

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名: Beyond 5Gに向けたモバイル収容大容量光アクセスインフラの研究開発
- ◆副題: Radio-over-Fiber型伝送技術をベースとするBeyond 5Gモバイルフロントホールの研究開発
- ◆実施機関: 株式会社KDDI総合研究所、三菱電機株式会社、国立大学法人東北大学
- ◆研究開発期間: 平成30年度から令和3年度(4年間)
- ◆研究開発予算: 総額300百万円(令和元年度100百万円)

## 2. 研究開発の目標

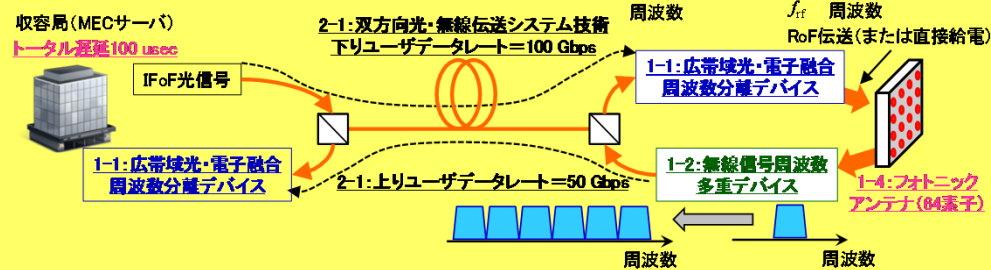
RoF・IFoFハイブリッドモバイルフロントホールとして、上り100 Gbps・下り50 Gbpsの伝送容量を実現し、また64素子のフォトニックアンテナアレイで100  $\mu$  sec以下のビーム切り替え時間を実現する。フルコヒーレントモバイルフロントホールとして、現状レベルのデバイスでフルコヒーレント伝送の実証実験を行い、フィージビリティを確認すると共に、商用化を想定した時の現実的な実現時期を見極める。

## 3. 研究開発の成果

### ①RoF・IFoFハイブリッドモバイルフロントホール技術

大容量(100/50 Gbps)かつ低遅延(100  $\mu$ sec)のモバイル収容光アクセス伝送システム

【研究開発項目1・2: RoF・IFoFハイブリッドMFH】

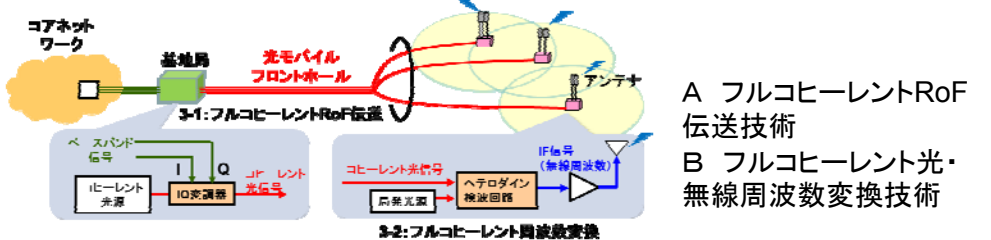


研究開発項目1 光・無線融合デバイス・サブシステム  
研究開発項目2 RoF・IFoF伝送システム

- 研究開発成果1-1 100Gbps級広帯域光・電子融合周波数分離デバイス技術**  
28Gspss広帯域A/D変換から出力される膨大なデータをデジタル領域で処理するのが課題。  
● ハーフバンドフィルタを適用したデジタルダウンコンバージョン回路を設計し、4ユーザに帯域分割する機能を大規模FPGA1石に実装した。
- 研究開発成果1-2 上り無線信号の高密度多重処理技術**  
デジタルとアナログ信号処理を用いた複数上り信号の周波数多重のシンプル化が課題。  
● 800MHz帯域幅のIF信号10Chを多重可能な機器を開発(処理遅延10  $\mu$  sec以下)。
- 研究開発成果1-3 無線・光信号変換デバイス技術**  
高速ワイヤレス信号を収容するために必要な周波数帯域の確保が課題。  
● 電気・光変換部の周波数帯域として28GHz以上の通過帯域を確認した。
- 研究開発成果1-4 光・無線融合アンテナ技術**  
各種周波数帯対応の小型光・無線融合アンテナと高速ビームフォーミング(BF)制御が課題。  
● 来年度試作予定のアンテナ仕様を整理、各種BF方式のメリット/デメリット整理。

- 研究開発成果2-1 双方向光・無線伝送システム技術**  
大容量化とシステム構成のシンプル化(低コスト化)の両立が課題  
● LAN-WDM用Txによる大容量IFoF伝送実証、LO/IF信号重畳伝送の実現性を確認
- 研究開発成果2-2 適応的空間電波周波数割り当て技術**  
光・無線システムの独立に運用されているため、総合システム最適化が困難。  
● 光伝送路情報とCQIを強制的に用いた、適応無線リソース割り当てアルゴリズム検討。

### ②フルコヒーレントモバイルフロントホール技術



A フルコヒーレントRoF伝送技術  
B フルコヒーレント光・無線周波数変換技術

- 研究開発成果3-1 フルコヒーレントRoF伝送方式の開発**
- 研究開発成果3-2 フルコヒーレント周波数変換および光・無線融合伝送の実証**  
コヒーレント光QAM信号を無線信号へフルコヒーレント変換するためには高精度な光位同期およびキャリアコンバータが不可欠  
● コヒーレントQAM光信号を60 GHz帯へ周波数変換するための光注入同期回路およびヘテロダイン検波回路を開発し、フルコヒーレント変換の基本動作を実証(研究開発成果3-1)  
● シンボルレート4 Gbaud、多値度16~256のコヒーレントQAM光信号をヘテロダイン検波し、フルコヒーレント変換したIF信号の復調を実現(研究開発成果3-2)

## 1-1 100Gbps級広帯域光・電子融合周波数分離デバイス技術

### ・最終目標:

広帯域電気信号を低遅延で多数の狭帯域ユーザ信号に分離処理する、新しい広帯域光・電子融合周波数分離デバイス技術を開発する。本技術により、14GHz以上20GHz以下の広帯域電気信号を一括して4ユーザ以上のベースバンドに変換して10 $\mu$  sec以下の低遅延で分離出力することが可能となる。本提案の光・電子融合周波数分離デバイス技術では、28Gsps広帯域A/D変換から出力される膨大なデータをデジタル領域で高速デシメーション処理する新たなデジタルダウンコンバージョン方式を用いることで、回路の小型化と量子化ビット数の向上に加え、低遅延処理を実現することが出来る。

### ・令和元年度目標:

28Gsps広帯域A/D変換器から出力される膨大なデータをデジタル領域で高速デシメーション処理する新たなデジタルダウンコンバージョン方式の基本設計を行い、デジタル回路の設計を行う。

### ・令和元年度成果:

本デジタル回路は14GHzの帯域を有する高周波電気信号をサンプリングレート28Gsps、量子化ビット数8bitのA/D変換器(ADC)を用いて、デジタル信号として取り込み、入力信号をデジタル領域でダウンコンバージョンして4ユーザ以上の信号に分割する機能を有する。ユーザ毎の帯域分割を行うため、周波数シフト部、FIR(Finite Impulse Response)フィルタ部、デシメーション部の多段構成によるデジタル回路を設計し、大規模FPGA1石に実装した。また、20Gsps以上の広帯域ADCで課題となるダイナミックレンジを改善するため、マルチチャンネルADC方式を考案し、デジタル回路の設計を行った。

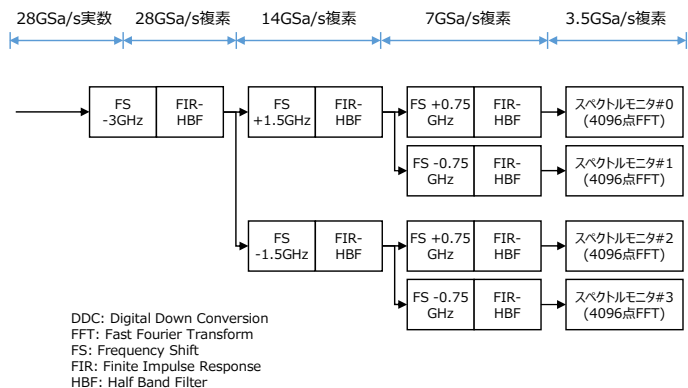


図: 実装したデジタルダウンコンバージョン回路の構成

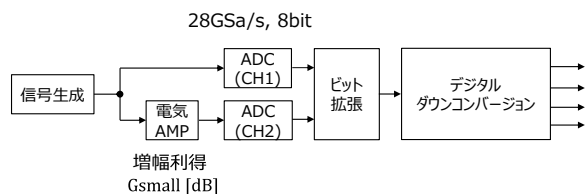


図: マルチチャンネルADC方式

## 1-2 上り無線信号の高密度多重処理技術

### ・最終目標:

アンテナ受信した無線信号を、特定低周波数帯のIF信号にミキサを用いてダウンコンバージョンし、低速ADCを用いてデジタル変換した後に、周波数軸上に信号多重して出力する方式について、実際にデジタル信号処理回路を開発し、10 $\mu$  sec以下の遅延で処理可能なことを確認する。

### ・2019年度目標:

アンテナ受信した無線信号を、特定低周波数帯のIF信号にミキサを用いてダウンコンバージョンし、低速ADCを用いてデジタル変換した後、IF周波数軸上に信号を多重し出力する周波数多重化機器の試作開発を完了する。試作開発機器を用いた単体試験を行い、処理遅延が10 $\mu$  sec以下となることを実験で示す。

### ・2019年度成果:

市販のADC/DAC、FPGAを用いて、中心周波数500MHz、帯域幅800MHzのOFDM信号を最大10チャンネル多重可能な周波数多重化機器の試作開発した。デジタル処理で周波数の異なるIFを5チャンネル生成し、ダイプレクサでそれらの信号を周波数多重する構造とし、さらに、LO、ミキサを用いたアップコンバージョン、ダイプレクサを用いた周波数多重化で、最大10チャンネルの周波数多重信号を生成可能とした。試作機器を用いた単体性能評価により、機器の処理遅延を10 $\mu$ sec以下にできることを確認した。

### 1-3 無線・光信号変換デバイス技術

・最終目標:

アンテナ-モバイル端末間でやり取りされるワイヤレス信号を光信号に重畳して伝送するRoF・IFoF技術を実現する光・電気の相互変換デバイス技術を開発する。本技術によりワイヤレス信号をシームレスに收容することで、経済的で低遅延なアクセスネットワーク構築が可能となる。光通信で用いられているC帯の光信号に加え、O帯やT帯の光信号を用いる事により利用可能帯域を広げ通信容量拡大可能性を検討する。

・2019年度目標:

アンテナ-モバイル端末間でやり取りされるワイヤレス信号を光信号に重畳して伝送するRoF・IFoF技術を実現する光・電気の相互変換デバイス技術を開発するにあたり、光学及び高周波設計を行うとともに、光デバイスの部品を用いて部分検証評価を実施する。

・2019年度成果:

本研究開発項目では、電気・光相互変換デバイスにおける電気・光変換部の光学及び高周波設計を行い、周波数特性と光出力特性の評価を実施した。その結果、高速信号を電気・光変換速度で動作するために十分な通過帯域にして28GHz以上の周波数特性が得られることを確認した。また、光出力特性については変調速度20GBaud以上においてSSPRQ (Short Stress Pattern Random Quaternary) パターンを用いた電気波形を入力し、十分に受信可能なアイ開口率を有する光出力波形が得られることを確認した。

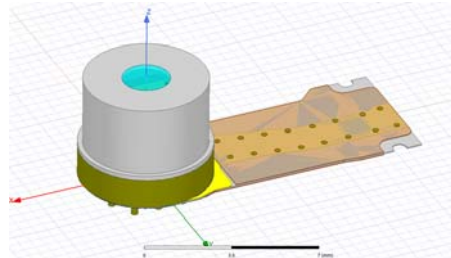


図1: 電気・光変換デバイス

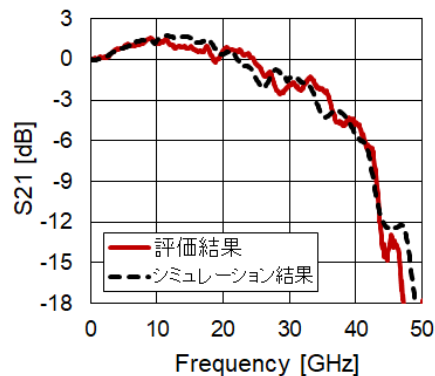


図2: 周波数特性評価結果

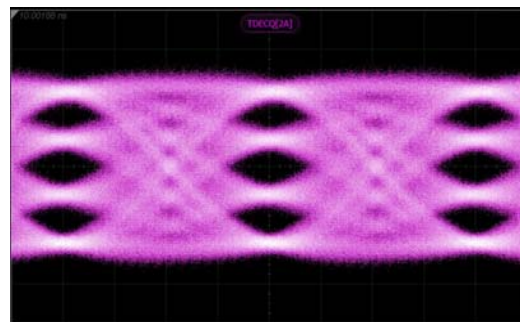


図3: 光出力波形

### 1-4 光・無線融合アンテナ技術

・最終目標:

28 GHz、40 GHzおよび80 GHz以上の周波数に適した64素子以上の光・無線融合アンテナを開発する。その際遅延要求に柔軟に対応可能な、ビームステアリング制御情報の配信方法についての検討も行う。さらに位相・振幅調整については、100  $\mu$  sec以内で制御することを目標に、広く適用されている電気処理の適用可能性を、理論および実験的な検討で明確化する。

・2019年度目標:

令和2年度の試作に向けて、28 GHz、40 GHzおよび80 GHz以上の周波数に適した64素子以上の光・無線融合アンテナの仕様を確定する。

100 $\mu$ sec以内でのビームステアリング制御を目標に、制御情報の配信方法、光または電気処理による各種ビーム制御方式のメリット・デメリットを比較整理する。

・2019年度成果:

光・無線融合アンテナのレベルダイヤグラム及び、アンテナ素子配置の仕様に関する検討を完了した。具体的には、フォトダイオードの出力パワーから、アンテナ素子までの所望出力パワーを計算し、RFアンプ2段組をベースとしたレベルダイヤグラムとした。またアンテナ素子配置に関して、一つのPD出力を8個以上のパッチ素子に供給することで、十分にシャープなビームパターンを得られることを確認した。よってアンテナの最小単位を(1つのPD+1 $\times$ 8アンテナ素子)として、これを独立ユーザ数ごとに増やしていく仕様とした。

100  $\mu$  s以内でのビームフォーミング (BF) 制御を目標に、BF信号の生成場所、BF制御情報の生成場所および配信方法、BF制御処理を行う周波数 (光または電気処理) に関して、各種方式におけるメリット・デメリットを机上検討で整理し、アプリケーションやユースケースにより適する方式は異なることを確認した。

## 2-1 双方向光・無線伝送システム技術

### ・最終目標:

100 Gbps超下りIFoF伝送について、EVM3.5 %未満の信号品質を確保したうえで、256 QAM伝送を可能とする低コスト化を考慮した最適条件を明確化する。また、50 Gbps級上りIFoF伝送についても、同様に低コスト化を考慮した方式の実現可能性を示す。

アンテナサイトに対する下り/上り伝送では、RoFおよびIFoF伝送方式の適用性を机上および実験的に検討し、両方式の適用領域を明確化する。

### ・2019年度目標:

平成30年度に検討したIF信号生成条件、必要波長数の結果に基づき、下り100Gbps、上り50Gbps級の双方向IFoF伝送を実験で示す。

アンテナサイト向け下り伝送およびアンテナサイトからの上り伝送について、RoF(フォトミキシング技術含む)およびIFoF(LOをセンター側から伝送する方式含む)伝送実験を行い、両方式の課題、適用領域を実験で明確化する。

### ・2019年度成果:

商用の100GbE用TOSAモジュールを用いて、下りリンクを想定した400MHz帯域幅の256QAM信号40チャンネルを伝送することに成功した。ネットレートでは128Gbps相当となり、100Gbps級のIFoF伝送に成功した。また下りリンクも同様の手法で、16QAMに信号を切り替えることで50Gbps級IFoFを容易に達成できる見込みを得た。

中継局とアンテナサイト間の短距離伝送(SMF 1km以下)において、RoF、IFoF(周波数変換用のLOをアンテナサイトに設置、またはIF信号に周波数重畳して中継局側からアンテナサイトに伝送)各方式の伝送特性を評価した。その結果、いずれの方式でも、64QAM、800MHz帯域幅のOFDM信号をEVM8%の信号品質で伝送できる見込みを得た。

## 2-2 適応的空間電波周波数割り当て技術

### ・最終目標:

28 GHz、40 GHzおよび80 GHz帯を使用する際、各周波数における無線区間の状況など、品質に関するパラメータをセンター局へフィードバックし、最も高い品質を確保可能なチャンネルの選択を適応的に行う技術を確立する。また無線区間のみならず、RoF/IFoF伝送区間のチャンネル特性も総合的に判断し、システムとしての最適化を行うためのアルゴリズムに関する検討も行う。

### ・2019年度目標:

28GHz、40GHz、および80GHz以上の周波数帯の利用を想定し、無線伝搬およびRoF/IFoF伝送区間のチャンネル特性を総合的に判断して、チャンネル選択する方式を検討し、平成32年度実施予定の周波数割り当て機能の試作仕様を策定する。

### ・2019年度成果:

無線区間の品質情報を表すチャンネル品質信号(Channel quality indicator: CQI)という指標と、IFoF/RoF区間の光伝送路の品質モニターする手法を組み合わせた、適応的な無線リソース割り当て技術の検討を完了した。具体的には、上り信号からのCQIをセンター局で抽出し、光伝送区間で計測した品質情報と合わせて、総合的に最適なリソース配分を行うアルゴリズムを用いることで、無線システム全体の品質を向上させられる見込みを得た。

### 3-1 フルコヒーレントRoF伝送方式の開発

#### 3-2 フルコヒーレント周波数変換および光・無線融合伝送の実証

・最終目標:

フルコヒーレントRoF伝送の基盤技術としてコヒーレント光源、フルコヒーレント制御技術、ならびに光信号をヘテロダイン検波により無線(IF)周波数(40 GHz以上)にダウンコンバートするキャリア周波数変換技術を開発する。これらの結果に基づき、100 Gbps級の信号に対して10 $\mu$ sec以下の遅延時間で光・無線のシームレスな変換を実現する。

・2019年度目標:

コヒーレント光QAM信号を60 GHz帯の無線(IF)周波数へ高い効率で変換するために、高精度な光位相同期技術を確立し、60 GHz帯におけるIFスペクトルおよび位相雑音の評価を行う。さらにヘテロダイン検波回路を組み合わせ、フルコヒーレント変換をオフライン処理により評価し、その実現性を実証する。

・2019年度成果:

本研究開発項目では、コヒーレントQAM光信号を60 GHz帯へ周波数変換するためのキャリアコンバータの設計に取り組んだ。光注入同期回路により位相同期したLO光とQAMデータ信号を合波し、帯域70 GHzのPDを用いたヘテロダイン検波により、60 GHz帯へのフルコヒーレント変換の基本動作を実証した。さらに、本回路によりシンボルレート4 Gbaud、多値度16~256のコヒーレントQAM光信号をヘテロダイン検波し、フルコヒーレント変換したIF信号の復調を実現した。これにより、光周波数から60 GHz帯へのダウンコンバートによる光・無線融合フルコヒーレント伝送システム実現の見込みを得た。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

| 国内出願     | 外国出願     | 研究論文     | その他研究発表    | プレスリリース<br>報道 | 展示会      | 標準化提案    |
|----------|----------|----------|------------|---------------|----------|----------|
| 4<br>(3) | 3<br>(2) | 1<br>(1) | 12<br>(12) | 0<br>(0)      | 2<br>(2) | 0<br>(0) |

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

(1) 第2回受託者間調整会議を開催  
全受託者が一同に会し、各者の研究内容、進捗状況を共有するとともに、今後の課題間連携について議論。

5. 今後の研究開発計画

**1-1 100Gbps級広帯域光・電子融合周波数分離デバイス技術**  
 これまでに設計したデジタルダウンコンバージョン方式のデジタル回路とアナログフロントエンドを組合せた性能評価を行い、最終年度に実施する連携評価に向けた検討を行う。

**1-2 上り無線信号の高密度多重処理技術**  
 今年度試作開発した周波数多重化機器と、研究開発項目2-1のIFoF伝送技術とを連携させたIFoF伝送システムを構築し、上り伝送の実現性を実験で確認する。

**1-3 無線・光信号変換デバイス技術**  
 アナログの無線信号と光信号を変換する光デバイスの光学及び高周波設計をもとに、光デバイスを構成する部品を組合せ、光デバイスの最終形態において基本特性評価を実施する。

**1-4 光・無線融合アンテナ技術**  
 光・無線融合アンテナ、電気処理による高速ビームフォーミング制御機器の試作開発を実施し、それぞれ単体での基本性能評価を実施する。

**2-1 双方向光・無線伝送システム技術**  
 80GHz以上のRF信号を想定し、アンテナサイト向け下り伝送およびアンテナサイトからの上り伝送について、RoFおよびIFoF伝送方式を実験で比較評価する。

**2-2 適応的空間電波周波数割り当て技術**  
 無線およびRoF/IFoF伝送のチャネル特性を総合的に判断してチャネル選択する方式に関して、その有効性を評価する。

**3 フルコヒーレント光・無線融合伝送基盤技術**  
 これまでに開発した光位相同期回路およびヘテロダイン検波回路を用いて、コヒーレントQAM信号を光周波数から60 GHz帯へダウンコンバートし、その無線伝送により光・無線融合フルコヒーレント伝送システムの基本性能を実証する。