

## 光無線融合技術を用いたマルチセル通信システム

清水 聡<sup>†</sup> 金岡 泰弘<sup>††</sup> 櫻村 聡<sup>†</sup> 山下 育男<sup>††</sup>

Multi-Cell Communication Systems Using Radio over Fiber Technology

Satoru SHIMIZU<sup>†</sup>, Yasuhiro KANAOKA<sup>††</sup>, Satoru KASHIMURA<sup>†</sup>,  
and Ikuo YAMASHITA<sup>††</sup>

あらまし 光無線融合技術 (ROF: radio over fiber) は, 光ファイバ伝送の低損失性と無線伝送の柔軟性を組み合わせた通信システムの構築を可能にする. 更に分岐が容易となる光ファイバ伝送路の特徴を生かすことで, マルチセル型の無線システムが効果的に構成できる. しかし, 光-電気変換部の付加に伴うコスト増や, マルチセル構成時のセル間干渉が課題となる. また光ファイバ区間を長くして長距離伝送に対応する場合, 遅延が大きくなるために通信プロトコルでのタイムアウトを考慮する必要がある. 本文ではこれに対し, 光-電気変換部に FP-LD (fabry-perot laser diode) を採用した BIDI (bi-directional) モジュールを適用し, 特に公衆無線 LAN を対象としてシステムを経済化する方策を示す. セル間干渉に対しては, 公衆無線 LAN に限らず, CDMA (code division multiple access), 切換ダイバーシチ, MIMO (multi-input multi-output) など, マルチパスを積極的に活用する無線技術に基づく対策を示す. 特に MIMO の場合, 異なるアンテナ出力を隣接セルに接続すれば, セル端の干渉が生じる部分の方が条件によってはセルの中央より伝送品質が高くなる可能性を指摘する. また, 長距離伝送時の遅延に対する留意点を説明する.

キーワード 光無線融合技術, FP-LD, BIDI, ダイバーシチ, 無線 LAN

## 1. ま え が き

光無線融合技術 (ROF: radio over fiber) は, 広帯域な信号を低損失に安定して伝送することができる光ファイバの特徴と, 損失や安定性は劣るがモビリティに対する柔軟性をもつ無線の特徴を組み合わせた伝送技術である. 光ファイバは同軸ケーブルに比べ低損失であるため, 基地局無線機とアンテナ間の設置距離を長くとることが可能となる. マイクロ波帯はもとより, ミリ波帯についても伝送する技術の開発が進んでおり, 既に, 広く普及した FTTH (fiber to the home) を用いたテレビ放送の配信, トンネルや地下街など携帯電話の不感地帯対策 [1], [2] など, 様々な通信・放送システム設計に寄与している. また実験段階ではあるが ITS (intelligent transport system) への応用 [3], [4] など進められている.

更に光ファイバ伝送路は分岐が容易なため, 基地局無線機に複数のアンテナを接続してマルチセル通信システムを構成することも可能であり, 基本的な検討も行われている [5] ~ [7]. 今後の無線システムでは, マイクロセル・ピコセルなどの小さな通信エリアを柔軟に設置することが求められ, その方法の一つである ROF によるマルチセル化は重要な無線構築技術と位置づけられる.

しかしながら, 通信システムの開発及び導入に関しては, 機能面だけでなく投資対効果が重要なポイントであり, 特に近年は得られる効果が導入コストに見合うかについて厳しく問われるようになってきた. ROF を用いる場合には, 光・通信・ネットワークなどの様々な要素技術を最適に統合してシステムを構成することが求められるが, そのような観点から ROF による無線システムを考えた場合, 次のような課題がある.

まず, 基地局無線機とアンテナを直結する場合に比べ, ROF では光信号と電気信号の間を変換する装置が追加される. したがって, その装置のサイズやコストが基地局自体に比べて大きい場合, ROF を活用するメリットを見出すことが難しくなる. そこで小型で

<sup>†</sup> 沖電気工業株式会社無線技術研究開発部, 横須賀市  
Okai Electric Industry Co., Ltd. Wireless Technology R&D  
Division, 3-4 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

<sup>††</sup> 関西電力株式会社電力技術研究所, 尼崎市  
Kansai Electric Power Co., Inc. Power Engineering R&D  
Center, 3-11-20 Nakoji, Amagasaki-shi, 661-0974 Japan

高い経済性を備えた光-電気変換部が必要となる。

次にマルチセル化に関して、単純に基地局とアンテナ間の信号を分岐して、複数のセルに同じ信号を送信する場合、セル間では伝搬路でマルチパスが生じているのと同じ状況になり、干渉のため伝送品質が劣化する。これに対し、OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) のように耐干渉性のある変調方式、CDMA における RAKE 受信のようにマルチパスを受信品質の向上に使う方式、MIMO (multi-input multi-output) のように積極的にマルチパスを利用して伝送容量を高める方式の利用が考えられる。電波伝搬の特性を把握した上でこのような通信方式を適用したシステム設計を行えば、セル間の干渉状態を効果的に活用することができ、適切なセルの面的設計が可能になると考えられる。

また、ROF による長距離伝送においては、伝送遅延も無視できなくなる。信号品質が良好であっても、ACK, NACK の返送が遅れる場合、スループットの低下や再送制御の誤動作が生じるため、これを考慮した設計が必要となる。

本論文では、以上のような技術的背景を踏まえつつ、我々の身近にある IEEE802.11 規格である汎用の無線 LAN への ROF の適用を示す。無線 LAN の端末は、スマートホンや携帯ゲーム機への搭載が進み、多彩な利活用が行われるようになってきた。アクセスポイントは家庭やオフィスだけでなく、駅や店舗内といった公衆サービスに展開されており、通信インフラとしての整備が進みつつある。このため今後は、携帯電話のリモート基地局設置と同様に、光無線融合技術を活用してアクセスポイントの設置が行われることが予想される。機能・性能・低価格化を考慮し、モジュールからシステム設計における課題や解決方法について説明する。

本論文の構成は次のとおりである。2. では FP-LD の採用と双方向化によって、光-電気変換部の経済化と簡素化を実現した BIDI (bi-directional) モジュールについて述べる。3. でセル間干渉に対し、CDMA, 切換ダイバーシチ, MIMO を用いた対策について、その効果とともに説明する。CDMA は汎用無線 LAN には採用されていないが、ROF の特長を生かせる技術として紹介する。また MIMO の場合は、異なるアンテナ出力を隣接セルに接続すれば、セル端の干渉が生じる部分の方が条件によってはセルの中央より伝送品質が高くなる可能性を指摘する。4. では、長距離伝送

時の遅延に対する留意点を説明する。

## 2. ROF に用いる光デバイスの対応

### 2.1 光デバイスにおける課題

ROF による無線システムの構成について図 1 に示す。ROF は、基地局無線機が接続されている光-電気変換部 (CS: central station) と、アンテナが接続されている RA (remote antenna) が、光ファイバで結ばれた通信システムである。CS は、通信サービスを行う基地局無線機と、電気信号を光信号に変換する E/O、及びその逆を行う O/E から構成される。RA は、O/E、E/O とアンテナと送受信系をつなぐデュプレクサ (DUP) から構成される。なお、図 1 は機能を簡略化して記載した。光電気変換だけでなく、伝送帯域の信号のみ取り出す帯域フィルタや、RA の O/E は PA (power amplifier), E/O は LNA (low noise amplifier) など実装する必要がある。また、無線 LAN は TDD のシステムであるため、デュプレクサは例えばサーキュレータで構成される。

ROF の適用メリットとして、まず複数の基地局無線機を 1 箇所に設置できるため、保守・管理が容易になることが挙げられる。また ROF は、無線信号をトランスペアレントに伝送するため、基地局無線機の更新や変更に対して伝送路や RA はそのまま利用できる。これによって、通信システムの維持更新費用を低く抑えることが可能となる。あるいは基地局無線機が大きく、無線通信サービスを提供したい場所の近くに設置することが困難な場合、ROF で CS-RA 間を光ファイバケーブルで延長して設置することで、無線サービスエリアを構築することができる。ROF のこのような特長によって、柔軟なシステムが実現できる。

しかし CS と RA に内蔵される E/O、O/E と、それらを接続する光ファイバは、基地局無線機にアンテナを直接接続する場合に比べて付加的な設備になる。したがって、費用対効果が求められる設備導入に向けては、これらの経済化、とりわけ大きなコストを占める光-電気変換部の低コスト化が必要となる。

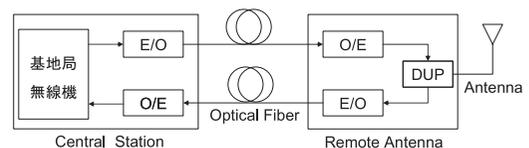
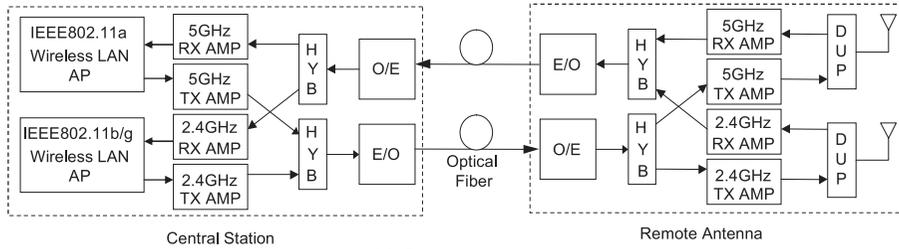


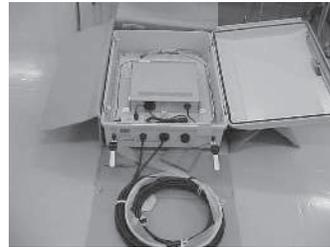
図 1 ROF システムの基本構成  
Fig.1 Basic structure of ROF system.



(a) System structure



(b) Central Station



(c) Remote Antenna

図 2 デュアルバンド ROF システム

Fig. 2 Dual band ROF system.

このため光デバイスに関して二つの取組みを行っている．一つは光源の LD (laser diode) の FP-LD (fabry-perot laser diode) 化である．もう一つは、光源の LD と受光素子の PD (photo diode) のモジュール化である．以下、それらの詳細について説明する．

## 2.2 ROF の光源への FP-LD の適用

### 2.2.1 FP-LD を適用した光-電気変換部の検討

ROF においては、単純に無線信号を光信号にアナログ変復調するので、ROF 部分の CNR が回線品質に大きく影響を与える．このため高価ではあるが低雑音の DFB-LD (distributed feed back laser diode) が光源として用いられ、コストアップにつながっていた．

一方 LD には、DFB-LD より構造が簡単なため安価であり、光デジタル伝送で広く使用されている FP-LD がある．FP-LD は DFB-LD と比べ、複数のスペクトルで発振することから、雑音特性面では劣る．しかし、実用上問題とならない程度の劣化で収まるのであれば、積極的に活用することが考えられる [8]．

FP-LD を使用することに起因する雑音の増加と、通信システムへの影響を調べるために、図 2 に示すような IEEE802.11b/g (2.4 GHz 帯) と IEEE802.11a (5 GHz 帯) の無線 LAN 信号をデュアルバンドで伝送する ROF システムを構築し、検証を行った [9]．それぞれの無線 LAN の AP (access point) からの上りと下りの信号は、RF 信号の状態統合された後、光

表 1 RF と光レベルの諸元

Table 1 Characteristics of RF and optical level.

Frequency	5.15~5.25GHz, 2.4~2.483GHz
RF Input	10dBm (AP→TX AMP) >-88dBm (RA での受信電力)
RF Output	>-88dBm (RX AMP→AP) 3dBm (RA での送信電力)
Band Width	16.8MHz (5GHz band) 22.0MHz (2.4GHz band)
Optical Input	>0dBm
Optical Output	10dBm (CS), 3dBm(RA)

信号に変換され、光ファイバで伝送される．

図 2 のデュアルバンド ROF システムの RF 信号と光信号の諸元を表 1 に示す．無線 LAN の送信電力の規格は 10 mW/MHz、一般に市販されている機器は 50 mW 程度であるが、今回は LD が過入力にならないよう E/O への入力点で 2 mW になるよう出力を調整した．

このシステムの光源を DFB-LD から FP-LD に変更した場合における、ROF 部分の CNR について見積りを行った．ROF における光-電気変換部の CNR は式 (1) で算出される [10],[11]．式 (1) の変数のうち、 $RIN$ 、 $\eta$ 、 $I_{th}$  は LD、PD の特性で決まる．また、 $BW$

は伝送するシステムに依存する値であり、変更可能な数値は  $omi$  のみである。ROF の DFB-LD を雑音特性の劣る FP-LD に置き換えた場合、CNR が劣化する。これに対し  $omi$  の値を調整することによって CNR を確保できると考えられる。

$$CNR = \frac{omi^2(P_{op}\eta)^2}{2(RIN(P_{op}\eta)^2 + 2e(P_{op}\eta) + I_{th}^2)BW} \quad (1)$$

$omi$  : LD 部変調度,  $RIN$  : LD 強度雑音,  
 $P_{op}$  : 受光レベル,  $\eta$  : PD の変換効率,  
 $e$  : 電子電荷,  $I_{th}$  : PD 部等価雑音電流密度,  
 $BW$  : 帯域

$omi$  を大きくすると、CNR は改善するものの LD の非線形性の影響が現れてくる。図 2 のシステムの設計で評価した LD は、三次ひずみによる CNR を 50 dB 以上確保するには  $omi$  をおおむね 20%以下に抑える必要がある。そこで、無線 LAN の最高伝送速度 54 Mbit/s における最小受信入力レベル感度である -65 dBm を基準入力とし、その際に FP-LD の  $omi$  は十分にひずみの影響が現れない変調度 (1~2%) になるよう設計し、DFB-LD を用いた場合に近い特性が得られるようにした。

検討に用いた DFB-LD と FP-LD の諸元を表 2 に示す。FP-LD の  $RIN$  は -140 dB/Hz となり DFB-LD より約 10 dB 低下している。

表 2 光部主要諸元 (DFB-LD, FP-LD)  
 Table 2 Characteristics of optical components of DFB-LD & FP-LD.

	DFB-LD	FP-LD
Output : LD	2mW	2mW
RIN	< -150dB/Hz	< -140dB/Hz
$\eta$	0.8A/W	0.8A/W
$I_{th}$	< 20pA/ $\sqrt{Hz}$	< 20pA/ $\sqrt{Hz}$
	(5GHz band)	(5GHz band)
	< 10pA/ $\sqrt{Hz}$	< 10pA/ $\sqrt{Hz}$
	(2.4GHz band)	(2.4GHz band)
$P_{op}$	1mW	1mW
Wavelength	1.31 $\mu$ m	1.31 $\mu$ m
$BW$ (表 1 再掲)	16.8MHz (5GHz band)	
	22.0MHz (2.4GHz band)	

これに対し 5 GHz 帯及び 2.4 GHz 帯の伝送について FP-LD の  $omi$  を DFB-LD より大きな 1%若しくは 2%とし、ROF 区間の CNR を計算した結果を表 3 に示す。FP-LD とした場合の CNR は、DFB-LD に比べて 3 dB 弱の劣化に収まっている。なお 2.4 GHz 帯が 5 GHz 帯に比べて約 5 dB 程度 CNR が良くなっているが、表 2 のように  $I_{th}$  の値が半分であることから、CNR は 6 dB の差が出ると推定され、これとほぼ一致している。

2.2.2 FP-LD 適用時の性能評価

表 3 に示した FP-LD と DFB-LD の CNR 特性の差が、実際の通信システムの品質にどの程度の影響を与えるかを実験的に評価した。性能測定系を図 3 に示す。RA と無線 LAN の端末 (ST) 間をアッテナータで接続し、CS 内の無線 LAN の AP と ST 間のトラヒックは LAN アナライザを使用して測定した。測定においてはスループットを評価尺度とした。スループットは単に無線や ROF の単体性能ではなく、システム全体としての伝送品質を示し、ユーザが体感する性能でもあるためである。測定においては CS と RA 間の光ファイバ長は 400 m とした。

この系で、ATT によって CS 内にある無線 LAN の受信入力電力を変えながら AP と端末間の上りリンクのスループットを測定した。その結果を、図 4 (5 GHz 帯) 及び図 5 (2.4 GHz 帯) に示す。なお比較のため、ROF を用いない場合の結果も記録した。

5 GHz 帯の場合 (図 4), 受信電力が -20 ~ -60 dBm では良好なスループットが得られ、-65 dBm より下が

表 3 CNR 特性の計算値  
 Table 3 Design value of CNR characteristics.

	CNR (5GHz)	CNR (2.4GHz)
FP-LD	24.6dB ( $omi$ : 1%)	29.4dB ( $omi$ : 2%)
DFB-LD	27.2dB ( $omi$ : 0.5%)	32.1dB ( $omi$ : 1%)

(RF input: -65dBm)

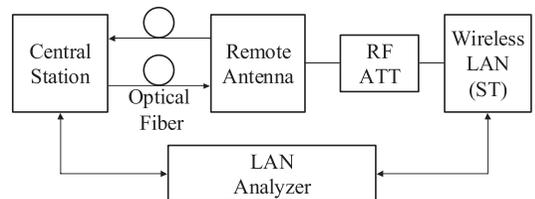


図 3 ROF の性能測定系  
 Fig. 3 ROF performance measurement system.

ると無線 LAN のフォールバック機能が動作しスループットが低下する。FP-LD の場合と DFB-LD の場合を比較すると、最大スループットはともに 31 Mbit/s で両者に違いはない。しかしスループット低下は、雑音が一定の中で受信信号レベルが低下することに起因するため、表 3 の CNR 差とほぼ同じ約 3 dB 差となる。

2.4 GHz 帯の場合 (図 5) は、 $-70$  dBm 程度まで良好なスループットが得られ、これを超えるとスループット低下となる。また、最大スループットは 26 Mbit/s であった。5 GHz 帯の結果と比較すると、スループットの低下点は約 10 dB、最大スループットは 5 Mbit/s の差があった。この違いは無線 LAN の規格上の性能差と考えられ [12]、実際に ROF なしでも同じ差が生じている。また FP-LD、DFB-LD のスループット低下が始まる受信電力の差は、2.4 GHz 帯の場合と同様、表 3 の CNR の差とほぼ同じになった。

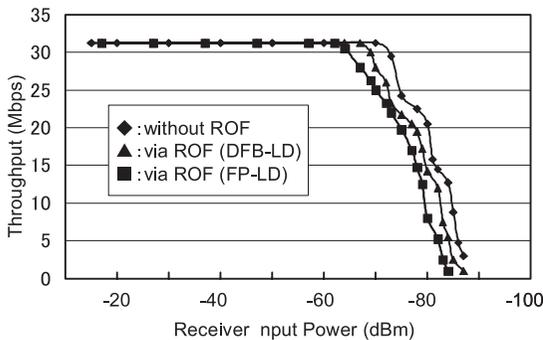


図 4 無線 LAN の ROF での伝送特性 (5 GHz)  
Fig. 4 Transmission characteristics of wireless LAN using ROF (in the case of 5-GHz band).

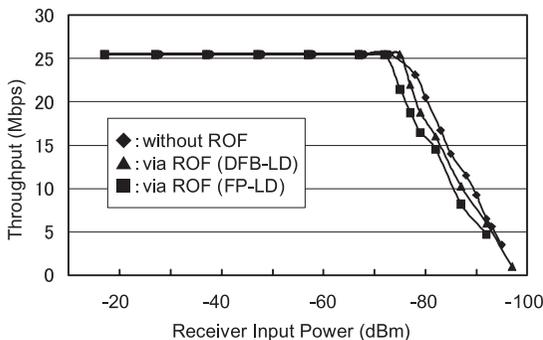


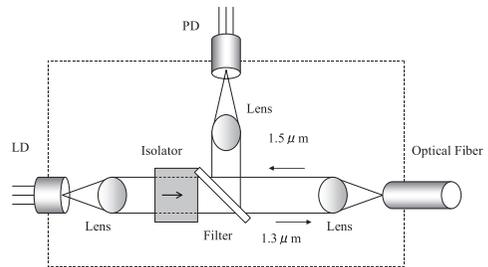
図 5 無線 LAN の ROF での伝送特性 (2.4 GHz)  
Fig. 5 Transmission characteristics of wireless LAN using ROF (in the case of 2.4-GHz band).

以上の測定結果のように、十分な受信電力が得られる場合には、安価な FP-LD を用いても DFB-LD を用いた場合と同等の伝送特性が得られた。ただし受信電力が弱くなると、DFB-LD と FP-LD では設計した CNR に応じた特性差が生じることが明らかとなった。性能におけるこの差が許容できるのであれば、FP-LD を用いたシステムとすることで低コスト化が可能となる。

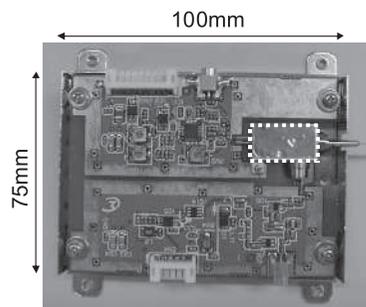
### 2.3 BIDI モジュールの設計と評価

低コスト化に向けたもう一つの方策として光デバイスのモジュール化を検討した。一般に、製造コストの低減のためには部品点数を減らすことが有効である。それはまた、実装面積・体積の圧縮となり小型化にもつながる。更に、ROF における双方向通信を 1 本の光ファイバで実現すれば、光ファイバ敷設も非常に楽になり、光ファイバの効率的な使用も可能になる。

このような一体化と双方向の効果を狙い、FP-LD を用いて受光素子 (PD)、光源 (LD) を一体化した BIDI モジュールを試作した。その構成と写真を図 6 に示す。図 6 (b) の点線部分が図 6 (a) に該当する。他に光出力を一定にする APC (auto power control) や



(a) Composition of BIDI module.



(b) Photo of BIDI module

図 6 BIDI モジュール  
Fig. 6 BIDI module.

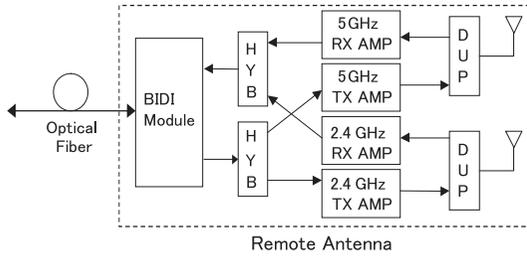


図 7 BIDI モジュールを用いた RA の構成

Fig. 7 Composition of remote antenna with BIDI module.

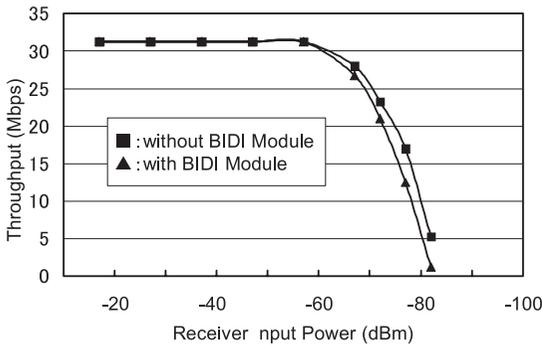


図 8 BIDI モジュール適用時の伝送特性 (5 GHz)

Fig. 8 Transmission characteristics with BIDI module (5 GHz).

RF アンプ, 電源回路などからなる. 受信を  $1.5 \mu\text{m}$  帯, 送信を  $1.3 \mu\text{m}$  帯で行い, 各光信号を波長多重することで, 1 本の光ファイバでの双方向通信を実現している. したがって, 反射光・漏えい光による回り込みが発生しやすい. 更に RF の送受信周波数が同じという条件で小型化するため, 電気回路での抑制も困難である. そのため光フィルタ, アイソレータ, 光路設計などを通してアイソレーションの確保に留意した. なお FP-LD は表 2 に示す諸元のものを使用した.

図 2 の ROF システムの RA を, 図 7 のように BIDI モジュールを用いた構成に置き換え, 伝送特性の測定を通して性能を評価した. 前節と同じく, RA のアンテナポートに ATT を介して無線 LAN を接続し, RF レベルを変えながら上りリンクのスループット測定を行った. CS 側については, E/O, O/E と光ファイバの間に WDM (wavelength division multiplexing) フィルタを追加して, 波長多重とした. 光ファイバ長は 400 m である. スループット特性を図 8 (5 GHz 帯), 図 9 (2.4 GHz 帯) に示す. 比較のため, BIDI を用いない場合の結果も示す.

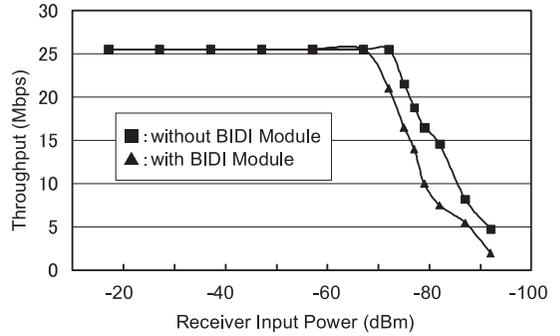


図 9 BIDI モジュール適用時の伝送特性 (2.4 GHz)

Fig. 9 Transmission characteristics with BIDI module (2.4 GHz).

5 GHz 帯と 2.4 GHz 帯のいずれの場合も, 十分な受信電力があれば BIDI モジュールの適用と非適用による差は見られない. ただし受信電力が弱い場合においては, 双方向伝送に伴う劣化が観測されるようになる. これは BIDI 化に際し 30 dB 以上の送受信間のアイソレーションは確保したものの, 取り除けなかった回り込みの影響と想定される. FP-LD 化の場合と同じく, システム構築においてこの差が許容されれば, BIDI モジュール化はコスト低減や実装面積の圧縮などで有効な方策と考えられる.

### 3. マルチセル通信のセル間干渉への対応

#### 3.1 ROF を用いたマルチセル構成

1 台の CS で, より広い面積をカバーするシステムを構築する手段として, CS 1 台当りの RA を増やしてマルチセルを構成し, サービスエリアを面的に拡大する方式が考えられる [13]. 具体的には, 図 10 のように光分岐によって CS に複数の RA を接続する方法が考えられる. 光カプラやスプリッタを用いれば光信号は容易に分岐できるため, 簡単にマルチゾーンが形成できる. もちろん, 電気信号の部分で分岐する方法も考えられるが, 光と電気の変換回路 (図 10 では BIDI) が複数必要になる. コスト面を考えると, 光で分岐する方がよい.

また図中に端末として Mobile Terminal を示したが, 各 RA は同じ CS に接続されるため, マルチセルの中で端末がセル間を移動してもハンドオーバーは生じない. ただし各セルには同じ信号が分岐されるため, セルが重なる地点では, 干渉が発生するという課題がある. これに対し RAKE 受信の適用をはじめとして,

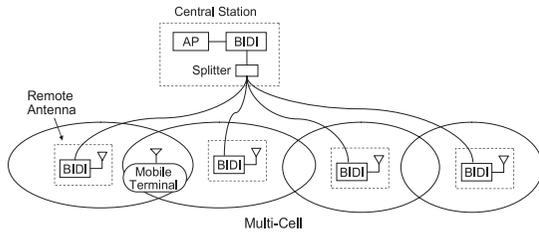


図 10 ROF によるマルチセル構成  
Fig. 10 Multi-cell structure using ROF.

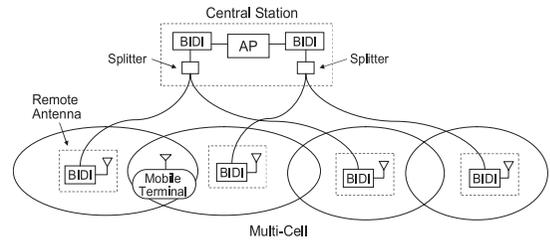


図 11 ダイバーシチ機能を適用するマルチゾーン構成  
Fig. 11 Multi-cell structure applying diversity function using ROF.

干渉の低減方式が考慮される．これらを次に説明する．

### 3.2 RAKE 受信の適用

CDMA は、同一周波数を使用しながらも拡散符号を変えることにより多元接続を実現する第三世代の携帯電話で使われている方法である．無線 LAN では適用できないが、ROF の用途の一つとして紹介する．

CDMA では、逆拡散の過程で所望の通信相手の複数のパスを抽出・合成することで受信品質を向上させる RAKE 受信というパスダイバーシチ技術が適用できる [14]．この場合、パスの間に逆拡散で分離できるだけの時間差があり、かつ、相関が低いことが必要となる．この条件を成立しやすくするため、CDMA の基地局アンテナを互いに離れた場所に複数設置する分散アンテナと呼ばれる方法がある [5], [6]．

分散アンテナを ROF で実現する場合、図 10 に示す構成と同じになる．ただし、CS-RA 間の光ファイバ長で、拡散符号の 2 チップ以上に相当する時間差を隣接セル間で与えることで、セル境界におけるパス分離の確度を高める．CS の AP の通信方式が RAKE 受信機能を有する CDMA であれば、図 10 のような設置を行った場合、複数セルが重複した場所では RAKE 受信により、伝送品質の劣化が抑えられる．各パスの時間差と電力が十分にあり、相関が低い場合には、むしろ安定した通信が可能になると考えられる．

### 3.3 切換ダイバーシチの適用

前述の RAKE 受信は CDMA での技術であり、他の方式、例えば OFDM を用いる IEEE802.11a/g/n といった一般的な無線 LAN には適用できない．一方で、これらの無線 LAN の AP には、複数のアンテナポートを備えて一番通信状態の良いアンテナに切り換える、切換ダイバーシチ機能がある場合が多い．ROF を用いてアンテナ間の距離を確保することで伝搬路の相関性を低減することで、この切換ダイバーシチ機能をより有効に活用する方法が考えられる [7], [15]．

切換ダイバーシチと ROF を組み合わせたとときの構成を図 11 に示す．切換部分は AP 内部にあり、そのアンテナ端に BIDI モジュールが接続される．図 11 のように、AP の各アンテナポートに隣接する RA を交互に接続すると、セルが重なる地点の MT は、それぞれの RA を通して AP の各アンテナポートと通信をする．このとき切換ダイバーシチにより、通信状態の良いアンテナポートに接続された RA との通信が選択される．その結果、干渉エリアでも一つの RA としか通信しなくなるため干渉の影響が低減される．なお各セルの中央部付近では 1 台の RA を介した通常の通信となる．このような切換ダイバーシチによる送受信は、端末及び AP が備える機能をそのまま利用できるため、特に回路を付加することなく容易に実現できる．

### 3.4 MIMO の適用

MIMO [16] はマルチパスを独立した伝送路として積極的に利用し、通信容量を増大させる技術である．パス間の相関性が低いことが必要であり、その条件を満足しやすくするため、物理的にアンテナを離して設置することが有効である．その手段として ROF の利用が考えられる [17] ~ [19]．

システム構成は図 11 と同じである．ただし、CS 内の AP はもちろん、端末側も IEEE802.11n のような MIMO 機能を有するものでなければならない．この場合、セルの中央部では、端末は  $N$  本のアンテナで通信を行い、AP 側は一つのアンテナで通信を行う、 $1 \times N$  の伝送となる．一方、セルが重なり隣接する 2 台の RA からの信号が受信できる場所では、AP と端末との間で  $2 \times N$  の通信が可能となる．この効果によって、セルの境界でも AP の総受信電力の低減が抑制され、伝送速度の低下も抑えられると考えられる．更に十分に受信電力があり、隣接セル間の通信におけるパスの相関が低いなどの条件が整えば、セルの境界の方

がセルの中央より伝送速度が早くなる場合もあり得る。文献 [17] では IEEE802.11g ベースの  $2 \times 2$  MIMO の無線 LAN を用い、最小受信電力以上の信号が入力される場合には、セル境界の方が 5 Mbit/s ほど改善することが報告されている。

#### 4. ROF システムの長距離化への対応

光ファイバは低損失性であるため、20 km 程度であれば光増幅器等を挿入しなくても ROF で伝送することができる。しかし、携帯電話のような大きなセルを想定していない無線システムを ROF によって長距離化する場合は、信号の品質としては十分に良好であっても、伝送による遅延が通信プロトコル上の問題を生じさせ、光ファイバ伝送可能距離が制限される場合がある。

例えば、ROF を用いてサービスする無線システムが ARQ (automatic repeat request) として Stop-and-wait を採用している場合、ACK や NACK が AP まで返送される時間が長くなり、スループットの低下や、タイムアウトにより通信ができなくなることが生じる。汎用の IEEE802.11 規格の無線 LAN の場合がこれに該当する。

ROF による長距離化を前提にして無線システム自体を新たに設計する場合は、電波伝搬での遅延に加え、光ファイバ伝送で発生する遅延も加味してプロトコルを設計する必要がある。文献 [20] では、光ファイバで 50 km の引き回しを想定した通信プロトコルとして、PR-DSMA (packet reservation dynamic time-slotted multiple access) が提案されている。この方式での ARQ は Go-back-N であるが、遅延の影響を考慮した帯域割当や再送制御を行うことで、スループットの低下を抑えている。

また、IEEE802.11 系の無線 LAN ではプロトコルを変更することはできないが、ACK タイムアウトの変更が可能なものや、長距離通信での使用を想定した製品もあり、これらを活用することで ROF の光ファイバ伝送中に発生する遅延に対し、ある程度は対応できる。具体的には文献 [21] において、IEEE802.11a の ACK タイムアウトを調整し、ROF 環境にて 3 km 伝送時でもスループットの低下なく伝送できたことが報告されている。文献 [22] では長距離用無線アクセスシステムを使用して、光ファイバ長 9 km において約 29 Mbit/s、25 km においても約 13 Mbit/s のスループットが確保できたことが実験的に示されている。

#### 5. むすび

本論文では、ROF を用いたマルチセル通信システムにおける課題、及びこれに対する対応手法について述べた。

まず、ROF に伴う付加装置の経済化のため、光-電気変換部について、FP-LD の活用や BIDI モジュールの採用を提案した。また、一般的な DFB-LD を用いた場合や BIDI 化しない方式との性能の差異を実験的に評価した。FP-LD 化、BIDI モジュール化による伝送特性の劣化はそれぞれ 2~3 dB 程度で受信信号が弱い場合のみしか影響が現れないため、それぞれが十分に実用的であることを示した。

セル設計については、RAKE 受信、切換ダイバーシティ、MIMO など近年の無線通信システムに適用されているマルチパス対策技術を活用することで、隣接セルとの干渉領域における劣化を防げるだけでなく、場合によっては性能が向上する可能性もあることを示した。

更に、ROF で生じる遅延はプロトコル上の不整合やスループットの低下を生じさせる可能性もあるため、通信システムの遅延対策が必要であることを示した。

また、本論文では触れなかったが、比較的新しい標準規格、例えば文献 [23] では、無線設備の技術的条件から、一の筐体への収納の記述がなくなっており、免許不要の無線局への ROF の活用も可能となっている。

このように、ROF を用いてマルチセル通信システムを構築する場合、光-電気変換部での CNR に留意するのはもちろん、コスト・干渉・遅延・規格なども考慮の上、システム全体の設計を行う必要がある。

今後新たに開発される無線システムでは現在より高い周波数が積極的に利用されてくる。これに伴い、無線機-アンテナ間の伝送損失への対応や、空間伝搬中の損失増大に対して、柔軟なセル配置が課題となる。光ファイバの敷設が大いに進んだ環境の中で、この対策として ROF を用いた無線システムがより有効になると予想される。ユーザのニーズと技術的シーズを十分に理解した上で、コスト・性能・効果などを考慮したシステム開発が求められる。

#### 文 献

- [1] 久利敏明, 堀内幸夫, 中戸川剛, 塚本勝俊, “光・無線融合技術をベースとする通信・放送システム”, 信学論 (C), vol. J91-C, no.1, pp.11-27, Jan. 2008.
- [2] 中戸川剛, 前田幹夫, 小山田公之, “デジタル放送用のミリ波 Radio-on-Fiber 伝送”, 信学論 (C), vol. J91-C, no.1, pp.3-10, Jan. 2008.

- [3] 藤瀬雅行, “ROF マルチサービス無線システムについて,” 信学論 (B), vol.J84-B, no.4, pp.655–665, April 2001.
- [4] K. Sato, M. Fujise, S. Shimizu, and S. Nishi, “Millimeter-wave high-speed spot communication system using radio-over-fiber technology,” IEICE Trans. Electron., vol.E88-C, no.10, pp.1932–1938, Oct. 2005.
- [5] H. Ohtsuki, K. Tsukamoto, and S. Komaki, “Macrodiversity effect using ROF ubiquitous antenna architecture in wireless CDMA system,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.7, pp.1197–1202, July 2003.
- [6] 本並裕輔, ハイロン ホン, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三, 安川交二, 熊本和夫, 稲垣恵三, “光多重化方式と光ファイバ無線ネットワークによる分散アンテナ方式の提案,” 信学技報, OCS2007-343, Nov. 2007.
- [7] 松崎圭佑, 藤井雅弘, 渡辺 裕, “上り回線マルチサイト通信システムにおけるサイトダイバーシティ効果に関する一検討,” 信学技報, ISEC2006-596, March 2007.
- [8] 羽鳥光俊, 青山友紀, 小林郁太郎, 光通信工学 (1), 第 4 章, コロナ社, 東京, 1998.
- [9] 金岡泰弘, 櫻村 聡, 浅野欽也, 清水 聡, “光電波融合技術を用いたデュアルバンドマイクロ波帯無線アクセスシステムの検討,” 電学論 (C), vol.126-C, no.1, pp.37–43, Jan. 2006.
- [10] W.I. Way, “Subcarrier multiplexed lightwave system design consideration for subcarrier loop applications,” J. Lightwave Technol., vol.7, no.11, pp.1806–1818, Nov. 1989.
- [11] 渋谷 真, 江村克己, 金井敏仁, “光ファイバ伝送を用いたマイクロセル移動通信の無線信号集積方式,” 信学技報, SAT 90-32, Sept. 1990.
- [12] 守倉正博, 久保田周治, 改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書, 第 8 章, インプレス R&D, 東京, 2008.
- [13] H. Al-Rawashidy and S. Komaki, Radio over Fiber Technologies for Mobile Radio Communications Networks, Artech House Publishers, Boston, 2002.
- [14] K. Higuchi, H. Andoh, K. Okawa, M. Sawahashi, and F. Adachi, “Experimental evaluation of combined effect of coherent Rake combining and SIR-Based fast transmit power control for reverse link of DS-CDMA mobile radio,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.18, no.8, pp.1526–1535, Aug. 2000.
- [15] 山下育男, 金岡泰弘, 櫻村 聡, 清水 聡, “汎用無線 LAN アクセスポイントを用いた光電波融合によるマルチゾーンの構成,” 電気学会研究会資料, CMN-09-3, pp.11–14, Jan. 2009.
- [16] 大鐘武雄, 小川恭孝, MIMO システム技術, オーム社, 東京, 2009.
- [17] 金岡泰弘, 山下育男, 櫻村 聡, 浅野欽也, 清水 聡, “MIMO を適用したマルチゾーン ROF システムによる干渉エリアの伝送特性改善,” 信学論 (C), vol.J91-C, no.1, pp.61–63, Jan. 2008.
- [18] 金岡泰弘, 山下育男, 櫻村 聡, 清水 聡, “ROF を利用したマルチセル MIMO の一検討,” 信学技報, OCS2009-85, Nov. 2009.
- [19] 金岡泰弘, 山下育男, 櫻村 聡, 清水 聡, “マイクロ波帯 ROF 装置による IEEE802.11n 無線 LAN の延長,” 信学技報, MWP2009-16, Jan. 2010.
- [20] 原田博司, 藤瀬雅行, “超高速無線アクセスシステムの研究開発—概要と基礎伝送実験結果,” 信学技報, RCS2003-78, Aug. 2003.
- [21] 新保努武, 笹井裕之, 田中和夫, 内海邦明, 森倉 晋, “Radio-on-Fiber 技術を用いた IEEE802.11a 信号の光伝送実験,” 信学技報, RCS2003-29, May 2003.
- [22] 櫻村 聡, 清水 聡, 金岡泰弘, “5 GHz 帯無線アクセスシステムによる ROF 伝送特性の検討,” 電気学会電子・情報・システム部門大会, GS6-1, pp.820–821, Sept. 2005.
- [23] 特定小電力無線局 950 MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備, 電波産業会, 標準規格 ARIB STD-T96 1.1 版, Sept. 2010.  
(平成 22 年 11 月 8 日受付, 23 年 1 月 21 日再受付)



清水 聡 (正員)

昭 62 京大・工・電子卒。同年沖電気工業(株)入社。平 7 千葉大大学院博士課程了。デジタル信号処理, 音響分析, 無線通信, ITS の研究開発に従事。平 7 海洋音響学会論文賞。博士(工学)。



金岡 泰弘 (正員)

昭 62 京大・工・電気卒。平元同大大学院・電子・修士課程了。同年関西電力(株)入社, 平 6 同社総合技術研究所入所。以来, 主として, 光通信, 無線通信の研究開発に従事。現在, 同社電力技術研究所研究員。



櫻村 聡 (正員)

平 6 芝浦工大・工卒。平 8 同大大学院修士課程了。沖電気工業(株)入社。無線端末, ソフトウェア無線, 光通信, ITS の研究開発に従事。



山下 育男 (正員)

昭 63 阪大・工・通信卒。平 2 同大大学院修士課程了。同年関西電力(株)入社, 平 8 同社総合技術研究所研究員。平 12 阪府大大学院・工・博士後期課程了。同年より関西電力電力技術研究所 IT サービス研究室シニアリサーチャー, 現在に至る。工博。光通信, 光増幅及び光測定の研究に従事。電気学会会員。