

2-5 ミリ波帯光ファイバ無線信号の高密度多重伝送技術

2-5 Dense Multiplexing and Transmission Technique of Millimeter-Wave-Band Radio-on-Fiber Signals

久利敏明 戸田裕之 北山研一

KURI Toshiaki, TODA Hiroyuki, and KITAYAMA Ken-ichi

要旨

副搬送波多重 (SCM) 化したミリ波帯光ファイバ無線 (RoF) 信号の光周波数重畳配置高密度波長多重 (DWDM) 伝送システムにおけるフォトニックダウンコンバージョンについて述べる。本フォトニックダウンコンバージョン技術では、受信側において多重化されたすべての RoF 信号の周波数変換が一括して行われる。155 Mb/s の差動位相シフトキーングデータを有する 60 GHz 帯 RoF 信号が 2 チャンネル SCM 化された信号をさらに、25 GHz 離れた二つの波長で DWDM 化されて 25 km の標準単一モードファイバを伝送後、光ファイバ分散の影響を受けることなく、良好な誤り率が得られることも実験的に示す。

Optical-frequency-interleaved dense wavelength division multiplexing (DWDM) transmission of millimeter-wave-band subcarrier-multiplexed (SCM) radio-on-fiber (RoF) signals with a photonic downconversion technique is described. The photonic downconversion technique is carried out for a lump of all multiplexed RoF signals at the receiver side. Error-free 25-GHz-spacing DWDM transmission and demultiplexing of two 60-GHz-band SCM RoF signals carrying 155-Mb/s differential phase-shift-keying data over 25-km-long standard single-mode fiber are experimentally demonstrated without serious fiber dispersion effect.

[キーワード]

光ファイバ無線, 波長分割多重, 副搬送波多重, ミリ波, フォトニックダウンコンバージョン
Radio on fiber (RoF), Wavelength division multiplexing (WDM), Subcarrier multiplexing (SCM), Millimeter-wave, Photonic downconversion

1 まえがき

電波を用いたワイヤレスアクセスは指数関数的な急速な増加を示しており、将来のユビキタスネットワーク社会において重要な役割を担うことは否めない。デジタル加入者線 (DSL: digital subscriber line) や光加入者線 (FTTH: fiber-to-the-home) などの商用ブロードバンド有線回線の急速な普及により、オフィスのみならず、一般家庭にまでもブロードバンドアクセス環境が浸透しつつある。そのようなブロードバンドアクセス環境は、ネットワーク接続の利便性から、ワイヤレスアクセスでも強く求められている。将来のプロ

ードバンドワイヤレスアクセスに向けては、既存のマイクロ波に比べて 10 倍から 1,000 倍の潜在的な広伝送帯域を有するミリ波やテラヘルツ波などの超高周波電波の開拓が進められている。しかしながら、搬送波周波数に依存した自由空間伝搬損失により、伝送距離に制限を受けるため、高速・大容量という魅力的な潜在能力を持ちながら限られた領域でしかブロードバンドワイヤレスアクセスをサービスできない、という問題がある。

一方、電波を使用する無線端末の種類や数の増加により、お互いの干渉が問題となり、電波環境は悪化している。サービスエリアを拡大するために放射電力の増大や電波自身によるマルチホップ

などが行われるが、これらは電波干渉を増長する原因となる。図1の左図に示すように、将来の電波環境はますます複雑化する傾向にある。生活空間に電波が氾濫した環境下では、妨害電波が与える電子機器や医療機器への影響、無線信号の漏えいなどが社会的にも深刻な問題になると予想され、早急に対策を講じておく必要がある。

ところで、光ファイバ無線 (RoF: radio-on-fiber) は、FTTH などの光ファイバアクセスネットワークと協調することで様々な無線通信システムを有機的に結合できるため、将来のユビキタスネットワーク社会を支えるコア技術の一つとして期待されている。RoF は「電波形式の保存」と「電波との非干渉性」を特徴とするフォトニクス技術の一つであり、電波自身の周波数帯や伝送帯域幅を問わず、必要な場所に必要無線信号だけを集配することができる。図1の右図に示すように、RoF はあらゆる電波をフォトニクス技術で閉じこめて仮想的な電波空間を作り上げ、システム内やシステム間の干渉を避けて最小限の電波放射しかしない「クリーンな電波環境」を提供できる技術である。さらに、RoF 技術を用いれば、無線 LAN (local area network) やセンサネットワークなど、お互いに離れた場所に配置された様々な無線システムを、その距離を克服してシームレスに接続することも可能である。

以上のような状況の下、これまで様々なミリ波帯 RoF システムが研究されてきた。将来のミリ波帯 RoF アクセスネットワークでは、中央制御局 (CS: central station) で数多くの無線端末を収容するだけでなく、光ファイバ資源も有効に活用するために、無線信号の高密度伝送が強く求められている [1]–[4]。既存布設光ファイバを用いてチャンネル容量を効率的に増大させるには、高密度波長分割多重 (DWDM: dense wavelength division multiplexing) と副搬送波多重 (SCM: subcarrier multiplexing) が魅力的で有用な方法である。ところで、著者らはこれまで、光周波数シフトによるフォトリックダウンコンバージョン法を提案してきた [5] [6]。このフォトリックダウンコンバージョンとは、光リンクに入力された電波周波数 (RF: radio frequency) 帯信号を光リンク出力時に中間周波数 (IF: intermediate frequency) 帯信号に周波数変換するという機能であり、ミリ波帯 RoF システムにおいて、耐光ファイバ分散、良好な受信感度、ミリ波帯部品の削減といった多くの利点を提供する。これにより、システム全体の低コスト化と良好な通信品質が期待できる。

本稿では、ミリ波帯 SCM RoF 信号の光周波数重畳配置 DWDM 伝送システムにおけるフォトリックダウンコンバージョン技術について述べる。155 Mb/s の差動位相シフトキーン (DPSK:

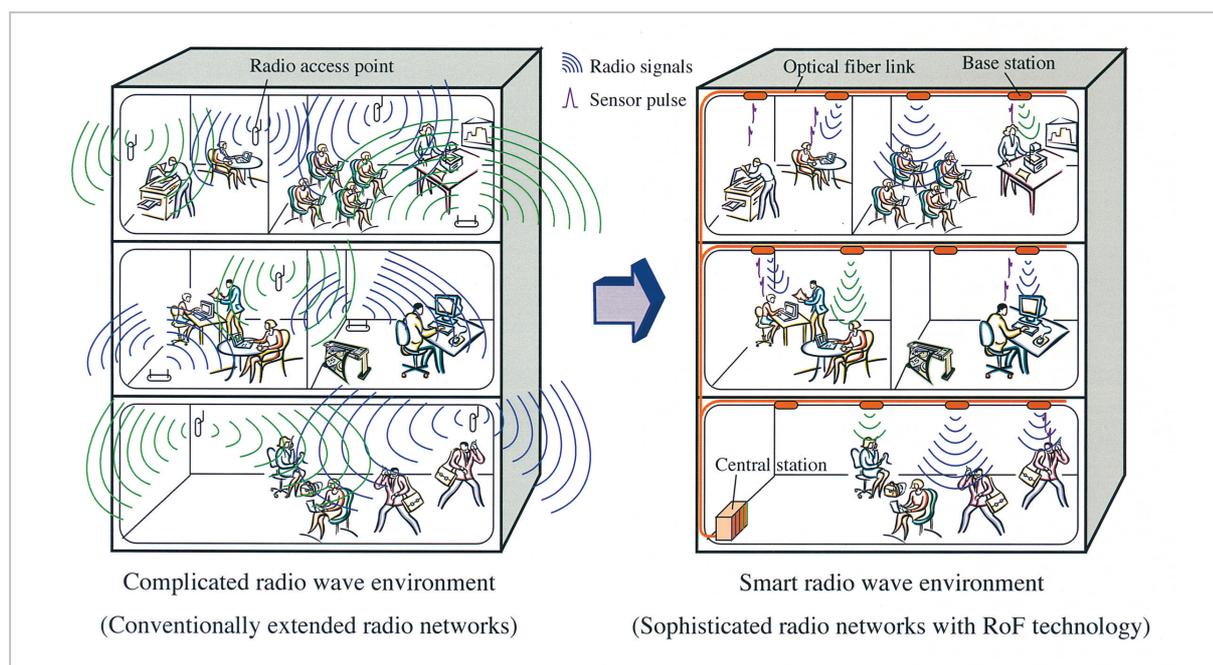


図1 電波環境

differential phase shift keying) データを有する 60 GHz 帯 RoF 信号が 2 チャンネル SCM 化された信号をさらに、25 GHz 離れた二つの波長で DWDM 化されて 25 km の標準単一モードファイバ(SMF : single-mode optical fiber)を伝送後、四つの独立な 60GHz 帯 RoF 信号が光ファイバ分散の影響を受けることなく、良好な誤り率が得られることも実験的に示す。

2 システム原理

光周波数重畳配置 DWDM/SCM RoF システムのスタートポロジ型の構成例を図 2 に示す。

各アンテナ基地局 (BS : base station) ではまず、受信した複数の無線信号が SCM RF 信号として一つのグループにまとめられ、電気・光 (E/O : electrical-to-optical) 変換器を介して、その SCM RF 信号で光搬送波を変調して、SCM RoF 信号を生成する。複数の BS からの異なる波長の SCM RoF 信号はリモートノードにある波長多重化器 (λ -MUX) で DWDM 化され、光ファイバリンクを通じて CS まで送られる。CS で受信された DWDM/SCM RoF 信号はまず、光周波数領域で周波数変換され、それから、波長多重分離器 (λ -DEMUX) によって DWDM チャンネルの分離が行われる。DWDM 分離された出力光はそれぞれ、光・電気 (O/E : optical-to-electrical) 変換器に入力され、SCM IF 信号となる。各 SCM IF 信号は副搬送波多重分離されて、それぞれ個別に復調される。ここで、キーとなるのは O/E 変換前の光周波数変換であり、あらかじめ決められた周波数シフトを与えることにより、所望のフォトニック

ダウンコンバージョンが行われる。このシステム構成では、すべての多重 RoF 信号が一括して同時にフォトニックダウンコンバージョンの効果をj得ることができるという利点がある。また、受信側、すなわち、CS 側でミリ波帯などの高周波電気部品を必要としない。そのため、RoF 信号の多重信号が増えても、システムのコストはほとんど変わることはなく、また、一つのチャンネル当たりのコストは低減できていることになる。

上記のシステムコンセプトにおいて、いかにして DWDM/SCM RoF 信号にフォトニックダウンコンバージョンを実現するかが重要となる。図 3 は、光周波数重畳配置 DWDM/SCM RoF システムにおけるスペクトル設計例を示している。

C_n , $L_{(n, m)}$, $U_{(n, m)}$ はそれぞれ、第 n 番目の DWDM チャンネル ($n=1, 2, \dots, N$) の搬送波成分、第 n 番目の DWDM チャンネルの中の第 m 番目の SCM チャンネル ($m=1, 2, \dots, M$) の下側帯波 (LSB) 成分と上側帯波 (USB) 成分を示している。 f_{cn} , f_{RFm} , $f_G [=f_{c(n+1)} - f_{cn}, (n=1, 2, \dots, N-1)]$ はそれぞれ、第 n 番目の DWDM チャンネルの光搬送波周波数、第 m 番目の SCM チャンネルのミリ波帯無線搬送波周波数、DWDM チャンネル間の最小周波数間隔である。ここで、DWDM チャンネル間隔は等間隔であると仮定する。まず、CS では図 3 (a) に示す多重化された RoF 信号が受信されたものとする。図 3 (a) の信号は、各光搬送波が電気段で生成された SCM RF 信号で変調されており、光周波数資源を有効に使用するために、 f_G が f_{RFm} よりも小さくなるようにして重畳配置としている。図 3 (a) の DWDM/SCM RoF 信号は等分割され、それぞれに $-f_{L0}/2$ のダウンシフトと

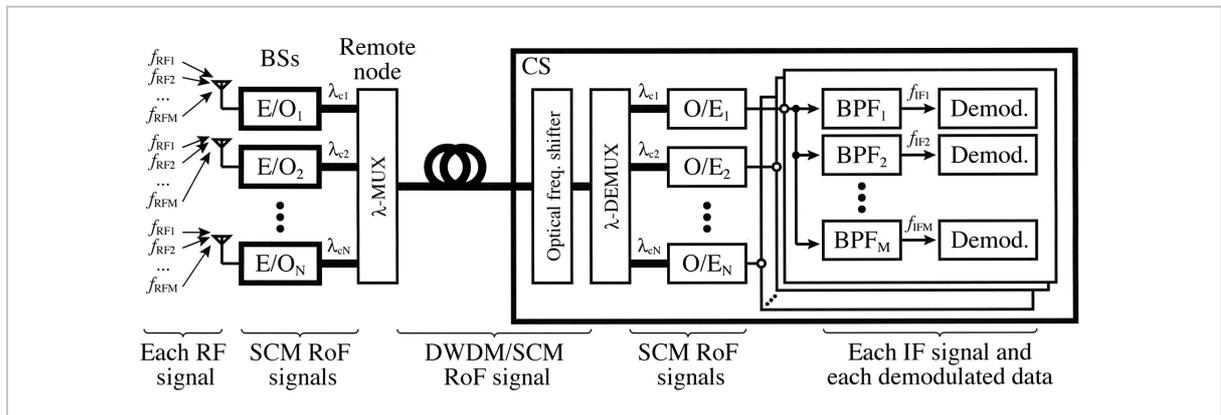


図2 光周波数重畳配置DWDM/SCM RoFシステムの構成例

$f_{LO}/2$ のアップシフトの光周波数変換を与えると、図 3 (b) のようになる。ここで、 f_{LO} はお互いに重なり合わないよう注意して設定する必要がある。図 3 (b) に示すように、この光周波数変換により、光搬送波 (C_n) と第 1 側帯波 (例えば、 $U_{(n,m)}$ ($m=1, 2, \dots, M$)) 成分はお互いに接近した関係となる [6]。近接した $f_{cn} + f_{LO}/2$ と $f_{cn} + f_{RFm} - f_{LO}/2$ ($m=1, 2, \dots, M$) の成分同士を λ -DEMUX で取り出すと、図 3 (c) のような光信号が分離して得られる。これらを光検波することで、マイクロ波帯に所望の SCM IF 信号 ($f_{IFm} = f_{RFm} - f_{LO}$, $m=1, 2, \dots, M$) が得られる。最後に、図 3 (d) に示すように、SCM IF 信号を個別の IF 信号に分離して復調する。以上のようにすれば、光周波数重畳配置 DWDM/SCM 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を適用することができる。

3 実験

図 4 に実験構成図を示す。

二つの波長可変レーザ光源 (TLS₁ 及び TLS₂ : tunable laser source) から出力された 1552.12 nm [= c/f_{c1}] の光搬送波と 25 GHz [= $f_{e2} - f_{c1}$] だけ離れた 1551.92 nm [= c/f_{c2}] の光搬送波をそれぞれ、60 GHz 帯電界吸収型半導体光変調器 (EAM₁ 及び EAM₂ : electro-absorption modulator module) により、SCM RF 信号で変調した。ここで、 c は真空中の光速であり、変調している SCM RF 信号は、変調速度 155.52 Mb/s の独立した仮想ランダムデータ (PRBS : pseudo random bit sequence, $2^{23}-1$) で DPSK 変調された 59.6 GHz [= f_{RF1}] と 60.0 GHz [= f_{RF2}] の信号で構成した。100 m の SMF (short) は両 DWDM チャネルで 155.52 Mb/s のデータの相関をなくすために挿入された。これにより、すべてのデータは統計的に独立であるとみなすことができる。二つの BS で生成された SCM RoF 信号は 3 dB 光カップラで合成され、所望の光周波数重畳配置 DWDM/

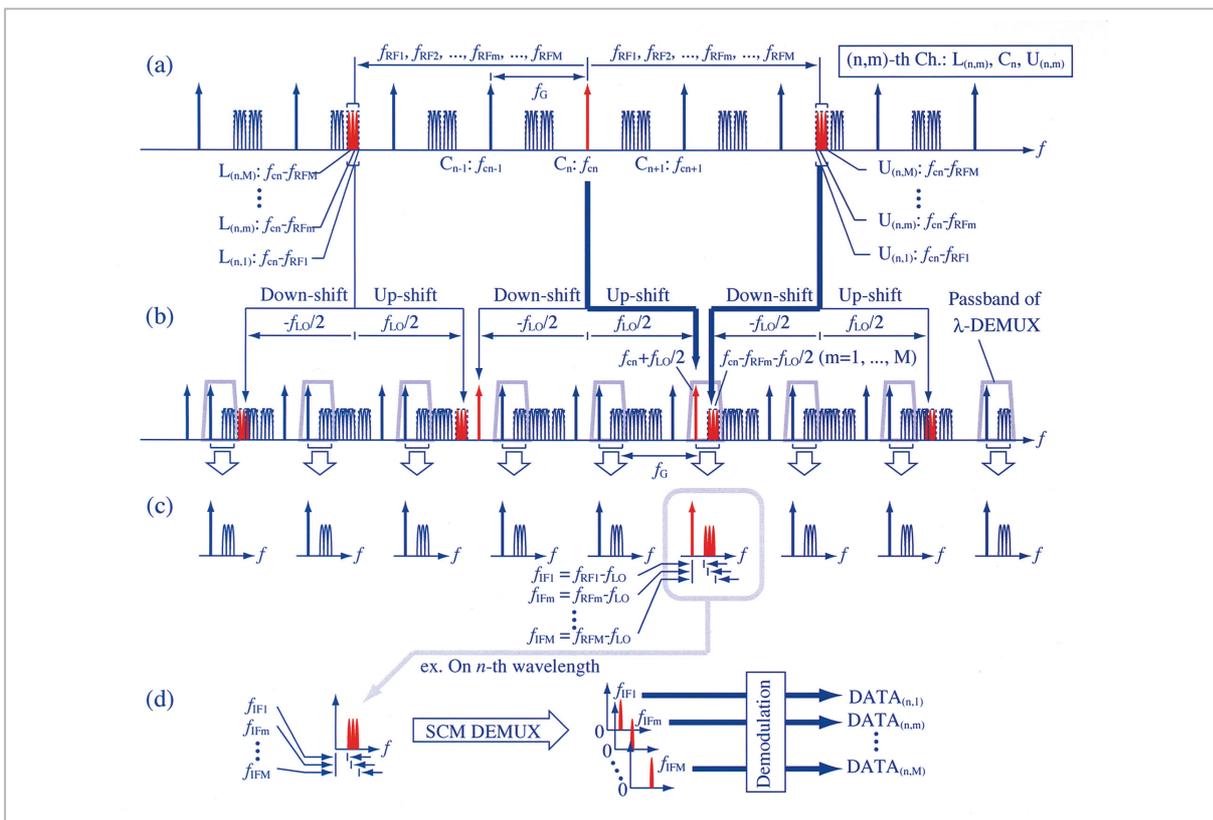


図3 スペクトル設計例

(a) 受信 DWDM/SCM RoF 信号、(b) 周波数変換された DWDM/SCM RoF 信号と λ -DEMUX の通過帯域、(c) DWDM 分離された光信号、(d) SCM IF 信号の分離と復調

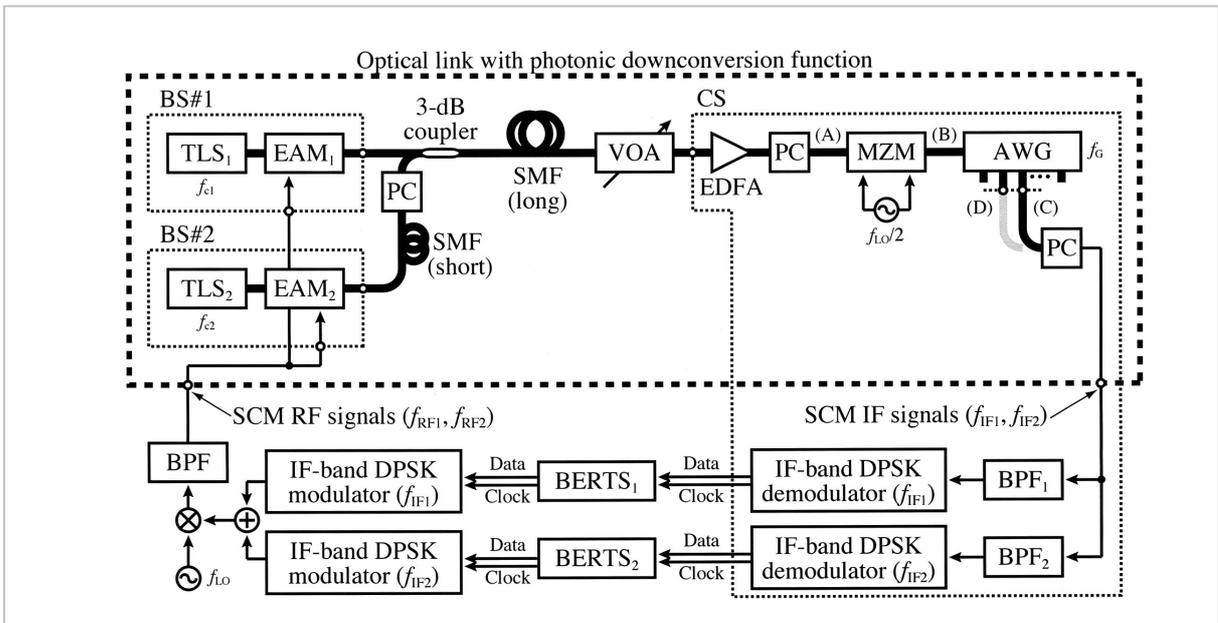


図4 実験構成

SCM RoF 信号として 25 km の SMF (long) で CS まで伝送された。なお、CS 直前の可変光減衰器 (VOA : variable optical attenuator) は光受信電力をコントロールするのに使用された。CS 内の LiNbO₃ マッハツェンダー型変調器 (MZM : Mach-Zehnder modulator) は、前章で述べた所望の光周波数変換を与えるため、搬送波抑圧両側帯波 (DSB-SC : carrier-suppressed double sideband) 変調となるよう設定した [5] [6]。受信信号光はまず、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA : Erbium-doped fiber amplifier) で増幅され、MZM の偏光軸に合うように偏波制御器 (PC : polarization controller) で偏波が調整されてから、MZM に入力された。偏波調整された光信号は光周波数領域で周波数変換され、次段の 25 GHz 間隔のアレー導波路格子 (AWG : arrayed waveguide grating) に入力された。AWG の異なるポートからは近接した光成分群 ($f_{c1} + f_{LO}/2$, $f_{c1} + f_{RFm} - f_{LO}/2$) と ($f_{c2} + f_{LO}/2$, $f_{c2} + f_{RFm} - f_{LO}/2$) が出力されるので、これらをそれぞれ光検波することで、フォトニックダウンコンバージョンされた SCM IF 信号を生成した。ここで、周波数シフト量 $f_{LO}/2$ は 28.5 GHz とした。フォトニックダウンコンバージョンされた各 SCM IF 信号はチャンネル分離され、元の 155.52 Mb/s データを再生するために個別に復調された。

図 5 の (a) と (b) にそれぞれ、図 4 の (A) と (B) のポイントで測定された光スペクトルを示す。

図 5 の (a) と (b) を比べれば分かるように、それぞれの光成分は 28.5 GHz ずつ、ダウンシフト及びアップシフトの光周波数変換された。

図 6 の (a) と (b) はそれぞれ、図 4 の (C) と (D) のポイントで測定された光スペクトルを示す。

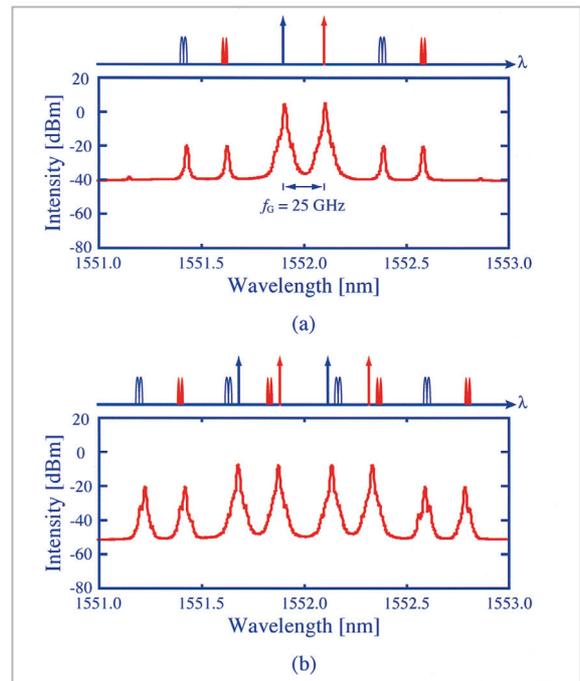


図5 受信された光スペクトル

(a) MZM 入力、(b) MZM 出力

$f_{cn} + f_{Lo}/2$ と $f_{cn} + f_{RFm} - f_{Lo}/2$ ($m=1, 2$) の光成分の二つの組、第(1, m)チャンネルと第(2, m)チャンネルはそれぞれ、25 dB 及び 35 dB 以上の抑圧度をもって抽出することができた。上部に示しているスペクトルのイラストにあるように、抽出された信号には三つの周波数成分、すなわち、一つの搬送波と二つの側帯波が含まれており、二つの側帯波と搬送波との間隔はそれぞれ、2.6 GHz と 3.0 GHz である。なお、各 DWDM チャンネルの抑圧度は実験で用いられた AWG の特性に依存していた。

図7は、フォトニックダウンコンバージョンされた SCM IF 信号の電気スペクトルと、SCM チャンネル分離に使用された帯域通過ろ波器 (BPF: bandpass filter) の通過帯域を示している。

これらの図に示すように、マイクロ波帯に期待していたとおりの光検波信号が発生した。これらの搬送波周波数はそれぞれ、2.6 GHz と 3.0 GHz であることも分かる。さらに、これらの信号は、3 dB 帯域幅 234 MHz を有する BPF₁ と BPF₂ の通過帯域内に収まっていることも分かる。データによる変調を行わず、搬送波のみのフォトニックダウンコンバージョンを行ったが、いずれのスペクトル線幅も十分細く、レーザの有する位相雑音の影響を受けていなかったことも確かめられた。

以上の結果は、両方の DWDM チャンネルにおいて、59.6 GHz と 60 GHz の元の SCM RF 信号は 2.6 GHz と 3.0 GHz の所望の SCM IF 信号に、原理のとおり周波数変換ができたことを示している。

上記実験システムの通信品質を調べるため、25 km の SMF 伝送後のビット誤り率 (BER: bit error rate) をすべてのチャンネルについて測定した。その結果を図8に示す。

EDFA 入力点の総光受信電力が -17 dBm のとき、すべてのチャンネルについて同時に 10^{-9} 以下の BER を達成することができた。チャンネルによりパワーペナルティーも観測されたが、偏光のずれや、光搬送波周波数、EAM のバイアス電圧、EAM の RF ポートの反射特性、入力 SCM RF 信号の変調電力などの違いによって生じる光変調条件に起因する変調度のずれが原因と考えられる。測定範囲内では BER フロアーは観測されなかった。単チャンネルの伝送も試みたが、本結果の多重チャンネル伝送時と大きな差は見られなかった。以上により、25 dB 及び 35 dB 程度のクロストークがあっても 10^{-9} の BER では問題にならないことが確かめられた。

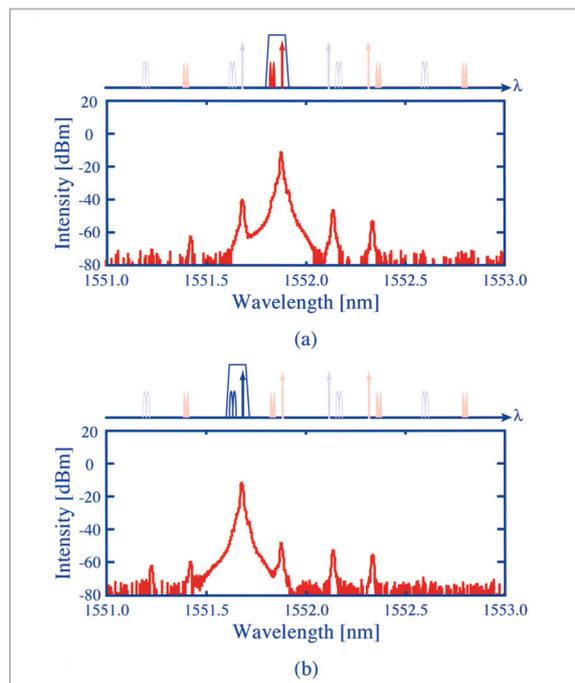


図6 AWG 出力の光スペクトル
(a) 第(1, m)チャンネル、(b) 第(2, m)チャンネル

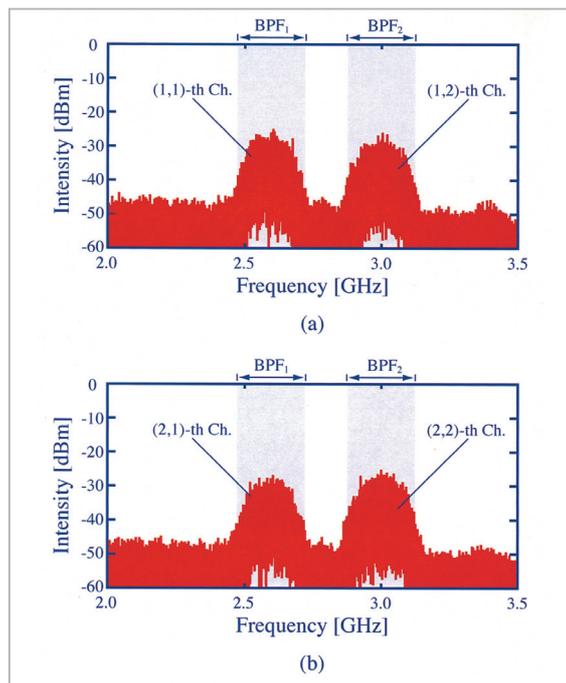


図7 PD出力の電気スペクトル
(a) 第(1, m)チャンネル、(b) 第(2, m)チャンネル

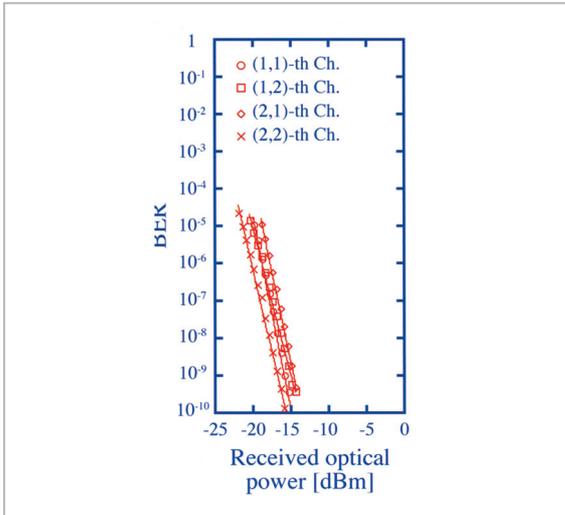


図8 ビット誤り率

4 むすび

本稿では、光周波数重畳配置 DWDM/SCM 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技術について述べた。当該フォトニックダウンコンバージョンは CS 側ですべてのアップリンク DWDM 信号に対して一括して行われるものであった。それぞれのチャンネルは光学的に分離され、個別に光検波と復調が行われ、光ファイバの分散の影響も受けることがない。実験により、155.52 Mb/s の DPSK データで変調された二つの 60 GHz 帯 SCM RoF 信号をさらに、25 GHz 間隔で 2 チャンネルの DWDM 伝送をした場合でも、クロストークの影響を受けることなくエラーフリーを達成できることを示した。

本技術は将来、ブロードバンドワイヤレスアクセスの需要が急増しても、システムコストを抑えて、「クリーンな電波環境」を提供するアクセス基盤の礎となるであろう。

参考文献

- 1 G.H.Smith, D.Novak, and C.Lim, "A millimeter-wave full-duplex fiber-radio star-tree architecture incorporating WDM and SCM", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.10, No.11, pp.1650-1652, Nov. 1998.
- 2 K.Kojucharow, M.Sauer, H.Kaluzni, D.Sommer, and C.Schaffer, "Experimental investigation of WDM channel spacing in simultaneous upconversion millimeter-wave fiber transmission system at 60 GHz-band", in IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2000) Technol. Dig., Vol.2, WE4C-7, pp.1011-1014, June 2000.
- 3 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, pp.1135-1136, June 2000.
- 4 K.Kitayama, "Architectural considerations on fiber radio millimeter-wave wireless access systems", J. Fiber and Integrated Optics., Vol.19, pp.167-186, 2000.
- 5 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.
- 6 T.Kuri, H.Toda, and K.Kitayama, "Dispersion-effect-free dense WDM millimeter-wave-band radio-on-fiber signal transmission with photonic downconversion", in Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2002 (APMC2002), WE1C-04, pp.107-110, Nov. 2002.



く り と し あ き
久利敏明

新世代ネットワーク研究センター光波
量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員
(旧基礎先端部門光情報技術グループ
主任研究員) 博士(工学)
光通信方式



と だ ひ ろ ゆ き
戸田裕之

同志社大学工学部助教授 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