

5-2 ミリ波帯光ファイバ無線システムにおける高密度多重伝送とフォトニック信号処理

5-2 High-Spectral Density Multiplexing Transmission and Photonic Mixing for Millimeter-Wave-Band Radio-on-Fiber Systems

久利敏明 山下 司 戸田裕之 北山研一

KURI Toshiaki, YAMASHITA Tsukasa, TODA Hiroyuki, and KITAYAMA Ken-ichi

要旨

本稿では、ミリ波帯光ファイバ無線 (ROF) システムにおける高密度波長多重 (DWDM) 技術を採用した二つのシステム構成について述べる。第1のシステム構成では、光周波数重畳配置 DWDM ROF 伝送を実現するために、アレー導波路格子 (AWG) を採用して構成した多重分離技術を中心に述べる。第2のシステム構成では、既に提案されているフォトニックダウンコンバージョン法を DWDM ROF システムに拡張、実現する方法について述べる。第2のシステム構成については、さらに 25GHz 間隔で 2 チャンネルの 60GHz 帯 DWDM ROF 伝送にフォトニックダウンコンバージョン法を適用した場合について、光ファイバ伝送品質を通じて実験的に評価した結果について議論する。

Two system architectures based on dense wavelength division multiplexing (DWDM) for millimeter-wave-band (mm-wave-band) radio-on-fiber (ROF) systems are described. One architecture consists of a wavelength multiplexer and demultiplexer with arrayed waveguide gratings (AWGs) for optical-frequency-interleaved DWDM ROF transmission. The other architecture is based on a photonic downconversion technique that is used in DWDM ROF systems. A 25-GHz-spaced, 60-GHz-band DWDM ROF transmission with photonic downconversion is experimentally demonstrated.

[キーワード]

高密度波長多重, ミリ波, 光ファイバ無線, ファイバ分散, フォトニックダウンコンバージョン

Dense wavelength division multiplexing, Millimeter-wave, Radio-on-fiber, Fiber dispersion, Photonic down-conversion

1 はじめに

ミリ波帯光ファイバ無線 (ROF) システムでは、マイクロ波帯 ROF システムに比べて高周波の電波を用いるため、各々のセルサイズは小さくなる一方、広いサービスエリア、大容量通信、システムコスト低減は依然として要求され、一つの制御局 (CS) と多数のアンテナ基地局 (BS) の間でいかに効率良くミリ波帯 ROF 信号を伝送するかが重要な課題となっている。将来の光ファイバアクセス網における一つの解決策として、高密度波長多重 (DWDM) は大変有力な伝送技術で

あり、これまでも幾つかの DWDM ROF システムが報告されてきた[1]-[4]。光周波数利用効率を更に向上させるため、ファイバブラッググレーディング (FBG) を採用して構成した多重・分離器による光周波数重畳配置技術も提案されている[5]。一方、著者らはこれまでに、システムコスト低減と受信感度向上を特徴とする、ミリ波帯 ROF システムにおけるフォトニックダウンコンバージョン法を提案してきた[6]。本稿ではミリ波帯 ROF システムにおける DWDM 技術を採用した二つのシステム構成について述べる。第1のシステム構成では、光周波数重畳配置

DWDM ROF 伝送を実現するために、アレー導波路格子 (AWG) を採用して構成した多重分離技術を中心に述べる。第2 のシステム構成では、既に提案されているフォトニックダウンコンバージョン法を DWDM ROF システムに拡張、実現する方法について述べる [7] [8]。第2 のシステム構成については、さらに 25GHz 間隔で 2 チャンネルの 60GHz 帯 DWDM ROF 伝送にフォトニックダウンコンバージョン法を適用した場合について、光ファイバ伝送品質を通じて実験的に評価した結果について議論する [9]。

2 DWDM ROF システム構成

システムコスト低減の観点から、DWDM チャンネルの波長割当ては ITU グリッドに沿うことが望ましい。この場合、60GHz 帯 ROF 信号の最小チャンネル間隔は、チャンネル間干渉を避けるため、光両側波帯変調 (DSB) 形式と光単側波帯変調 (SSB) 形式について、それぞれ 200GHz 及び 100GHz となるが、光周波数資源を十分に活用しているとは言えない。これは、光周波数重畳配置によって容易に解決できる。光 SSB 形式の 60GHz 帯 ROF 信号を 25GHz のチャンネル間隔で光周波数重畳配置して多重化した場合、光周波数利用効率率は元の 4 倍まで向上させることができる。光周波数重畳配置のチャンネル間隔を小さくすることで光周波数利用効率の更なる向上は期待できるが、チャンネル間干渉が起きないように周波数配置の設計に十分注意する必要がある。現時点では、25GHz 間隔の DWDM システム用の光デバイスが先進的かつ実用的であるため、以下では 25GHz 間隔 DWDM ROF システムについて述べる。

2.1 システム構成 I

図 1 はスター型トポロジーを有する一般的な DWDM ROF システムの構成を示している。それぞれのアンテナ基地局 (BS) からのアップリンク ROF 信号は DWDMROF 多重化器 (λ -MUX) で光周波数重畳配置による波長多重化がなされ、1 本の光ファイバ伝送路を通じて遠方の制御局 (CS) まで伝送される。ここで、ITU グリッドに従って配置された波長 ($\lambda_n, n = 1, 2, \dots, N$)

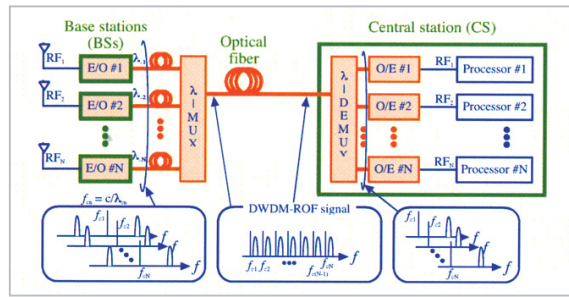


図 1 システム構成 I

は、それぞれ各基地局 (BS_n) に対応して割り当てられているものとする。CS 側で受信された DWDM ROF 信号は、DWDM ROF 多重分離器 (λ -DEMUX) により波長多重分離され、光・電気 (O/E) 変換器で各々光検波された後、それぞれ個別に無線周波数帯処理器 (RF-band processor) により復調される。以下では、光周波数重畳配置 DWDM ROF 信号の多重・分離の実現について述べる。

図 2 に λ -MUX の構成及び光スペクトル解説図を示す [7]。 λ -MUX では、ほぼ同等の機能を有する二つの構成法が考えられる。第 1 の λ -MUX の構成は図 2 (a) に示すように、 $N \times 2$ -AWG、高フィネスファブリペロー (FP) 光フィルタ、光サーキュレータから成る。一方、第 2 の λ -MUX の構成は図 2 (b) に示すように、 $N \times 2$ -AWG と結合率可変光カップラ (OVC) から成る。図 2 (c) に示すように、ITU グリッドに従って割り当てられた光搬送波を有する各 BS からの ROF 信号は AWG の各ポートに入力される。AWG は入力チャンネル A_M から搬送波成分 B_M と側帯波成分の片側 C_M を取り出し、それぞれを個別の決められたポートに導く。取り出された搬送波成分 B_M と側帯波成分 C_M は OVC によって合波され、所望の DWDM ROF 信号 D_M を生成する。本多重化法では、光周波数重畳配置 DWDM の多重化器としての動作だけでなく、全チャンネルに対する光 SSB フィルタとしても動作することに注意されたい。第 2 の λ -MUX の構成では、さらに OVC の結合率を変えることにより、全 ROF チャンネルの変調度を同時に調整できるという機能も有している。

図 3 に λ -DEMUX の構成及び光スペクトル解説図を示す [8]。図 3 (a) に示すように、 λ -DEMUX の構成は、高フィネス FP、OC、 $2 \times N$ -AWG から成る。ここで、第 2 の λ -MUX (2(a)) との違い

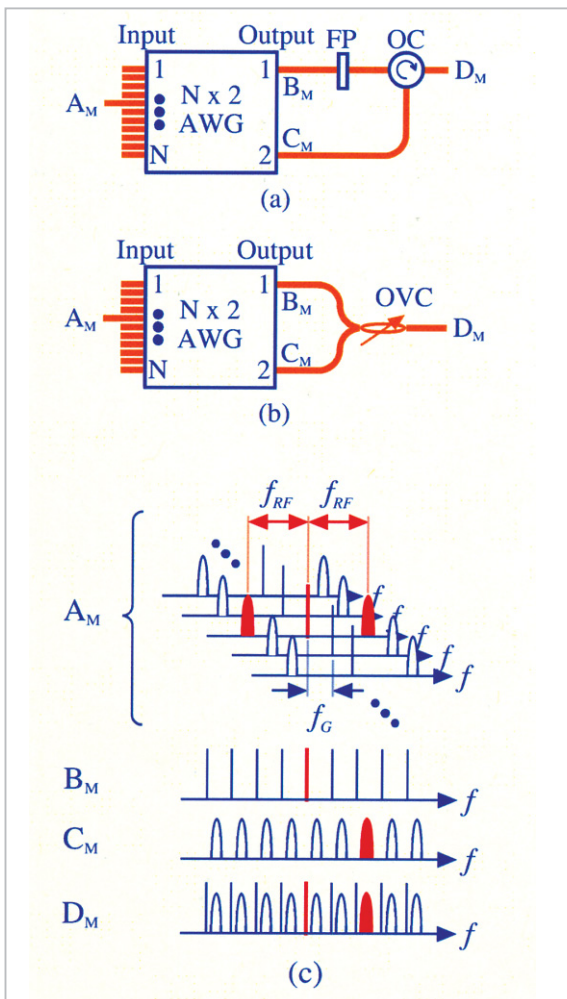


図2 λ-MUX

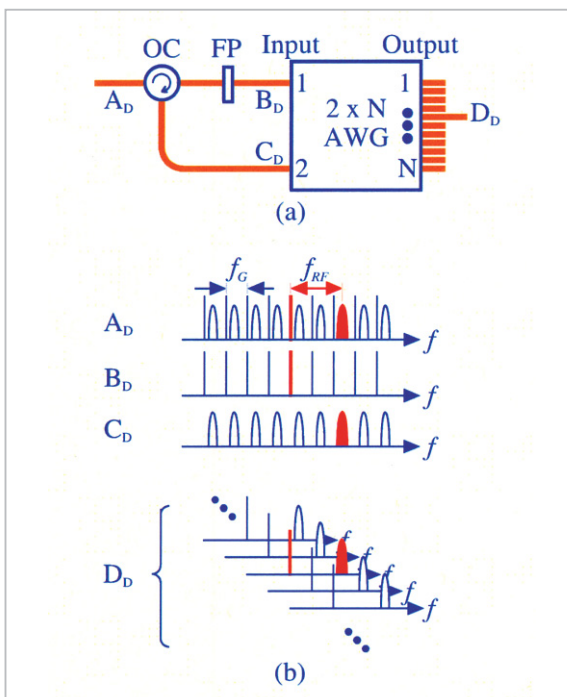


図3 λ-DEMUX

はOCの方向のみである。 f_G と f_{RF} は、チャンネル間隔及びRF搬送波周波数である。それぞれのROF信号は図3(b)の A_D に示されるように、光SSB形式であるとする。光周波数重畳配置DWDM ROF信号 A_D に対し、FPはその透過特性と反射特性を用いて光搬送波群 B_D と側帯波成分群 C_D に分離する。後段のAWGでは、分離された光搬送波群 B_D と側帯波成分群 C_D から、同じチャンネルの成分を一つの出力ポートに導き、所望のROF信号 D_D を出力する。こうして、光周波数重畳配置DWDM ROF信号は多重分離される。

2.2 システム構成Ⅱ

図4はフォトニックダウンコンバージョン法を採用したDWDM ROFシステムの構成である。ここで、フォトニックダウンコンバージョンとは光リンクを通してRF帯から中間周波数(IF)帯に電波の周波数を変換する機能と定義する[6]。受信されたDWDM ROF信号は、まずフォトニックダウンコンバージョンのための前処理が施され、 λ -DEMUXで波長多重分離が行われる。本システム構成の λ -DEMUXはAWGのみで構成されている。多重分離された光信号は、それぞれO/E変換により光検波され、IF帯で復調される。図4に示されるように、多重化されたすべてのROF信号が同時にフォトニックダウンコンバージョン処理を受けることになる。さらに、システム構成Ⅱでは受信側に高周波電気回路が不要なため、多重数が増加してもシステムコストが大幅に増すことがない、という利点を有する。

図5にフォトニックダウンコンバージョン法を用いたDWDM ROFシステムのスペクトル配置を示す。図5(a)においては光ファイバの分散の影響を避けるためにROF信号は光SSB形式であるとし、 C_n と U_n は、第 n チャンネルの光搬送波と

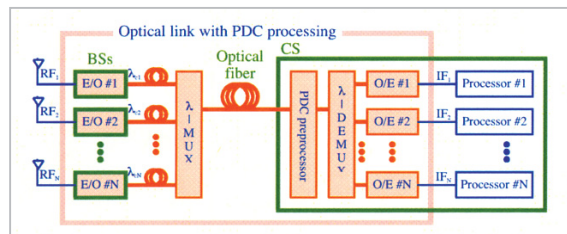


図4 システム構成Ⅱ

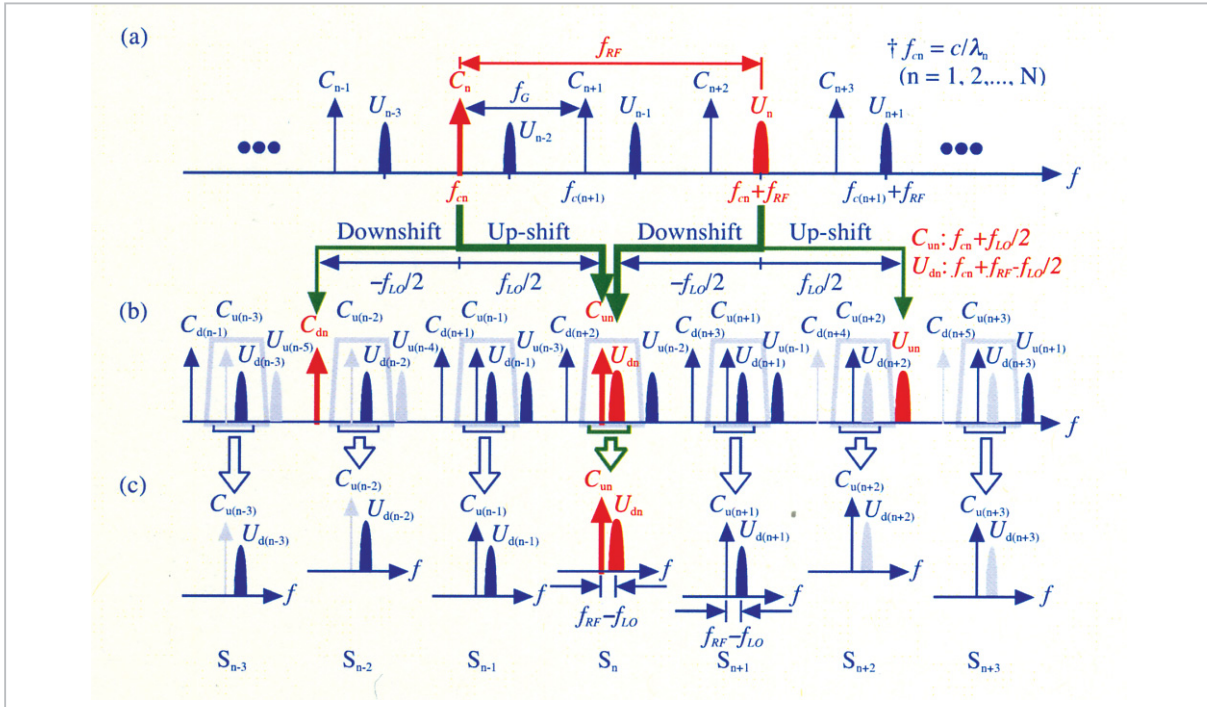


図5 スペクトル配置 (a) DWDM ROF 信号、(b) 周波数シフトされた DWDM ROF 信号、(c) 多重分離された信号

上側帯波 (USB) を示している。また、 $f_{cn} [= c / \lambda_{cn}]$ と f_{RF} は、第 n チャンネルの光搬送波周波数と RF 搬送波周波数である。ここで、 c は真空中の光速を表し、光搬送波は ITU グリッドに沿って $f_G [= f_{c(n+1)} - f_{cn}]$ 間隔で等間隔に配置されているものとしている。フォトニックダウンコンバージョン法では、まず DWDM ROF 信号は等分され、図 5 (b) に示すように、それぞれの周波数が $-f_{LO}/2$ と $f_{LO}/2$ だけダウンシフト及びアップシフトされる。ここで、 C_{dn} 、 C_{un} 、 U_{dn} 、 U_{un} は、第 n チャンネルのダウンシフトされた光搬送波、アップシフトされた光搬送波、ダウンシフトされた USB、アップシフトされた USB を示している。 C_{un} と U_{dn} に着目すると、この光周波数シフトによって、元の光搬送波成分 (C_n) と USB 成分 (U_n) が互いに f_{LO} だけ近づいたとみなすことができる。次に、互いに接近した一組の光周波数成分 S_n (C_{un} と U_{dn}) は図 5 (c) に示すように、 λ -DEMUX によって他の光周波数成分の組と分離されて抽出される。分離された光周波数成分の組ごとに光検波される。結果として、マイクロ波帯 ($f_{IF} [= f_{RF} - f_{LO}]$) にダウンコンバートされた所望の IF 帯信号が出力される。こうして、DWDM ROF システムにおいてもフォトニックダウンコ

ンバージョンが可能となる。

3 実験

図 6 に示す実験系を用いて、DWDM ROF システムにおけるフォトニックダウンコンバージョン法の検証を行った。実験系は、二つの簡易構成 BS、25km の標準単一モード光ファイバ (SMF) 及び一つの CS から成る。それぞれの ROF 信号は、155.52Mb/s の差動位相シフトキーイング (DPSK) データを有する 59.6GHz の RF 信号を用いて生成した。100m の光ファイバは二つのチャンネル間のデータ相関をなくすために用いられた。CS は主として、光周波数シフトのための二電極

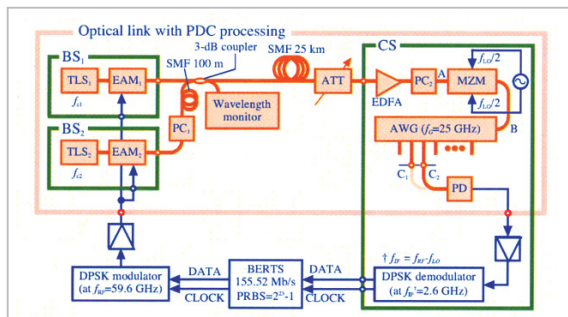


図6 実験構成図

型マッハツェンダー変調器 (MZM)、多重分離のための AWG 及び O/E 変換としての光検波器で構成された。

ここで、MZM は搬送波抑圧両側帯波 (DSB-SC) 変調器として動作するように設定された。光スペクトルの測定結果を図7に示す。二つの60GHz帯ROF信号は、その光搬送波の間隔が25GHzに設定されたので、図7(a)に示すように、光周波数重畳配置されたものとなっている。ここで、1551.9nmと1552.1nmの光搬送波のスペクトル線幅は共に300kHzであった。なお、実験系の簡易化のため、ROF信号の合波には3dB光カップラが用いられたため、多重化後のROF信号は光DSB形式のままであることを注意されたい。図7(b)から分かるように、前章で示したとおり、光領域で、光スペクトルはダウンシフト及びアップシフトされた。DSB-SC変調器への入力には28.5GHzの正弦波を与えたので、光スペクトルは

お互いに57.0GHzだけ引き離されるように周波数シフトされていることが分かる。図7(c)と(d)はチャンネル1と2のAWG出力を示しており、それぞれ、-25dBと-40dBの不要信号抑圧比をもって分離されていることが分かる。測定された光スペクトルの上に描かれたスペクトル配置図からも分かるように、分離された信号には搬送波成分と側帯波成分の二つが含まれており、その搬送波成分と側帯波成分とは2.6GHz [= 59.6 - 57.0 GHz]だけ離れている。ここで注目すべきは、多重化されたROF信号が光DSB形式であっても、多重分離後にはIF帯の周波数間隔を有する光SSB形式のROF信号になっていることである。これは原理的に耐光ファイバ分散特性を有することを意味する。

DWDM ROFシステムにおけるフォトニックダウンコンバージョンを検証するため、データを重畳しない場合の光検波出力を測定した。図8

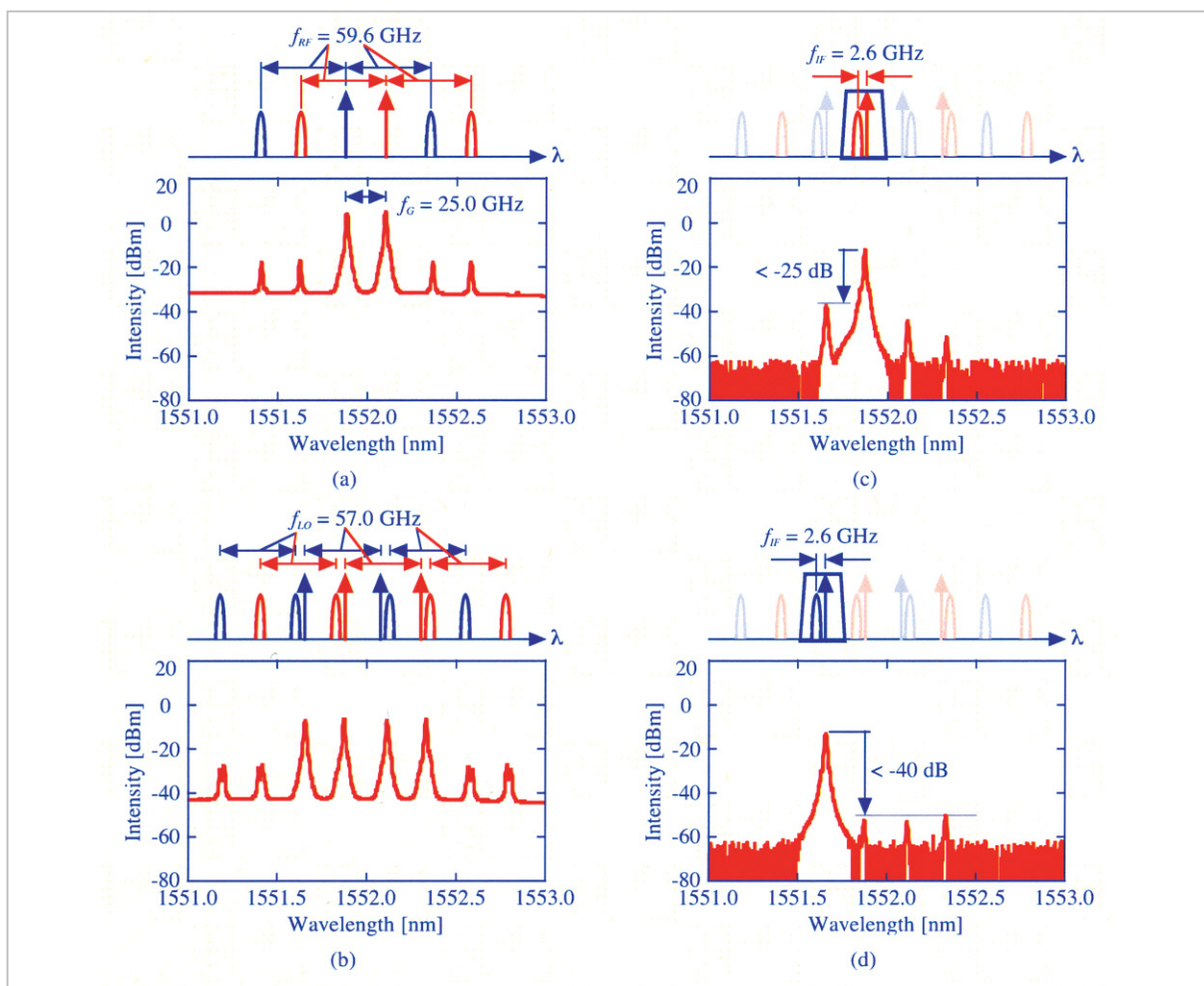


図7 (a)前処理入力、(b)前処理出力(c)多重分離されたch.1 (d)多重分離されたch.2.

に示されるように、光検波出力はチャンネル1、2共に所望のマイクロ波帯に表れた。また、それぞれのスペクトル線幅も極めて狭いことが確認できる。すなわち、光リンクを通じて、二つの59.6GHzのRF帯信号は同時に2.6GHzの所望のIF帯信号に変換されたことを示している。

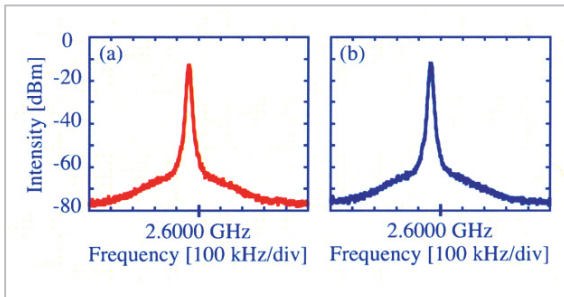


図8 光検波出力 (a) ch.1、(b) ch.2.

さらに、フォトニックダウンコンバージョン法を用いたDWDM ROFシステムの通信品質についても調査した。図9に25kmのSMF伝送時のビット誤り率(BER)を示す。両チャンネルとも 10^{-9} を達成し、エラーフリーの性能を示した。また、受信信号光電力の観測域内ではBERフロアも表れなかった。これらの結果から、 10^{-9} のBERを達成するためには、25dB及び40dB程度

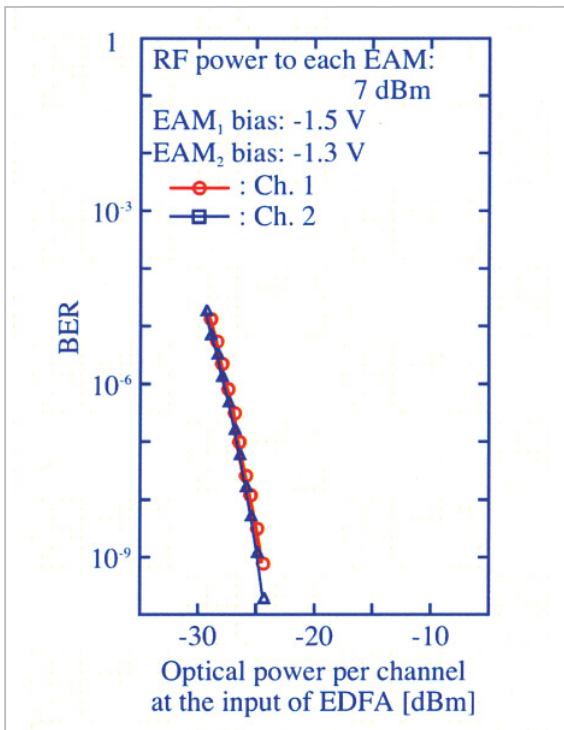


図9 BERs

のチャンネル間干渉は十分無視できることを示している。以上より、本フォトニックダウンコンバージョン法は将来のDWDM ROFアクセスネットワークにおいて十分適用可能であると結論づけられる。

4 まとめ

ミリ波DWDM ROFシステムにおいて二つのシステム構成について議論した。第1の構成では、AWGにより構成された多重器及び多重分離器を用いて光周波数重畳配置DWDM ROF信号を伝送可能であることを示した。第2の構成では、システムの低コスト化の要求を満たすために、DWDM ROFシステムにおけるフォトニックダウンコンバージョン法を提案した。さらに、2チャンネルのDWDM ROF信号のフォトニックダウンコンバージョン法を実験的に検証し、また、25kmのSMF伝送も十分可能なことを示した。このことから、フォトニックダウンコンバージョン法は将来のDWDM ROFアクセスネットワークにおいて十分実用な技術であると結論づけられる。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、絶えずご支援頂いた大谷直毅光エレクトロニクスグループリーダー、板部敏和基礎先端部門長、飯田尚志元通信総合研究所理事長に深く感謝いたします。

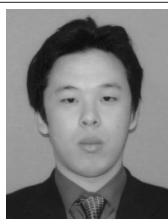
参考文献

- 1 K. Kitayama, "Highly spectrum efficient OFDM/PDM wireless networks by using optical SSB modulation", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 16, No. 6, pp. 969-976, June 1998.
- 2 K. Kitayama, T. Kuri, K. Onohara, T. Kamisaka, and K. Murashima, "Dispersion effects of FBG and optical SSB filtering in DWDM millimeter-wave fiber-radio systems", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 20, No. 8, pp. 1397-1407, Aug. 2002.
- 3 K. Kojucharow, M. Sauer, H. Kaluzni, D. Sommer, C. Schaffer, "Experimental investigation of WDM channel spacing in simultaneous upconversion millimeter-wave fiber transmission system at 60 GHz-band", in IMS2000 Tech. Dig., Vol. 2, WE4C-7, 2000, pp. 1011-1014.
- 4 A. Narasimha, X. J. Meng, M. C. Wu, and E. Yablonovitch, "Tandem single sideband modulation scheme for doubling spectral efficiency of analogue fibre links", Electron. Lett., Vol. 36, No. 13, p. 1135-1136, June 2000.
- 5 C. Lim, A. Nirmalathas, D. Novak, R. S. Tucker, and R. B. Waterhouse, "Technique for increasing optical spectral efficiency in millimetre-wave WDM fibreradio", Electron. Lett., Vol. 37, No. 16, pp. 1043-1045, Aug. 2001.
- 6 T. Kuri, and K. Kitayama, "Novel photonic downconversion technique with optical frequency shifter for millimeter-wave-band radio-on-fiber systems", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 14, No. 8, pp. 1163-1165, Aug. 2002.
- 7 H. Toda, T. Yamashita, T. Kuri, and K. Kitayama, "25-GHz channel spacing DWDM multiplexing using an arrayed waveguide grating for 60-GHz band radio-on-fiber systems", in Proc. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2003), Budapest, Hungary, 2003, pp. 287-290.
- 8 H. Toda, T. Yamashita, T. Kuri, and K. Kitayama, "Demultiplexing using an arrayed waveguide grating for frequency-interleaved DWDM millimeter-wave radio-on-fiber systems", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 8, pp. 1735-1741, Aug. 2003.
- 9 T. Kuri, H. Toda and K. Kitayama, "Dense wavelength division multiplexing millimeterwave-band radio-on-fiber signal transmission with photonic downconversion", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., Vol. 21, No. 6, pp. 1510-1517, June 2003.



く り と し き
久利敏明

基礎先端部門光エレクトロニクスグループ主任研究員 博士(工学)
光通信システム



や ま し た つ が お
山下 司

大阪大学大学院工学研究科(現 三菱電機株式会社)
光ファイバ通信



と だ ひろ あ き
戸田裕之

大阪大学大学院工学研究科講師 工学博士
光ファイバ通信、非線形ファイバ光学



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

