方式の全体的な性能を表 1 にまとめる。

図 8 (a) は SC を用いた光閾値回路の構成と動作原理を示す図である。この素子は EDFA、2 km 長の分散フラットファイバ (DFF) 及び 5 nm のバンドパスフィルタ (BPF: bandpass filter) で構成される。この光ファイバのゼロ分散波長は 1523/1575 nm である。動作原理は次のとおりである。EDFA が復号化された光信号を適性レベルに増幅する。正しく復号化されたパルスは明瞭な形状を持ち、約 2 ps のパルス幅と高ピークパワーを持つ。これは DFF において SC を生成することができる。それに対し、正しく復号化されなかった信号 (MAI ノイズ) は広い時間スパンにわたって広がり、ピークパワーが極めて小さい。これは SC を生成できない。BPF は SC 信号のみを透過し、元の信号を遮断する。そのため BPF の後方では正しく復号化された信号が MAI ノイズなく復元できる。図 8 (b) は元のパルス、異なる入力パワーで生成された SC 及び BPF の後方の信号についてそれぞれ測定されたスペクトルを示す。異なるレシーバ帯域  $f_c$  に対する BER パフォーマンスとアイ・ダイアグラムを SC タイプの光閾値回路がある場合とない場合の両方について示したのが図 8 (c) である。光閾値回路を使って MAI ノイズを除去したときの改善の様子が顕著にうかがえる。

## 3 非同期マルチユーザ光 CDMA 実験

### 3.1 非同期光 CDMA 実験: 10 ユーザ、1 ギガビット級

図 9 には、10 ユーザを収容した非同期コヒーレント光 CDMA の実験構成を示す [16]。パルス幅

表1 光閾値処理方式の性能比較

方式	データレート	パルス幅	コントラスト比	挿入損失	必要パワー			偏波依存性	備考	
					平均	ピーク (dBm)	エネルギー (pJ/bit)			
光ファイバの非線形効果	DSF [27]	31.2 MHz	600-800 fs	30 dB	~ 10 dB	0.44 mW	23.5 W	14.1	無依存	
	HNLFF [19]	10 G	400 fs	23 dB		25 mW	6.3 W	2.5		
	ホーリーファイバ [29]	1.25 G	2.5 ps		25 dB	> 2 W	640 W	1600		
	DFF(SC) [30]	1.25 G	2 ps	13 dB	13 dB	<~2 mW	~6.3 W	12.6	パルス整形	
PPLN[18]	10 G	400 fs	20 dB			0.28 mW	70 mW	0.03	依存	パルス拡張

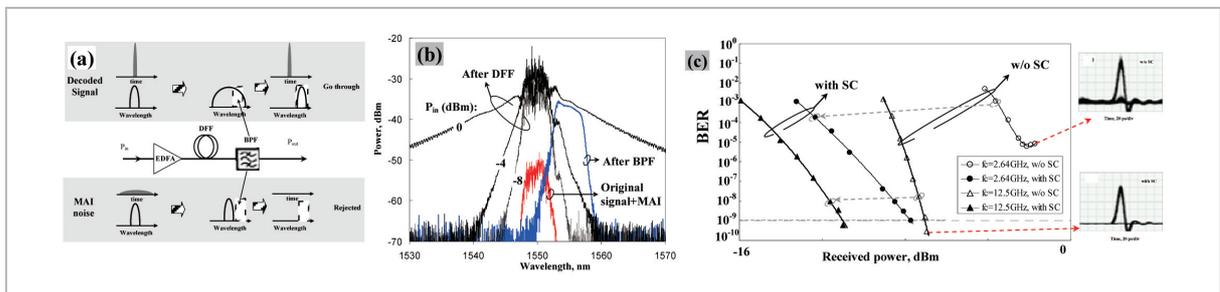


図8 DFFを用いたSCタイプの光閾値回路

(a) 構成と動作原理、(b) 測定されたスペクトル、(c) BER

が約 1.8 ps の光パルス列をモード同期レーザーダイオード (MLLD : mode-locked laser diode) によって発生させ、それを  $2^{23}-1$  の疑似ランダム信号 (PRSB : pseudo-random bit sequence) によって 1.25 Gbit/s で変調した。増幅した信号を 10 本の支線に等分し、それを 10 個の符号器で符号化した。符号器は 511 チップ、640 Gchip/s の SSFBG であり、その周波数応答は図 9 の左上の図に示すとおりである。符号 1~10 は、比較的低い非周期相互相関が得られるよう、511 チップの BPSK ゴールド符号から慎重に選択する。10 本の支線には長さの異なる波長固定光ファイバ遅延線を挿入し、時間遅延とデコヒーレント信号をユーザごとにランダムに設定する。また、波長可変光遅延線 (DL : delay lines) も挿入し、様々な位相における信号と干渉波の重なりの影響を調査する。現実的

な PON 環境では信号の偏波状態はランダムである可能性がある。しかし干渉が深刻なレベルとなるワーストシナリオでのシステム・パフォーマンスを調べるため、偏波制御器 (PC : polarization controllers) を設けてすべての信号の偏波状態をそろえる。さらにすべての支線に可変減衰器 (スイッチ付き) を使用し、10 ユーザからのパワーレベルを均衡化してアクティブ・ユーザの数を調整する。

10 ユーザ分の光 CDMA 信号を混合・増幅し、50 km のシングルモード光ファイバに注入する。伝送時の分散は分散補償ファイバ (DCF : dispersion compensation fiber) を用いて補償する。符号化した波形の長さ (約 800 ps) は 1 ビットの長さ (約 804 ps) より若干短い。そのためこの非同期実験においては図 9 の右下の図に描いたよう

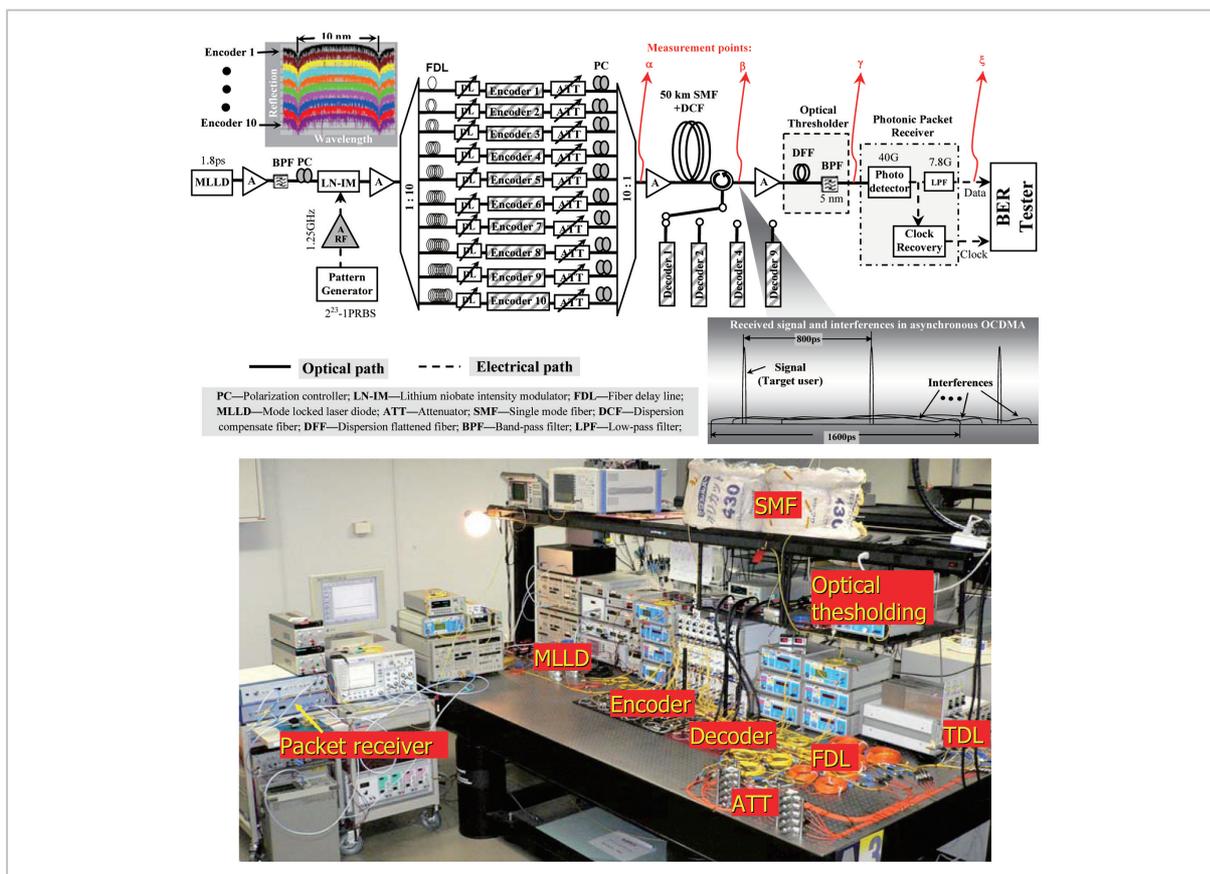


図9 10 ユーザ完全非同期コヒーレント光 CDMA の実験装置構成

に信号と干渉波が完全に重なり、タイミング調整のために予約される空きタイムスロットがなくなった。

レシーバ側では四つの SSFBG 復号器を用いてユーザー 1、2、4、9 からの信号を復元した。実験では SC を用いた光閾値処理を行って MAI ノイズを除去した。平均動作パワーは  $K=1$  と 10 に対してそれぞれ 1.4 dBm と 10.3 dBm であった。10 ユーザの実験では、ランダムな時間遅延、ランダムなデータパターン、ランダムなビットの位相及びランダムな偏波状態によって光 CDMA 信号を完全非同期で混合した。このほか、ビット同期と偏波状態一致という最悪のケースについても試験を行った。これらすべてのケースにおいて四つのレシーバすべてに対してエラーフリー伝送が実現した。このことは、SI (信号と干渉波による) ビートノイズと MAI ノイズが理論の予測どおり効果的に抑止されたことを示している。

### 3.2 非同期光 CDMA 実験：10.71 Gbit/s、12 ユーザ多重伝送

この実験では、パワーコントラスト比 (PCR) が極めて高い  $16 \times 16$  ポートの AWG 型光 CDMA 符号・復号器を使用した [11]。MAI ノイズとビートノイズが存在する非同期光 CDMA のパフォーマンス改善に用いたもう一つの方法は FEC (順方向誤り訂正) である [7]。リードソロモン (RS: Reed-Solomon) FEC は極めて効果が高く、約 6 dB の正味符号化利得によって BER を  $10^{-4}$  から  $10^{-14}$  に改善することも可能である。ITU-T G.709 勧告は、RS (253, 239) FEC を用いた光伝送網 (OTN: optical transmission network) の干渉について規定している [31]。図 10 (a) と (b) に実験構成を示す。10.71 GHz の光パルスストリームを、アンリツのネットワーク・パフォーマンス・テスタ (MP1590B) で生成した OTN フレームで変調した。フレームには  $2^{31}-1$  の PRBS ペイロードデータと FEC 用パリティが入っている。16×16 ポート、200 Gchip/s の AWG 符号器のポート 1 に光信号

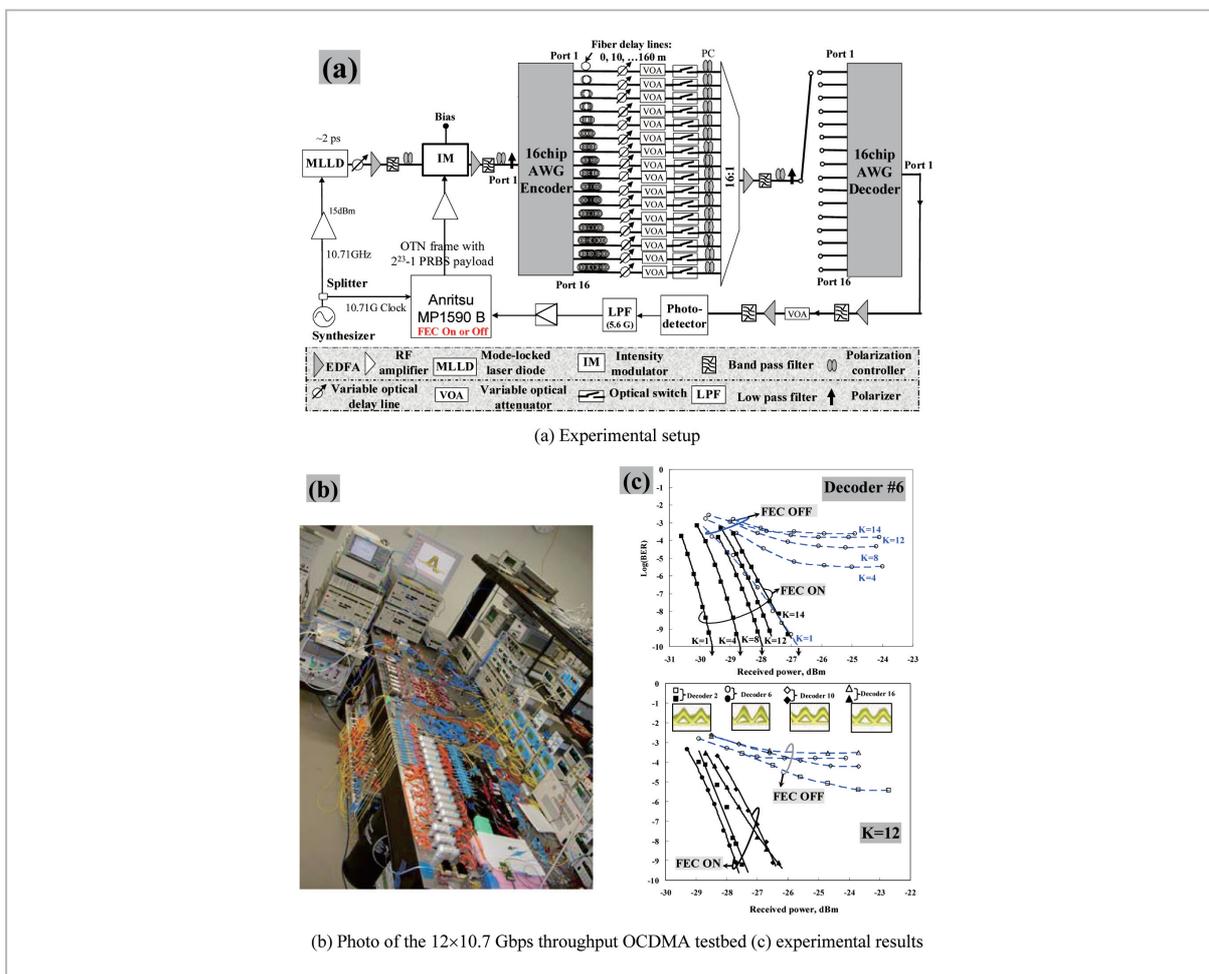


図10 12 ユーザ、10.71 Gbit/s 非同期光 CDMA 実証実験

(a) 実験構成、(b) 12×10.7 Gbit/s 光 CDMA 実験装置、(c) 実験結果

を送出し、16 個の出力ポートにおいて 16 の光符号を生成した。各符号は 16 チップから成る。この 16 個の信号を、平衡パワー、ランダムな遅延、ランダムなビットの位相及びランダムな偏波状態によって完全非同期で混合し、 $16 \times 10.71$  Gbit/s の非同期光 CDMA 網をエミュレートした。光 CDMA 信号を増幅してそれを AWG 型復号器の一つのポートに注入した。復号化された光信号を出力ポート 1 から送出して検出させた。測定された BER を図 10(c) に示す。実験ではワーストケースのシステム・パフォーマンスを試験するため、偏波制御器と波長可変光遅延線を意図的に調節した。復号器のポート 6 番では  $K=14$  以下においてエラーフリーとなった。しかしそれ以外のユーザ、例えばワーストポートの一つであるポート 16 番では BER は一様でない。エラーフリーとなったのは  $K=12$  までである。その主な原因は

PCR のばらつきであり、さらにそれは AWG 型符号・復号器の製造上の欠陥が原因である。 $K=12$  では四つのユーザ(復号器のポート 2、6、10、16)においてすべてのケースでエラーフリーが達成され、 $12 \times 10.71$  Gbit/s のスループットを持つ非同期光 CDMA がこの実験で実証されたことが確認できた。

## 4 まとめ

光デバイスと技術が向上したことにより、光 CDMA は将来の広帯域アクセス網における有力候補となっている。

実用的な非同期光 CDMA 網を実現するキーテクノロジーについて、符号・復号器及び光閾値処理の観点から論じた。SSFBG は低挿入損失の超長光符号を生成できる。AWG 型符号・復号器は

一つの素子で複数の光符号を同時に処理でき、PCRが極めて大きいことから、よりアクティブなユーザを高データレートにおいて許容できる。10ユーザの非同期な光CDMA伝送が、511チップのSSFBGとSCタイプの光閾値回路を用いて1.25 Gbit/sで実証された。最近では16×16ポ-

ートのAWG型光CDMA符号・復号器を用いて、12×10.71 Gbit/sという画期的なスループットを持つ非同期の光CDMAがITU-T G.709のOTNフレームを伝送することが見事に実証された。RS-FECは、これを実現できるもう一つの優れた技術である。

## 参考文献

- 1 A.J.Viterbi, "CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication", Reading, MA: Addison-wesley, 1995.
- 2 J.Y.Hui, IEEE J.Slect. Areas in Commun., 3, 916-927, 1985.
- 3 P.R.Prucnal, M.A.Santoro, and T.R.Fan, J. Lightwave Technol. 4, 547-554, 1986.
- 4 J.A.Salehi, IEEE Trans. Commun. 37, 824-842, 1989
- 5 J.A.Salehi, A.M.Weiner, and J.P.Heritage, J. Lightwave Technol., 8, 478-491, 1990.
- 6 D.D.Sampson, G.J.Pendock, and R.A.Griffin, Fiber and Integrated Optics, 16, 126-157, 1997.
- 7 K.Kitayama, X.Wang and H.Sotobayashi, ECOC'04, Tu.4.6.1. (invited paper), 2004.
- 8 A.Stock and E.H.Sargent, IEEE Communication Magazine, 40, 83-87, 2002.
- 9 X.Wang and K.Kitayama, IEEE J. Lightwave Technol., 22, 2226-2235, 2004.
- 10 L.Tancevski, and I.Andonovic, Electronics Lett., 30, 1388-1390, 1994.
- 11 X.Wang, N.Wada, G.Cincotti, T.Miyazaki, and K.Kitayama, ECOC'05 postdeadline, Th4.5.3, 2005.
- 12 P.C.Teh, P.Petropoulos, M.Ibsen, and D.J.Richardson, J. Lightwave Technol., 9, 1352-1365, 2001.
- 13 P.C.Teh, M.Ibsen, J.H.Lee, P.Petropoulos, and D.J.Richardson, IEEE Photonic Technol. Lett. 14, 227-229, 2002.
- 14 Xu.Wang, K.Matsushima, A.Nishiki, N.Wada, and K.Kitayama, Optics express, 12, 5457-5468, 2004.
- 15 X.Wang, K.Matsushima, A.Nishiki, N.Wada, F.Kubota, and K.Kitayama, Optics Lett., 30, 355-357, 2005.
- 16 X.Wang, N.Wada, T.Hamanaka, and K.Kitayama, OFC'05 postdeadline, PDP 33, 2005.
- 17 A.M.Weiner, Rev. Sci. Instrum., 71, 1929-1960, 2000.
- 18 Z.Jiang, D.S.Seo, S.-D.Yang, D.E.Leaird, R.V.Roussev, C.Langrock, M.M.Fejer, and A.M.Weiner, IEEE J. Lightwave Technol., 23, 143-158, 2005.
- 19 V.J.Hernandez, Y.Du, W.Cong, R.P.Scott, K.Li, J.P.Heritage, Z.Ding, B.H.Kolner, and S.J.Ben Yoo, IEEE J. Lightwave Technol., 22, 2671-2679, 2004.
- 20 S.Etemad, P.Toliver, R.Menendez, J.Young, T.Banwell, S.Galli, J.Jackel, P.Delfyett, C.Price, and T.Turpin, IEEE Photonic Technol. Lett. 17, 929-931, 2005.
- 21 A.Agarwal, P.Toliver, R.Menendez, S.Etemad, J.Jackel, J.Young, T.Banwell, B.E.Little, S.T.Chu, and P.Delfyett, OFC'05 postdeadline, PDP 6, 2005.
- 22 G.Cincotti, IEEE J. Lightwave Technol., 22, 1642-1650, 2004.
- 23 G.Cincotti, N.Wada, S.Yoshima, N.Kataoka, and K.Kitayama, OFC'05 postdeadline, PDP 37, 2005.

- 24 X.Wang, N.Wada and K.Kitayama, LEOS 2005, WW2, 2005.
- 25 P.Petropoulos, N.Wada, P.C.The, M.Ibsen, W.Chujo, K.I.Kitayama, and D.J.Richardson, IEEE Photon. Tech. Lett., 13, 1239-1241, 2001.
- 26 H.Sotobayashi, W.Chujo, and K.Kitayama, IEEE Photon. Tech. Lett., 14, 555-557, 2002.
- 27 H.P. Sardesai and A.M. Weiner, Electron. Lett., 33, 610-611, 1997.
- 28 J.H.Lee, P.C.Teh, P.Petropoulos, M.Ibsen, and D. J.Richardson, J. Lightwave Technol., 20, 36-46, 2002.
- 29 J.H.Lee, P.C.Teh, Z.Yusoff, M.Ibsen, W.Belardi, T.M.Monro, and D.J.Richardson, IEEE Photonics Technol. Lett., 14, 876-878, 2002.
- 30 X.Wang, T.Hamanaka, N.Wada, and K.Kitayama, OSA Optics Express, 13, 5499-5505, 2005.
- 31 Interfaces for the Optical Transport Network, ITU-T Recommendation G.709/Y.1331, Feb. 2001.



**王 旭 (Xu Wang)**

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  
 有期研究員(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専攻研究員) Ph. D.  
 フォトニックネットワーク



きたやまけんいち  
**北山研一**

大阪大学大学院工学研究科教授 工学博士  
 フォトニックネットワーク



わだ なおや  
**和田尚也**

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  
 研究マネージャー(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主任研究員) 博士(工学)  
 フォトニックネットワーク