

## 4-3 光ファイバ無線技術 ～光・電波ネットワークのシームレスな融合に向けた波形伝送技術の研究開発～

### 4-3 Radio Over Fiber Technology

#### —Research and Development of Waveform Transport Technique for Seamless Convergence between Radio and Optical Networks—

菅野敦史 Pham Tien Dat 吉田悠来 山本直克 川西哲也

Atsushi KANNO, Pham TIEN DAT, Yuki YOSHIDA, Naokatsu YAMAMOTO, and Tetsuya KAWANISHI

将来の光・電波融合アクセスネットワークを実現する光伝送技術について概説する。光信号と電波（無線）信号をシームレスに相互変換することで、変換時に必要なメディア変換装置の省力化を実現し、処理遅延の最適化及び省消費電力化を志向するのみならず、信号処理機能の中央集約化や分離を効果的に支援することで、将来ネットワークの柔軟な構成を実現する技術である。本稿では、中央集約型次世代モバイルへの波形伝送技術の適用や、光ファイバ無線技術を活用したアクセス通信技術の高度化に加えて、高精度信号源の中央集約化による高精度レーダ応用についても概説する。

We introduce and discuss optical transport technology for the realization of future access networks based on the seamless convergence between radio and optical fiber networks. Seamless conversion between radio and optical signals helps excluding media conversion equipment at the signal conversion. This technology can realize a flexible configuration in the future systems by optimization of processing latency and energy dissipations in the network as well as by centralization and an effective split of signal processing resources. In the paper, we discuss waveform transport technique for future centralized access networks and high-precision radar application by centralization of a precise signal synthesizer.

## 1 まえがき

2019年にサービスインが予定されている第5世代モバイル通信技術(5G)では毎秒10ギガビットを超える大容量性や自動運転などにも適用可能な低遅延性など、現世代のモバイル通信を凌駕するユーザビリティ・アプリケーションを目指して今も開発が進んでいる。大容量化のためには、従来利用してきたマイクロ波帯から、高マイクロ波帯・ミリ波帯など高周波電波への移行が必須であり、結果として、モバイルアンテナカバレッジの狭窄化(小セル化)による周波数利用効率の向上が見込まれる[1][2]。モバイルネットワークのセル径は第2世代の35kmに対して、5Gでは20m(屋内ホットスポットの場合)程度まで狭窄化される可能性がある[3]。加えて、大容量データの信号処理のエネルギー効率化のためのベースバンド処理(BBU)中央集約(C-RAN)化と、その機能を効率的に

分離しエッジコンピューティングによる無線アクセスネットワークの低遅延化という、相反するネットワーク構造を効率的に構成する必要がある[4]-[6]。そのため、5G及び将来無線システムであるBeyond 5Gにおいては、無線アクセスシステムの高度化のみならず、バックエンドである光ネットワークそのものの高度化が必要不可欠である。一般的に、コア・メトロネットワークから中央BBUへのバックホール(BH)、中央部から分散処理・エッジ部へのミッドホール(MH)、エッジからアンテナサイト(RRH)までのフロントホール(FH)とバックエンドネットワークそのものの機能も分離されるが、スモールセル化に伴い、FH部の低遅延性とスループット向上が肝要となる。

本稿では、将来無線システムを支える波形伝送型光電波融合ネットワーク技術(図1)について概説する[7]。次世代通信のみならず精密計測技術やビッグサイエンス、レーダなどにも適用可能な基盤技術である。

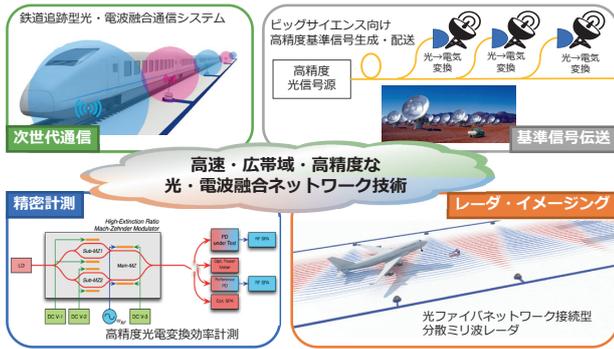


図1 光・電波融合ネットワークの適用範囲

まず、無線信号波形を光ファイバ信号に重畳する波形伝送を光ファイバ無線技術 (RoF) 技術の観点から将来無線システムへの適用についての議論の後、無線帯域信号を効率的に圧縮し帯域の限られた FH 伝送システムにおいて MIMO (Multi-Input-Multi-Output) 信号を効率的に配送するためのデジタル波形伝送技術について概説する。原理的な低遅延と帯域圧縮が見込めるアナログ波形伝送技術を用いたミリ波帯信号伝送技術とその応用について通信応用、非通信応用の事例紹介を行う。

## 2 光・電波融合アクセス通信技術

光・電波融合ネットワーク技術は前述のとおり波形伝送技術を基盤とするものである。波形伝送とは、電波・光など信号の伝送メディアを問わず、送信側から受信側まで信号の波形そのものを伝送する技術であり、それをネットワーク化することで、送受エンド・ツー・エンドで波形そのものを送り届けるものである。一般的な信号伝送では、光伝送時と電波伝送時でその利用可能な帯域幅が異なるため、フォーマット変換が行われる。例えば、毎秒1ギガビットを伝送する光ギガビット・イーサネット等では光のオンオフによりデジタル伝送を行うが、マイクロ波帯無線 LAN 等においては同じ1ギガビット伝送においてもその帯域幅が制限されているため 256 値直交振幅変調 (QAM) などの多値変復調技術を利用する必要がある。このフォーマット変換では一般的にデジタル信号処理が用いられ、その信号処理遅延により伝送遅延が発生するのに加え、信号処理に伴う消費電力の増加も見込まれる。波形伝送では、例えば、電波伝送のフォーマットそのものを光信号に重畳して伝送するなどすることで、そのフォーマット変換を省力化するものである。そのため信号遅延量を小さくすることが可能となり、結果、低遅延なネットワークの実現が可能である。

以下、将来無線アクセスシステムへ適用可能なデジ

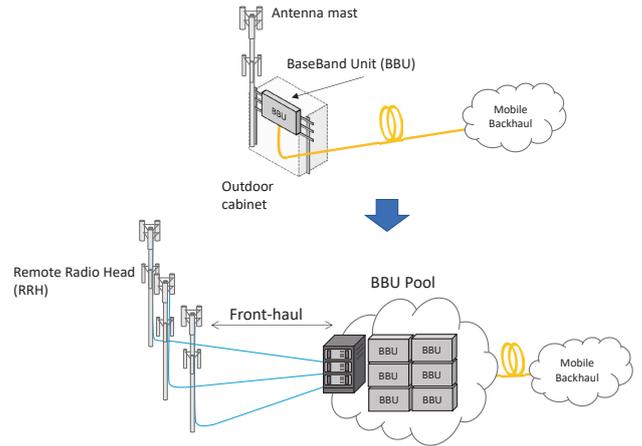


図2 C-RAN アーキテクチャの概念図

タル・アナログ波形伝送技術について議論する。

### 2.1 MIMO 無線信号波形の低遅延圧縮・符号化・伝送技術

5 G 等の将来モバイルにおいて BH、MH、FH の重要性が増しており、特にエッジにおける利用効率の格段の向上が急務である。そこで、ネットワークインフラの許容量を超えるような過大な無線信号入力 of BH / FH への収容を可能とするための過負荷信号処理技術について議論する。

小セル環境を経済的に実現する無線アクセス網アーキテクチャとして注目されているのが C-RAN (図 2) である。RRH-BBU 間の FH リンクを延伸化することで敷設・メンテナンスコストの大きい BBU を集約的に実装することが可能となり、セルサイトのコストを大きく低減することができる [4][5]。加えて、集中管理による高度なセル間協調、あるいは BBU 計算機資源の有効活用なども期待できる [6]。この C-RAN において課題となるのが、FH の帯域と遅延である。簡素化及び低遅延化のため RRH は BBU ヘデジタル化した無線信号波形を非圧縮 (例えば CPRI 規格にて) で伝送する手法が従来から利用されてきた [8]。このとき、FH 帯域は、

$$FH \text{ 帯域} \cong \text{サンプリングレート} \times \text{量子化ビット数}^2 (\text{同相} \cdot \text{実相成分}) \quad (1)$$

で与えられるが、5 G では帯域幅 100 MHz、 $32 \times 32$  MIMO、量子化ビット数 16 が想定され、その場合 FH 要求帯域が 100 Gb/s 超となってしまう [9]。

そこで、近年、FH 帯域要求の緩和のため、様々な無線波形の圧縮・符号化・伝送技術が検討されてきた [10]-[14]。FH における圧縮・符号化技術においては、量子化ビット数 16 ビット程度の高精度とともに、再送制御など無線通信規格の遅延要求により、処理時間 100  $\mu$ s 以下での圧縮が求められる [15]。この技術課題

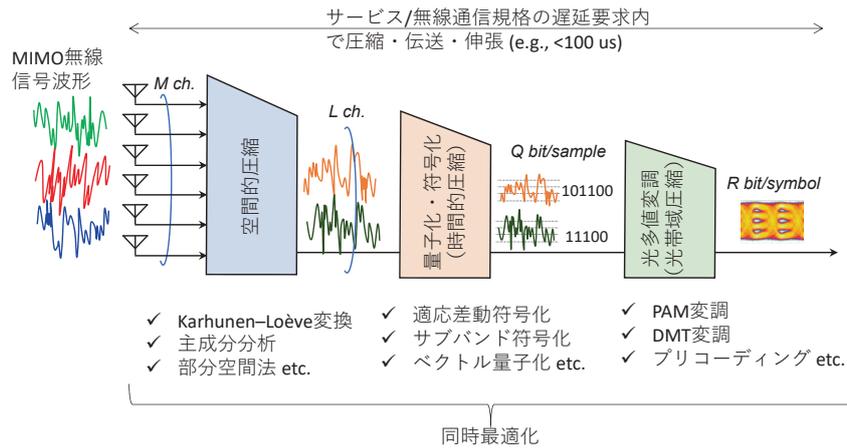


図3 提案するMIMO無線信号のための低遅延時空間圧縮・符号化・伝送技術の概念図

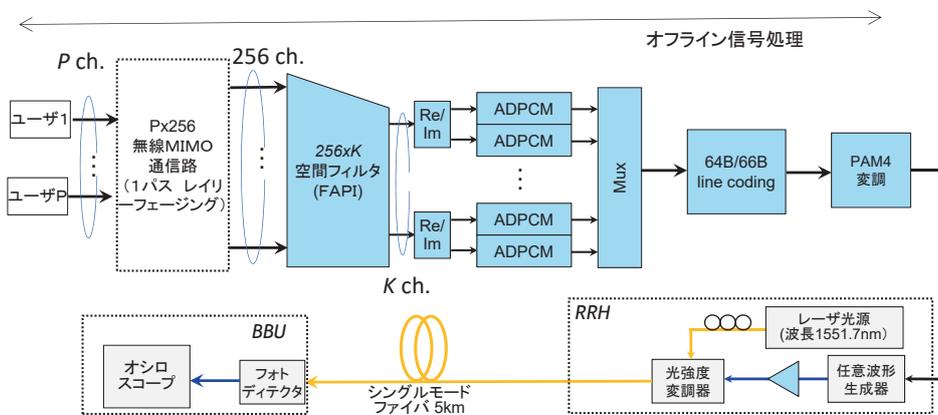


図4 256チャンネル大規模MIMOシステムのFH実証実験系

がサンプリングレートの差(オーディオでは44 kHz、モバイルでは30 MHz程度)こそあれ、音声信号処理分野における符号化と本質的に同じであることが改めて指摘され、例えばワイヤレスヘッドフォンにおける低遅延符号化技術を応用可能であることが示された[16]。また、一方で、5Gにおける大規模(Massive)MIMOなどに対応するため、新たに、空間領域(アンテナ間)の無線波形圧縮技術が提案され、またFH伝送における光変調方式との同時最適化のメリットが明らかになってきた[17]。

図3は、提案するMIMO無線信号のための低遅延時空間圧縮・符号化・伝送技術の概念図(上り回線の場合)である。受信された多チャンネルの無線波形は、画像通信分野などで用いられる部分空間追従法などの信号処理技術により、空間的冗長性が除去されたのち、適応的符号化器により量子化・符号化される。また、更なるFH帯域の狭窄化のため、PAM4などの多値光変調技術を用いる。特に、これらの空間的、時間的、光帯域的圧縮を再構成後のMIMO無線信号品質の下、同時最適化することでFH帯域要求の大幅な緩和を実現可能である。

その原理実証のため、時空間符号及びFH帯域の同時最適化についての実験的検証を行った[17]。図4はその実験系である。 $P \times 256$  massive MIMOシステム( $P = 12, \dots, 100$ )のFHを想定し、無線生成(20 MHz幅OFDM信号)、無線伝搬(1パスレイリーフェージング)、時空間圧縮・符号化、ラインコーディング(64 B/66 B)及びPAM4変調は、オフライン信号処理により行い、FH区間は、5 km シングルモードファイバ(SMF)とした。光PAM4生成にはマッハツェンダ干渉計光強度変調器(MZM)を用い、変調速度は25 ~ 10 GBaudとした。30 GHz帯域幅の光検出器(PD)で受信後、時空間伸張・復号及び無線OFDM信号復調はオフライン信号処理にて行った。

無線信号の圧縮・符号化について、空間的圧縮には、射影近似を用いた高速の部分空間追従法として知られるFAPI法を応用した[18]。FAPIによる空間フィルタの更新及び空間フィルタリングの要求演算量はそれぞれ $O(MK)$ 、ここで $M$ はアンテナ数、 $K$ は圧縮後の空間次数であり、無線信号の復調と比較しても十分に小さい。一方、時間領域の圧縮・符号化は、G.726などで採用されている、適応差動パルス符号化

#### 4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

(ADPCM) 技術を拡張したものを採用した [19]。従来の時間領域圧縮・符号化技術では、OFDM 変調に最適化した(固定的な)非線形量子化手法などが検討されてきたが、適応的量子化手法の採用により、多様な

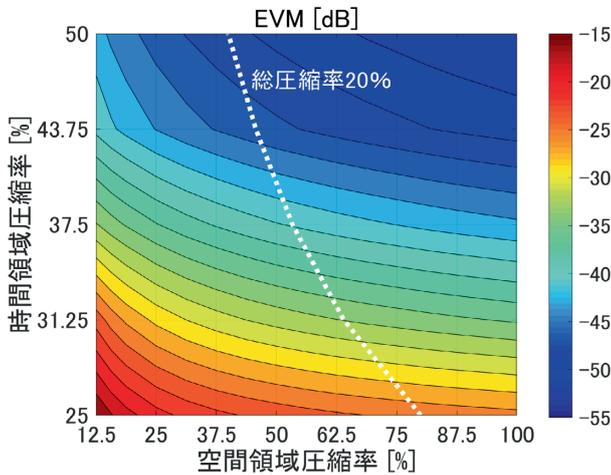


図5 時空間の圧縮率対 EVM 特性 ( $P=32$ )

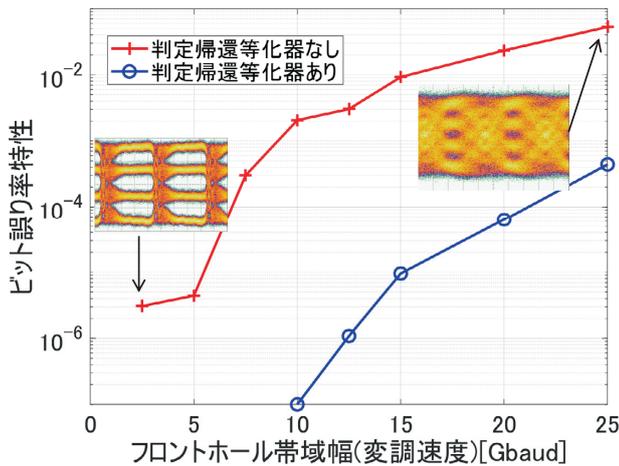


図6 光 PAM4 伝送の変調速度対 BER 特性

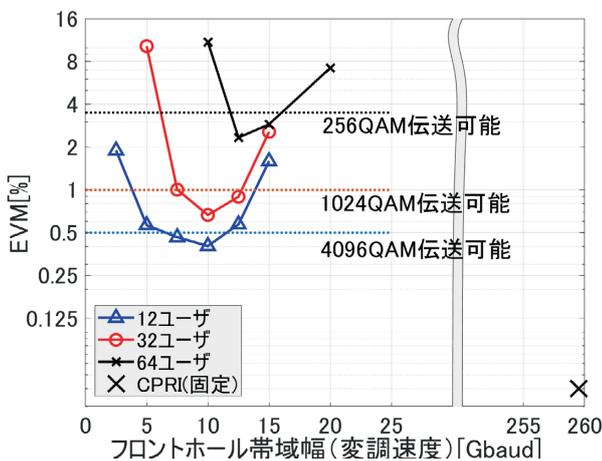


図7 FH 帯域幅対再構成後の無線信号の EVM 特性

変調方式の信号波形や空間領域での圧縮に起因する信号波形の分布の変化を容易に取り扱うことができる [12][13]。

図5は  $32 \times 256$  MIMO の場合の、時間的、空間的圧縮に対する復調後の無線信号の EVM 特性である。ここで FH 伝送の影響は考慮していない。図より、一定の圧縮率 (CR) の下で、最適な EVM 特性を与える時間・空間的圧縮率の組があることがわかる。なお、ここで CR は従来の CPRI 規格 [8] に対する圧縮率として定義しており、図3の空間的、時間的、また光帯域の圧縮を行う FH の圧縮率は、

$$CR \approx \frac{K}{M} \cdot \frac{\sum_{i=1}^K (B_i + 1)}{K(B_{CPRI} + 1)} \cdot \frac{66}{64R} \quad (2)$$

*Spatial CR*      *Time-domain CR*      *Optical-domain CR*

で与えられる。ここで、 $K (>P)$  は空間的圧縮後の空間次数であり、 $B_i$  は空間フィルタの  $i$  番目 ( $i = 1, \dots, K$ ) の出力に対応する ADPCM の量子化ビット数であり、 $B_{CPRI} = 15$  [bit] (+1の項は符号に由来する)。また  $R$  は光変調多値数である。

一方、図6は判定帰還型等化器を用いた場合の光 PAM4 信号の変調速度対ビット誤り率 (BER) 特性である。変調速度を低減すると、光伝送における BER 特性が改善する一方で、FH 帯域が制限されるため無線信号をより圧縮する必要が生じ、結果、非可逆圧縮に由来する無線信号の品質劣化を引き起こす。逆に、変調速度を向上した場合、圧縮による信号劣化は低減するものの、FH 伝送における BER が増大し、無線信号の EVM 特性の劣化につながる (低遅延化のため、ここでは誤り訂正技術の使用を想定していない)。図7は、FH の光帯域幅 (変調速度) に対する、再構成後の無線信号の EVM 特性である。ここで、時空間の圧縮率は、図5に従い、FH 帯域に応じてそれぞれ最適化している。図7より、時空圧縮・符号化及び FH 伝送の変調速度を同時最適化することで、例えば、 $32 \times 256$  MIMO の場合、従来の CPRI 規格では 260 Gbaud 相当 (OOK 変調) の FH 帯域が必要だったところを、25分の1程度 ( $CR \approx 4$  [%]) の、10 Gbaud 光インターフェースで FH 伝送可能であることがわかる。このとき非可逆圧縮による無線信号品質の劣化は EVM にして 0.7 % 以下であり、1024 QAM などの多値変調も利用可能な品質が保たれている。

#### 2.2 無線波形カプセル化によるアナログ波形伝送システム

アナログ的な波形伝送は同軸ケーブルによる RF 伝送など古くから利用されているが、同様の波形伝送は光領域でも実現可能である。伝送させたい信号波形を

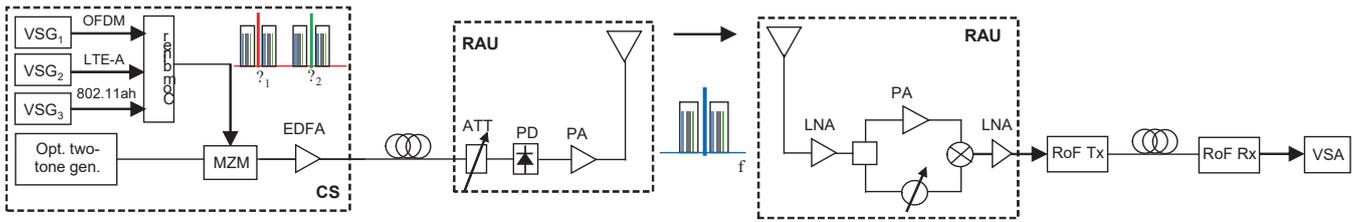


図8 ファイバ・ミリ波ブリッジリンクにおける大容量信号伝送の原理検証実験系

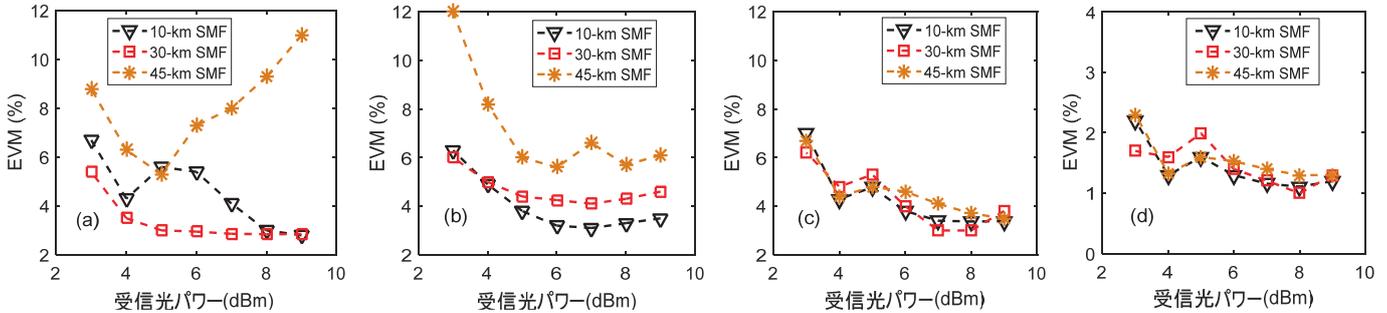


図9 EVM計測結果: (a) 50 MHz 幅 OFDM、(b) 10 MHz 幅 IEEE802.11 ah 信号、(c) 1.4 MHz 幅 LTE-Advanced 信号、(d) 20 MHz 幅 LTE-Advanced 信号

光信号に重畳させるアナログ RoF システムは、その原理的な低遅延性及び構成の単純性によりシンプルな FH リンクが構成可能であり、低コスト化が必要な小セルネットワークへ適用も可能である。しかし、前述のとおり超高密度小セルが想定される大都市部においては地形及びコストの観点から光ファイバを敷設することができない場所もある。このような場合、ミリ波帯電波を利用して光ファイバの代わりとなる大容量無線リンクが必要となる。光ファイバネットワークとシームレスかつ低遅延な接続が可能な光・電波融合システム・アナログ波形伝送技術が有用である [20]。加えて高周波帯ミリ波電波はモバイル等のマイクロ波帯信号に比して広大な周波数帯域幅を持つため、従来のモバイル、IoT (例えば IEEE802.11 ah) などの複数の無線サービスを一括してミリ波信号へ重畳・カプセル化し、それをアナログ RoF システム上で光ネットワーク伝送することも可能である [21]。

図8に、従来モバイル、IoT 無線、将来モバイルの3種の無線信号を光ファイバ・ミリ波ブリッジリンクを介して伝送するための実験構成を示す。光伝送・ミリ波無線伝送・光伝送という伝送形態となるため、ファイバ・ミリ波ブリッジリンクと称する。高精度光変調技術を用いて、入力信号周波数の4通倍周波数を発生させる光・ミリ波信号を生成する [22]。本原理検証試験では、92 GHz の周波数分離を有する光・ミリ波信号を生成させた。伝送させる無線信号として、将来モバイルを模擬する 50 MHz 帯域幅 OFDM 信号 (中心周波数 3 GHz)、周波数 2.6 GHz の LTE-Advanced 準拠信号及び 920 MHz IEEE802.11 ah 準拠信号を用い

た。これら無線信号はベクトル信号発生器 (VSG) により生成され、合成後、MZM にて光変調を行った。エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) によって増幅後 SMF 伝送し、リモートアンテナ装置 (RAU) に配置された光受信器 (PD) にて 92 GHz の無線信号に直接変換される。無線信号はパワー増幅器 (PA) によって信号レベル調整され、23 dBi 標準ホーンアンテナによって自由空間に放射される。約 1 m 空間伝送後、同型のホーンアンテナによって受信され、低雑音増幅 (LNA) と自己ホモダイン検波 (SHD) 受信機を使用して元の無線サービス周波数帯であるマイクロ波帯域にダウンコンバートされる [21]。マイクロ波無線信号は、それぞれ LNA によって増幅され、RoF 送信モジュール (RoF Tx) に入力され、5 km の SMF 伝送後、RoF 受信機モジュール (RoF Rx) によって電気信号に変換されベクトル信号解析装置 (VSA) によってオフライン解析を行った。

図9にファイバ・ミリ波ブリッジ伝送後の受信 EVM を示す。すべての信号が満足のいくパフォーマンスで正常に伝送されたが、OFDM 及び IEEE802.11 ah 信号ではファイバ色分散の影響から長距離伝送時に劣化することが見てとれる。ファイバ色分散の影響は単側波帯 (SSB) 変調を用いることで解消が可能である [21]。

### 2.3 中間周波数帯域を有効活用した IF over Fiber システム

一般的にミリ波帯 RoF 伝送は光ヘテロダインによる周波数変換方式であるため、所望周波数だけ離調し

## 4 アクセネットワークの大容量化を目指す研究開発

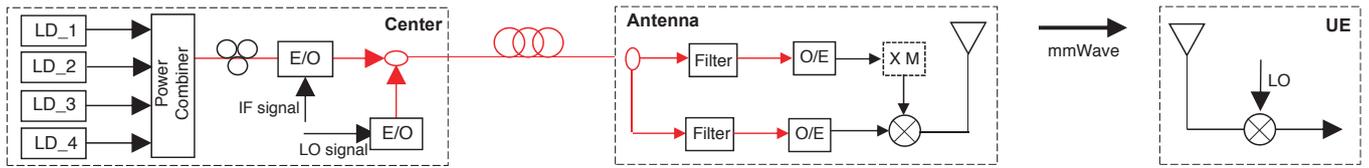


図 10 光 LO 信号配送を利用する WDM IFoF システムにおけるミリ波信号伝送実験システム図

た光信号を生成する必要がある。つまり、92 GHz 帯信号発生には 92 GHz 離調した 2 つの光信号が必要であり、実効的に光領域における周波数利用効率率は低下する。そのため、直接的な RF 信号周波数帯ではなく、中間周波数帯 (IF) 信号を用いる RoF (以下、IFoF) システムが、単純でコスト効率のよい手法となり得る。加えて、波長分割多重 (WDM) 方式を用い、アンテナサイトごとに波長チャネルを割り振ることで、適切な信号を効率よく配送することが可能になる。WDM 波長の 1 つを局部発振器 (LO) 信号配送に用いることで、中央集約生成した光 LO 信号をリモートアンテナサイトへ配送することも可能になり、アンテナサイトの低コスト化のみならず中央制御による周波数の適時変更も可能となる [23]。

図 10 に WDM IFoF システムによる 96 GHz 帯高速無線伝送原理検証システムを示す。本実験では、4 波長信号を光 IQ 光変調器にて光 SSB 変調を行い生成する。変調する IF 信号として中心周波数 6 GHz、帯域幅 5 GHz の OFDM 信号を用いた。光 LO 信号として上述の光 4 通倍手法により 90 GHz 光・ミリ波信号を用いた。光 SSB-IF 信号と光 LO 信号は光カプラにて合波後、EDFA によって増幅され、20 km の SMF を介してアンテナサイトに配送される。アンテナサイトでは、光カプラ及び光バンドパスフィルタ (OBPF) を用いて光 LO 及び光 SSB-IF 信号を分離し、PD で変換された IF 信号と 90 GHz LO 信号が混合され 96 GHz 帯の無線信号が生成される。ミリ波信号は PA によって増幅された後ホーンアンテナによって空間放射される。約 1 m 伝送、アンテナ受信後にヘテロダイン検波により IF 帯域にダウンコンバートされる。IF 信号増幅後にリアルタイムオシロスコープにてデジタル変換されオフライン信号処理の後復調処理を行った。

図 11 (a) に PD 入力前の光信号スペクトルを、図 11 (b) に異なる光チャネル及びミリ波リンクを介して伝送された後の 20 Gb/s ミリ波信号の復調 EVM を示す。波長チャネルの選択は PD に前置した OBPF により行った。ミリ波送信電力 -26 dBm 以上で 16 QAM 信号に対して十分な復調品質が得られることがわかる。受信アンテナの出力感度約 -50 dBm に相当するものであり、IFoF システムにおいても光・電波融合型波

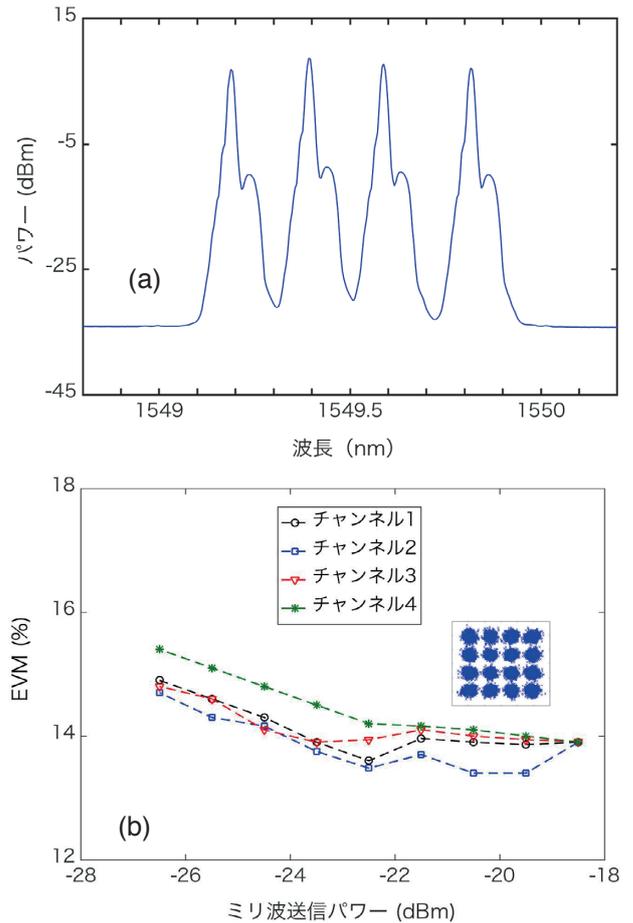


図 11 WDM IFoF システム検証結果：(a) WDM IFoF 信号の光スペクトル、(b) 計測された EVM

形伝送が可能であることが示された。

### 2.4 高速波長切替型光ファイバ無線ネットワークの原理検証

5 G モバイル含む将来モバイルネットワークにおける困難なユースケースの 1 つとして高速鉄道への大容量通信が挙げられる。時速 300 km を超える速度で移動するユーザに対して高いスループットを有するサービスを提供するためには、高速移動時にも途切れない無線接続が必要である。シームレスな光・電波融合システムに適応的な信号配送手法を組み合わせた高速鉄道向けネットワークが提案されている [23][24]。図 12 に提案システムの基本概念を示す。本システムでは (1) 無線サービスセルを線形配置させたリニアセル構成、

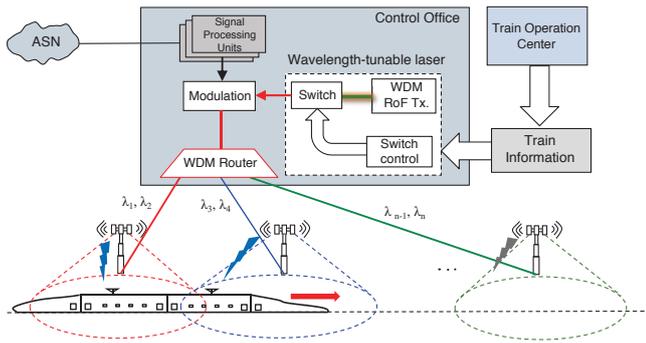


図 12 WDM IFoF ネットワークによる通信途絶のない高速移動用バックホールネットワークの概念図

(2) ハードハンドオーバを低減させるための複数セル同時信号配信、(3) 列車位置情報を利用した予測・追跡型ネットワーク切替技術である [23]。ユーザは列車内に配置した無線基地局 (BS) に高速無線 LAN などで接続し、車上 BS と線路側に設置された RAU は、大容量ミリ波帯電波による無線システムで接続され、多数設置される RAU へは WDM 型光・電波融合システムにて接続・制御される。つまり、この鉄道向け高速無線システムは BH として機能する。RAU へは各波長チャンネルが割り当てられ、中央局から配信される RoF (もしくは IFoF) 信号は列車の位置に応じて中央制御側で適切な波長にセットされる。WDM ネットワークを介して光スイッチもしくは高速波長可変光源により車上 BS に近い RAU へ信号が配送される [24][25]。波長スイッチが遅いと車上 BS へのスループットが低下することから、超高速な波長スイッチ (例えば  $10 \mu\text{s}$  程度以下) を実現できる超高速波長可変レーザが候補の 1 つとなる。つまり、鉄道司令所から得られる列車位置情報を用いてレーザ波長を制御し、中央制御局から列車が存在する無線セルに信号を適時配信・追跡することで、見かけ上基地局切替え (ハンドオーバ) のない接続が可能となる。大容量接続にはミリ波等の高周波電波を用いることが肝要であるが、上述の WDM IFoF システムを援用することで所望のネットワークが構成できる。光 LO 信号も同じ WDM ファイバネットワーク上を伝送することで、ファイバを介して多くの無線セルに送信することができ、ミリ波帯単一周波数ネットワークが容易に実現できる。また、リニアセル構成によりアンテナ利得及びセルサイズの最適化設計も容易となり、結果、エネルギー効率の最適化も見込める [26]。

図 13 に実験室内における原理検証実験のシステム図を示す。IF 帯光信号は WDM ファイバネットワーク上を伝送し、RAU にてミリ波帯変換され、車上 BS に無線接続される。各 RAU が張る無線セルを WDM

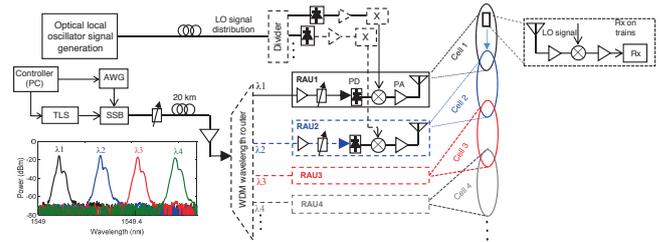


図 13 波長切替型 WDM IFoF によるミリ波信号伝送システムの原理検証試験ブロック図

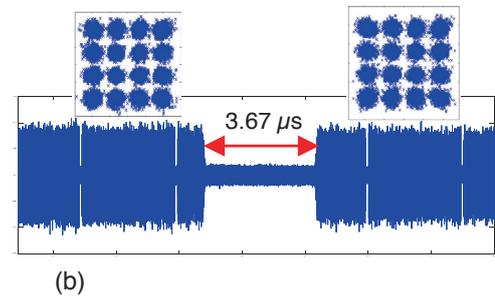
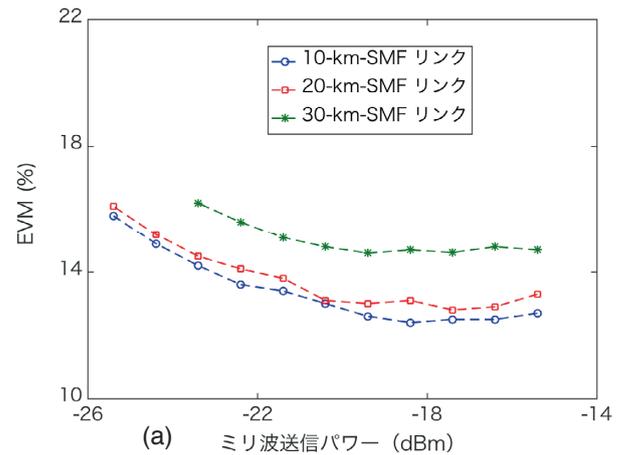


図 14 (a) 得られた受信 EVM 値と (b) 波長切替による無線セル切替の様子

ネットワーク上で切り替えるため、超高速波長可変レーザ (TLS) を用いる。TLS からの光信号は、IQ 光変調器により中心周波数 7 GHz の OFDM 信号 (帯域幅 6 GHz、サブキャリア数 512) で光 SSB 変調される。20 km の SMF 伝送後に、EDFA により増幅後 WDM 波長ルータに入力される。WDM ルータから出力される光信号はそれぞれ波長に対応する RAU に接続され、RAU 内で IF・ミリ波変換が行われ 95 GHz 帯ミリ波信号が生成される。ミリ波変換には上述の光 LO 配信とヘテロダイン方式が採用されている。原理確認試験のため、ホーンアンテナから放射されたミリ波電波信号は 2 m 空間を伝送し、アンテナ受信後にヘテロダイン検波方式にてオシロスコープで検出し、その後オフラインデジタル信号処理にて復調・解析を行った。伝送試験結果を図 14 (a) に示す。ミリ波帯接続容量と

## 4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発

して 20 Gb/s 以上の伝送が可能であることが示された [27]。また、ハンドオーバー時間の検証のため、波長切替え時の通信途絶時間も確認したところ、10  $\mu$ s 以下でセル間切替えが可能であることが示された (図 14 (b)) [23]。本提案スキームを用いることで、高速列車への大容量かつ通信途絶の少ない無線通信を光ネットワークから制御できることが示されたと言える。また、車上 BS から路線側への無線接続についても検証を行っており、波長 100 チャンネルの WDM ネットワークを介して 10 Gb/s 以上の信号伝送が実現可能であることも示されている [28]。

### 3 光ファイバ無線技術による分散型ミリ波レーダの実現

光・電波融合システム、特に RoF 技術の将来モバイル・高周波通信向け適用について議論してきたが、光 LO 信号配送にも代表されるように光クロック・基準信号配送にも応用が可能である。例えば、電波天文における受信アンテナ群のクロック同期が挙げられる [29]。中央制御局に設置された高精度基準信号源から光ファイバネットワークを介して遠隔設置してある装置へ配送する手法がすでに実用されている。分散アンテナシステムと呼ばれるこのアーキテクチャでは、信号の高精度な同期だけでなく、高精度信号源の設置数

削減にも応用可能である。その応用の 1 つとして、空港滑走路面異物検知システムを紹介する。

滑走路路上に落下した異物を天候・昼夜にかかわらず迅速に検出することが、空港管制上の安全に直接的に寄与することは想像に難くない。特に基幹・ハブ空港など時間あたりの離着回数が 40 回を超える混雑空港においては、異物検知を数分以内で終える必要がある。しかしながら、広大な滑走路 (長さ 3,000 m 以上、幅 60 m) 上で数 cm の異物を数分以内でスキャンすることは非常にチャレンジングである。一般的に、数 cm 程度の異物、特に金属異物は、1/10 程度の波長の電波レーダで検出が可能である。無線標定として割り当てられる 92-100 GHz 帯 (波長およそ 3 mm) の 8 GHz 帯域幅ミリ波電波をレーダとして利用することで、数 cm 程度のレーダ距離精度で小異物を検出できる可能性がある [30]。しかしながら、そのような高精度なレーダを実現するためには、高精度なレーダ信号源が必要であり、高コスト・大設置面積に加えて、ミリ波本来の自由空間伝搬損失の大きさから、滑走路全体をカバーするには 10 台程度のレーダを設置する必要がある。そこで、光・電波融合技術を用いて信号源を中央集約化し、高精度なレーダ信号を、光ファイバネットワークを介して複数のレーダ装置へ配信することで、レーダとしての機能劣化なしに総コストの削減が可能である [23]。図 15 にその概略図を示す。中央制御装置に設置された高精度レーダ信号源から RoF 技術によりミリ波信号を光ファイバ信号に重畳させる。光ファイバネットワークを介して滑走路脇に設置されたレーダ装置へレーダ信号そのものを配送し、ミリ波変換の後にレーダ信号として放射する。ターゲット (異物) で反射された信号はレーダ装置で混合されアナログ・デジタル変換の後に光ファイバネットワークを介して中央信号処理装置へ集約され、レーダ複数台の信号処理結果を表示する。高価かつ消費電力の大きい信号発生・信号処理を中央集約化することでエネルギー効率を最適化する手法は上述の C-RAN と同じである。図 16 に得られるレーダ PPI 画像例を示す [31]。滑走路脇に設置された滑走路灯なども明瞭に検出することができていることが見て取れる。

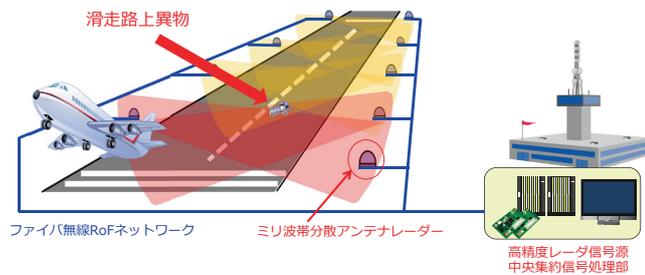


図 15 光・電波融合型リニアセルによる空港滑走路面異物検知システムの概略図

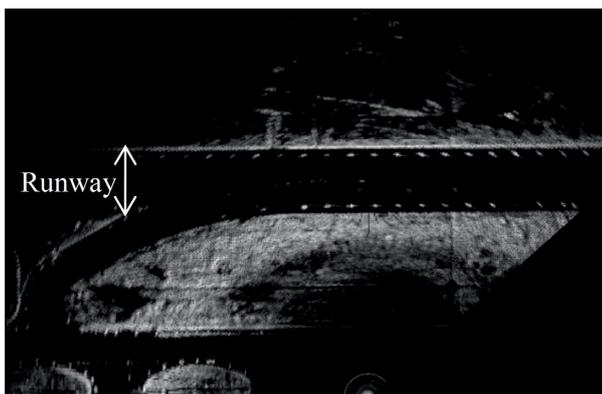


図 16 1 つのレーダより得られる滑走路 PPI 画像の例 [31]

### 4 おわりに

将来モバイル・レーダシステムへ向けた波形伝送技

術及び光・電波融合システムについて概説した。ユーザが使う通信手段が無線アクセスへと収れんする中、その無線アクセスシステムを支えるための光アクセス技術は、ユーザの目に直接触れにくいインフラ設備化が加速すると考えられる。しかしながら、光アクセスシステムの高度化により無線アクセスシステムが実現されていることも紛れもない事実である。有線・無線の伝送メディアを意識しないで利用可能な融合型アクセスシステムの実現に向け、光と電波を更に高度に融合した通信システムの研究開発を加速させていく予定である。

## 謝辞

本研究は、総務省「電波資源拡大のための研究開発」の一部として実施された。本研究成果の一部は、光産業創成大学院大学 北山教授、朱助教との共同研究により実施された。空港滑走路面異物検知レーダシステムの共同実験に際し、日立国際電気株式会社 佐藤洋介博士、柴垣信彦氏、加島謙一氏、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所 米本成人博士及び成田国際空港株式会社の関係者皆様に感謝する。

## 【参考文献】

- 1 V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," IEEE Commun. Mag., vol.46, no.9, pp.59–67, Sept. 2008.
- 2 J. G. Andrews et al., "What will 5G be?" IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.32, no.6, pp.1065–1082, June 2014.
- 3 3GPP TR38.913: "Study on scenarios and requirements for next generation access technologies," July 2018.
- 4 "C-RAN: The Road towards Green RAN," China Mobile White Paper, v2, 2011.
- 5 Y. Yoshida, "Mobile xHaul evolution: Enabling tools for a flexible 5G xHaul network (tutorial)," in proc. OFC2018, paper Tu2K.1, 2018.
- 6 A. Checko et al., "Cloud RAN for mobile networks—A technology overview," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol.17, no.1, pp.405–426, Sept. 2014.
- 7 T. Kawanishi et al., "Wired and Wireless Links to Bridge Networks: Seamlessly Connecting Radio and Optical Technologies for 5G Networks," IEEE Microw. Mag., vol.19, no.3, pp.102–111 (2018).
- 8 CPRI Specification v7.0, Technical Report, 2015.
- 9 3GPP TR 38.816 V1.0.0: "Study on CU-DU lower layer split for NR," Dec. 2017.
- 10 S. Park et al., "Fronthaul compression for cloud radio access networks: Signal processing advances inspired by network information theory," IEEE Signal Process. Mag., vol.31, no.6, pp.69–79, Nov. 2014.
- 11 ETSI standard, GS Open Radio Interface (ORI) 002-1 V4.1.1, Oct. 2014.
- 12 M. Xu et al., "Key technologies for next-generation digital RoF mobile fronthaul with statistical data compression and multiband modulation," J. Lightw. Technol., vol.35, no.17, pp.3671–3679, Sept. 2017.
- 13 S. H. Kim et al., "Experimental demonstration of CPRI data compression based on partial bit sampling for mobile front-haul link in C-RAN," in proc. OFC 2016, paper W1H.5, March 2016.
- 14 L. Zhang et al., "Digital mobile fronthaul employing differential pulse code modulation with suppressed quantization noise," Opt. Express vol.25, no.25, p. 31936, Dec. 2017.
- 15 eCPRI Specification v1.2, Technical Report, June 2018.
- 16 P. Zhu et al., "MIMO fronthaul compression inspired by parametric stereo audio coding," 信学技報, vol.117, no.422, CS2017-83, pp.25–30, 2018年1月.
- 17 P. Zhu et al., "256-antenna massive MIMO fronthaul uplink with 10GBd PAM4 optical interface enabled by adaptive space-time compression," in proc. the 44th European Conference on Optical Communication (ECOC), paper Tu3B.6, Sept. 2018.
- 18 R. Badeau et al., "Fast approximated power iteration subspace tracking," IEEE Trans. Signal Proc., vol.53, no.8, pp.2931–2941, Aug. 2005.
- 19 ITU-T Recommendation G.726, 1990.
- 20 P. T. Dat et al., "Radio-on-radio-over-fiber: efficient fronthauling for small cells and moving cells," IEEE Wireless Communications, vol.22, no.5, pp.67–75, Oct. 2015.
- 21 P. T. Dat et al., "Full-Duplex Transmission of LTE-A Carrier Aggregation Signal over a Bidirectional Seamless Fiber-Millimeter-Wave System," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol.34, no.2, pp.691–700, Jan. 2016.
- 22 T. Kawanishi et al., "High-speed control of lightwave amplitude, phase, and frequency by use of electrooptic effect," IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol.13, no.1, pp.79–91, Jan./Feb. 2007.
- 23 A. Kanno et al., "Millimeter-Wave Radio-Over-Fiber Network for Linear Cell Systems," Journal of Lightwave Technology, vol.36, no.2, pp.533–540, Jan. 2018.
- 24 P. T. Dat et al., "Radio-over-Fiber-based Seamless Fiber-Wireless Convergence for Small Cell and Linear Cell Networks," Proc. OFC 2018, M4J.5.
- 25 P. T. Dat et al., "Simultaneous transmission of multi-RATs and mobile fronthaul in the MMW bands over an IFoF system," proc. OFC 2017, W1 C. 4.
- 26 P. T. Dat et al., "Energy and deployment efficiency of a millimeter-wave Radio-on-Radio-over-fiber system for railways," OFC 2013, JTh2A.61.
- 27 P. T. Dat et al., "High-Speed and Handover-Free Communications for High-Speed Trains Using Switched WDM Fiber-Wireless System," Proc. OFC 2018, Th4D.2.
- 28 P. T. Dat et al., "Cell-less Network for Handover-Free Communications to High-Speed Trains Using a Switched WDM Fiber-Wireless Backhaul," to be presented at ECOC 2018.
- 29 川西哲也, 木内等, "光で電波を見る," NICT News, no.430, pp.3–4 (2013)
- 30 N. Shibagaki, "Experimental Study of Photonic Based Radar for FOD Detection Systems Using 90 GHz-Band," Air Traffic Manag. System, vol.420, pp.239–248 (2017).
- 31 Y. Sato et al., "90GHz-band FOD detection Radar System for Runway Surveillance," ENRI International Workshop on ATM/CNS, Tokyo, Japan, EN-I-80, Nov. 2017.



**菅野 敦史** (かのの あつし)

ネットワークシステム研究所  
ネットワーク基盤研究室  
主任研究員  
博士(理学)  
光ファイバ無線、高速光変調



**Pham Tien Dat** (ふぁん ていえん だつ)

ネットワークシステム研究所  
ネットワーク基盤研究室  
研究員  
Ph.D.  
光ファイバ無線、光無線通信

## 4 アクセスネットワークの大容量化を目指す研究開発



**吉田悠来** (よしだ ゆうき)

ネットワークシステム研究所  
ネットワーク基盤研究室  
主任研究員  
博士(情報学)  
デジタル信号処理、通信方式、光ファイバ  
通信、無線通信



**山本直克** (やまもと なおかつ)

ネットワークシステム研究所  
ネットワーク基盤研究  
室長  
博士(工学)  
機能材料、光電子融合デバイス、伝送サブシ  
ステム



**川西哲也** (かわにし てつや)

ネットワークシステム研究所  
研究統括/  
早稲田大学理工学術院  
教授  
博士(工学)  
高精度光変調、ミリ波レーダ