

5G 及び 6G に向けたミリ波通信システム

mmWave Communication System for 5G and Beyond: Advancements toward 6G

船田 知之*
Tomoyuki Funada

大道 文雄
Fumio Daido

川瀬 大輔
Daisuke Kawase

中村 美琴
Mikoto Nakamura

小河 昇平
Syohei Ogawa

自念 圭輔
Keisuke Jinen

当社は、5Gや6G無線通信に向けて、電波をその波形を保ったまま光ファイバで伝送する Analog Radio-over-Fiber (A-RoF) による無線信号伝送技術の開発と、その応用システムの開発を行っている。本稿では、5G及び6G時代のブロードバンド無線通信で活用が期待されるミリ波帯の電波による無線通信システムについて、経済的な社会実装を可能とする A-RoF の技術開発の取り組みと、その応用システムとしての 5G ミリ波分散アンテナシステム (DAS)、5G ミリ波対応産業用端末について紹介する。

Our company is developing Analog Radio-over-Fiber (A-RoF) technology for wireless signal transmission, enabling the transmission of radio waves through optical fiber while maintaining their waveform for 5G and 6G wireless communication. This paper introduces our efforts in developing A-RoF technology, focusing on enabling the economically viable deployment of millimeter wave radio communication systems which are essential for broadband wireless communication in the era of 5G and 6G. Additionally, we showcase the application of A-RoF technology in the 5G millimeter-wave distributed antenna system (DAS) and industrial 5G terminals supporting millimeter-wave communications.

キーワード：5G、6G、ミリ波、A-RoF、DAS

1. 緒言

AIの進展・現実拡張・メタバースの普及等に後押しされ、モバイル通信トラフィック量は2030年には5G導入が始まった2020年の14倍に、2040年には190倍になることが予想されている⁽¹⁾。それを支えるモバイル通信ネットワークとして、現在モバイル通信で主に使われているマイクロ波帯（数GHz）の電波に加え、数倍～10倍の帯域幅のあるミリ波帯（数十GHz）の電波の活用が期待されている。

しかし、ミリ波帯の電波は①直進性が高く回折しにくい、②障害物の透過減衰量が大きい、③雨や霧などにより吸収・散乱されやすい、といった性質があり伝搬距離が短くなるという課題がある。そのためミリ波を使った通信では、小セルを形成するアンテナ装置を適切な場所に多数設置する必要がある。一方、従来のミリ波アンテナ装置は、サイズが大きく消費電力も大きいことから、設置場所が限られミリ波を活用する5Gの普及の支障となっている。

A-RoF (Analog Radio-over-Fiber) 技術を使った無線システムは、電波をその波形を保ったまま光ファイバで届けたい場所まで伝送し、伝送した先で光信号を電波に戻す構成のため、障害物の影響を受けずに電波を遠くまで届けることができる。そのためオフィスビル内部や地下街、トンネル内への3G、4G携帯電話サービスの拡張に検討されてきた。

A-RoF 技術を基地局に適用すると、基地局本体から張り出すアンテナ装置側（基地局張出部）は、デジタル処理部が不要で、増幅器とアンテナのみの簡素な構成となり、低消費電力かつ小型のミリ波アンテナを実現可能である。こ

れにより、アンテナ装置の設置場所の自由度を大幅に高めることができるため、通信エリアに多数のアンテナを張り出す分散MIMOシステムへの適用など、6Gの超高速通信の実現に貢献する有望な技術の1つと考えられる。

当社は、A-RoF 技術の5Gミリ波通信システムへの適用可能性と、分散アンテナシステムへの応用可能性を検討してきた。また、ミリ波対応の産業用5G端末を開発し、ミリ波が有効に活用できることを実証してきた。本稿では、これら当社のミリ波通信システムへの取組を紹介する。

2. A-RoF 活用無線システムの構成・要件

ミリ波無線システムの一例として5Gのミリ波帯システムをあげる。5Gミリ波基地局の構成として、アナログ Beam Forming 方式の場合を例に、既存の Mobile Fronthaul インタフェースである CPRI (Common Public Radio Interface) を用いた O-RAN (Open Radio Access Network) の Fronthaul 構成⁽²⁾と、A-RoF を用いた構成を図1に示す。

A-RoF は、基地局張出部の省電力・小型化の利点がある一方で、アナログ信号を光ファイバで伝送するため、光電変換素子や光ファイバ伝送の非線形歪みの影響を受ける⁽³⁾。これらは、使用する光デバイスや、光ファイバ伝送距離に依存するため、A-RoF を活用する無線システム構成において、信号品質への影響度合いを考慮する必要がある。

我々は、ミリ波基地局の主な要件として、①下り送信信号については、無線信号を光ファイバで伝送した後の変調

品質の指標として Error Vector Magnitude (EVM)、② 上り受信信号については、アンテナで受信した無線信号を光ファイバで伝送した後の受信ダイナミックレンジに着目し、A-RoF を適用した場合に実現可能な無線性能をシミュレーションと実機により検証した (図2)。

の、光ファイバの波長分散の影響⁽⁵⁾、無線信号の上りダイナミックレンジ^{(6)、(7)} についての検討結果を報告する。

3-1 下り伝送特性のシミュレーション

ミリ波帯の無線帯域幅は、従来の4Gや5G Sub6 GHzの無線帯域幅と比較して広帯域で、光ファイバの波長分散の影響を受けやすい。一方、波長分散耐力は光変調デバイスに大きく依存することが知られている⁽³⁾。我々は、光変調デバイスとして、Mach-Zehnder interferometer Modulator (MZM), Electro-absorption Modulator integrated with DFB Laser (EML), Directly Modulated Laser (DML) について光伝送シミュレーションを行い、波長分散耐力の比較を行った。光ファイバ伝送の波長帯は1.3um帯/1.5um帯のいずれも使うことができるが、波長分散の影響は大きい、光波長多重 (WDM) による複数無線信号伝送への拡張が容易な1.5um帯で検討した。

EO (電気-光変換及び変調部) における周波数チャープ特性 $\Delta f(t)$ を下記式で表現した⁽⁸⁾。

$$\Delta f(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ \frac{dP_{norm}/dt}{P_{norm}} + \omega_c(P_{norm} - 1) \right\} \dots\dots (1)$$

ここで α は過渡チャープパラメータ、 ω_c は断熱チャープパラメータ、 P_{norm} は平均値で規格化された光強度である。各光変調デバイスの周波数チャープの特性は、典型的な例として、図3に示すチャープパラメータを用いた。

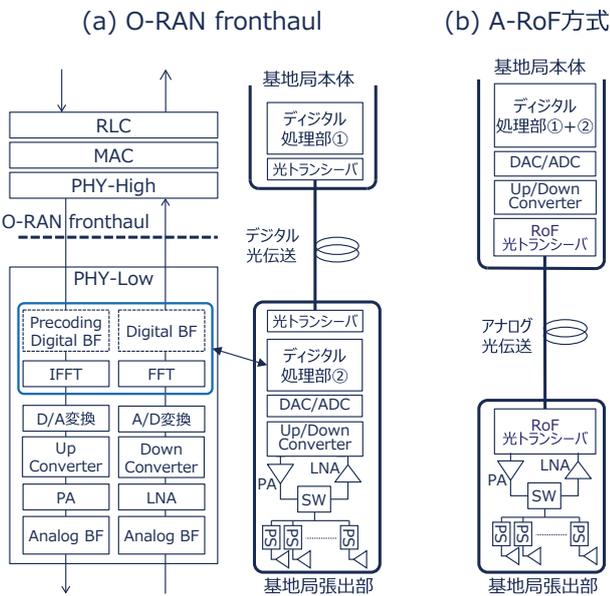


図1 基地局の機能配置例

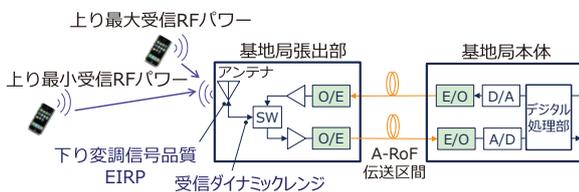


図2 下り無線信号の変調品質と上り無線信号の受信ダイナミックレンジ

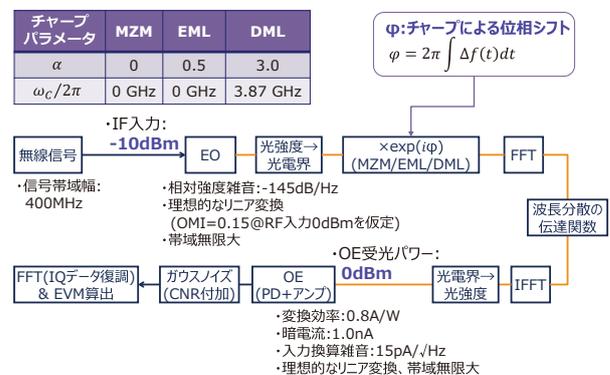


図3 光ファイバ伝送シミュレーションのブロック構成

3. 5G無線信号のA-RoF伝送特性

ミリ波無線基地局において、基地局本体と基地局張出部の間をA-RoFで接続する構成では、ミリ波周波数で直接光ファイバ伝送する方式と、基地局張出部に周波数変換機能を置き、アナログ信号を取り扱いしやすい中間周波数で光ファイバ伝送する Intermediate Frequency over Fiber (IFoF) と呼ばれる方式⁽⁴⁾がある。

前者は基地局張出部張出アンテナ側がより簡素になる利点があり、後者はRoF区間に10 gigabit EthernetやFTTHで広く普及している動作周波数が数GHzの光デバイスを用いた経済的なシステムを実現可能な利点があり、無線システムの要件により使い分け可能である。

本章では、5Gミリ波無線基地局にIFoFを適用する場合

図4に、波長分散量 [ps/nm] によるEVMへの影響の計算結果を示す。標準的なシングルモードファイバの波長1.55umでの波長分散17 [ps/(nm・km)] において、無線フロントホール20kmを想定すると、EMLとMZMは十分な波長分散耐力を有することがわかる一方、DMLではEVMの劣化がみられる。DMLのチャープ特性から、例えばIF 5GHz、波長分散量650 [ps/nm] 以上ではEVMの改善が見られ、DMLを有効に活用できる用途もあると考えられる。

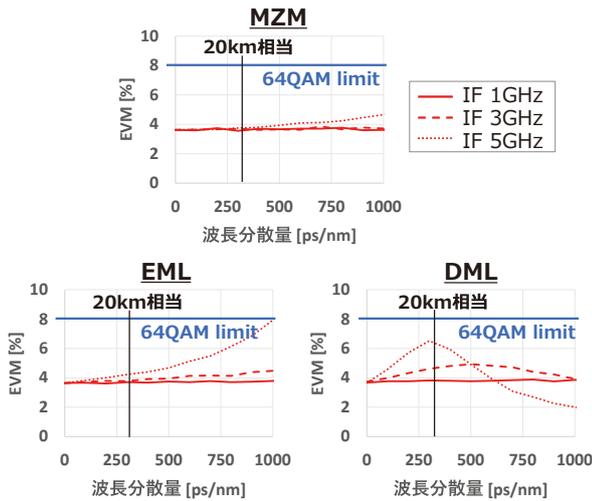


図4 波長分散の影響

3-2 上り伝送特性のシミュレーション

無線信号の上り受信においては、アンテナ遠方とアンテナ近端の端末からの強度差の大きい入力電力への対応が必要になる。

そこで、図5に示すEOデバイスにEMLを用いた5Gミリ波上り受信構成において、入力電力レンジへの対応可能性を伝送シミュレーションにて検討した。はじめにフロントエンド (FE) への入力電力レンジを見積もるため、アンテナ-端末間の距離を段階的に変更し、各点の伝搬損失とアンテナ利得を用いて入力電力を計算した (図6)。伝搬距離10~180mの場合、入力電力は-50dBm~-90dBm、40dBのダイナミックレンジが必要と見積もった。

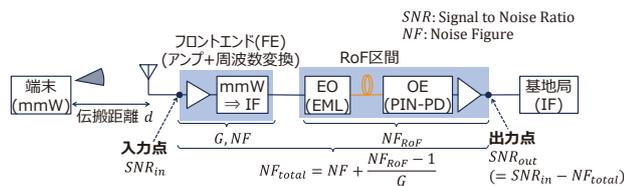


図5 上り受信構成

無線部シミュレーション諸元	
中心周波数	28 GHz
端末の送信EIRP	26 dBm
伝搬モデル	① Urban Micro Street Canyon LOS*+マージン ② 自由空間モデル
アンテナ高さ	10 m
アンテナ単素子利得	5 dBi
アンテナ素子数	16

*3GPP TR38.901 V16.0.0, Oct. 2019.

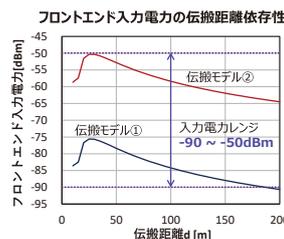


図6 フロントエンドへの上り入力レンジ

弱入力側 (-90dBm) について、図5の構成で光伝送シミュレーションを実施し、FE入力点での最小受信感度を計算した結果を図7に示す。ここでは、最小受信感度を端末のチャンネル品質情報 (CQI) 1でブロックエラーレート10% (SNR -7.8dB相当)⁽⁹⁾ となるFE部の入力電力と定義した。EMLの消光カーブは実測した結果を用いた。FEのゲインを40dB以上に設定した場合、最小入力電力は-97dBmを実現可能なことを確認した。また、強入力側 (-50dBm) では、FEのゲイン40dB時に、IFoF 伝送後の相互変調歪 -40dB未満となることを確認した (図8)。

IFoF伝送シミュレーション諸元	
信号帯域幅	50 MHz
中心周波数	3.275GHz
フロントエンドのNF	7dB
EML消光カーブ	実測値のfitting
レーザーのRIN	-143 dB/Hz
PD受光パワー	0 dBm
PD変換効率	0.8 A/W
PD暗電流	1.0 nA
受信部の入力換算雑音	25 pA/√Hz
光波長	1550 nm
分散パラメータ	17 ps/(km nm)
線幅増大係数a	0.5

最小受信感度のフロントエンドゲイン依存性

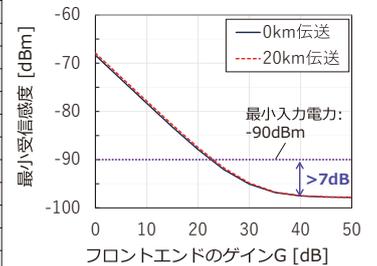


図7 上り無線信号の最小受信感度とFEのゲイン

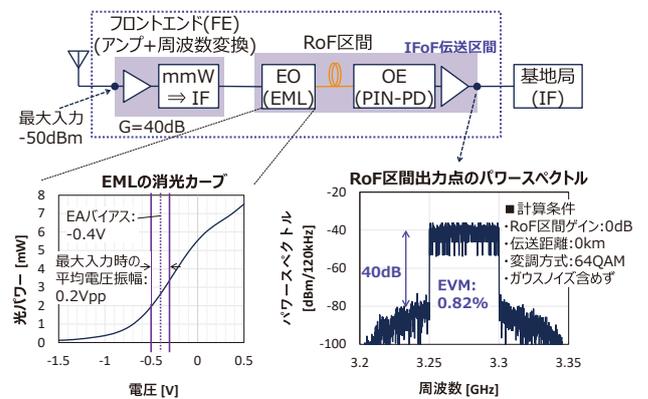


図8 上り最大無線信号入力時の光出力スペクトル

3-3 IFoF実機での評価

電波が遠くまで届き難いミリ波無線システムでは、小セルを形成するアンテナ装置 (基地局張出部) を多数設置することが想定され、設置場所確保のため小型化が望まれる。光モジュールの小型化は重要な課題の一つである。そこで我々は、小型かつ着脱作業性に優れた Small Form-factor Pluggable (SFP) 型の送受信一体 A-RoF モジュールを開発した⁽¹⁰⁾。図9に試作した A-RoF モジュールの概要を示す。

図10 (a) に、本 A-RoF モジュールを用いた RoF 区間の伝送特性評価系を示す。Signal Generator (SG) より、中心

項目	構成
Form factor	SFP(送受信一体)
光コネクタ	LC型
伝送方式	強度変調-直接検波
光波長帯	1550nm帯
EO	電界吸収変調器集積型 半導体レーザー(EML)
OE	PIN-PD

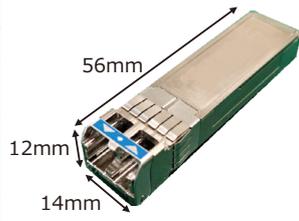


図9 SFP型A-RoFモジュールの概要

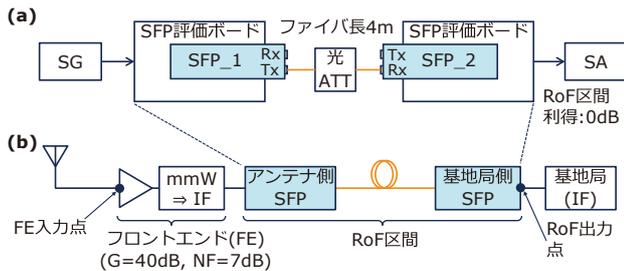


図10 (a) RoF 区間伝送特性評価系と (b) 上り基地局構成

搬送波周波数3.5GHz、1 Carrier Component、信号帯域幅50MHz、サブキャリア間隔60kHzのOFDM信号を出力し、SFP評価ボードを介してA-RoFモジュール(SFP_1)に信号を入力した。SFP_1から出力された光信号は、シングルモードファイバおよび光アテネータ(ATT)を介して対向のA-RoFモジュール(SFP_2)で受光される。光受光パワーは0dBmとした。SFP_2からの電気出力信号を、SFP評価ボードを介してSignal Analyzer(SA)に接続し、EVMを測定した。

図11(a)に、EVMのSFP_1への入力電力依存性を示す。EVM8%以下となるレンジは約38dBであった。次に、本A-RoFモジュールのIFoF伝送のミリ波基地局構成(上り)への適用可能性を計算で確認した。図10(b)に本稿で想定する上り基地局構成を示す。アンテナで受信された50MHz幅ミリ波無線信号は、アンプと周波数変換器で構成されるフロントエンド(FE)に入力される。ミリ波無線信号はFEに

てIF(3.5GHz)に変換され、RoF区間を介し、基地局に接続される。本構成において、RoF出力点におけるSNRのFE入力電力依存性を算出した。FE部はゲイン40dB、NF7dBと仮定し⁽⁶⁾、RoF区間のNFは、EVM測定結果(図11(a))から換算した出力SNRと、熱雑音を仮定した入力SNRから計算した値を用いた。図11(b)に結果を示す。筆者らが見積もったFEへの入力電力レンジ-90~-50dBm⁽⁶⁾に対し、最低入力レベルでは伝搬路品質指標(CQI)4(QPSK、符号化率0.3)の所要SNR⁽⁹⁾にマージン1dB以上を確保している。一方最大入力レベルに対しては、CQI 15(64QAM、符号化率0.93)の所要SNR⁽⁹⁾をクリアし、かつRoF区間の飽和の影響はほぼ受けないことがわかる。

4. ミリ波分散アンテナシステム

2章と3章の検討により、A-RoFは5G無線信号の伝送に活用可能なことを示した。ここでは、A-RoFの応用例としてミリ波の分散アンテナシステムを示す。

ミリ波は、Sub-6GHz帯と比べて建築材料を通過する際のロスが大きく屋外の基地局から建物内に届きにくいいため、屋内にアンテナを必要とするケースが多くなる。そして、屋内には障害物が多くあるため、複数のアンテナを設置し死角をカバーする必要もある。DASは、無線信号を複数の張り出しアンテナ装置に分配する構成であるため、このようなミリ波通信の屋内展開に有効であると考えられる。

従来DASが活用されてきたSub 6GHzの無線周波数では、無線信号をアンテナまで同軸ケーブルで分配することが可能であったが、ミリ波は同軸ケーブルでの伝送損失が大きいことから、伝送損失が0.3~0.4dB/kmと小さい、光ファイバで分配するA-RoFを活用したDASが好適である。

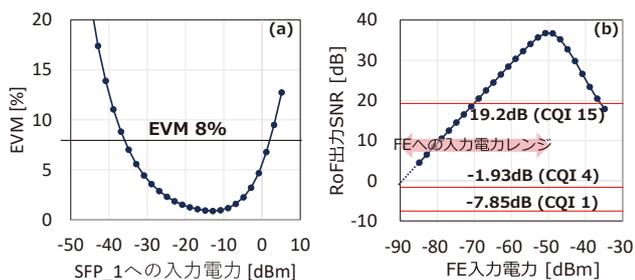


図11 (a) EVM測定結果と (b) RoF出力SNRの見積

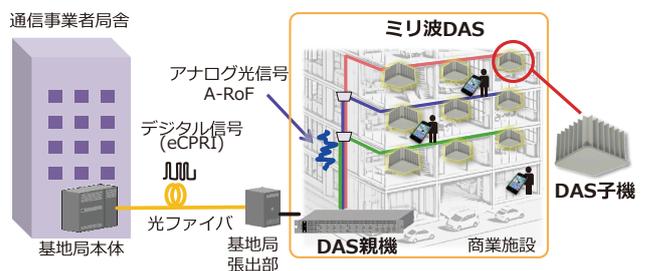


図12 ミリ波分散アンテナシステム

図12のシステムでは、DAS子機は、光電気変換器、中間周波数とミリ波に変換する周波数変換器、増幅器、アンテナを有する。従来のRemote Radio HeadやRemote Unitと呼ばれる基地局張出部に対して、DAS子機はアナログ回路のみで構成されるため、簡素で低消費電力を実現可能で

ある。

また、A-RoF を使った DAS は複数の無線周波数を周波数多重して一括伝送できるため、複数通信事業者が同じ装置を使って同時にサービスを提供するインフラシェアリングにも貢献可能な技術である。

5. 5G ミリ波対応産業用端末

ミリ波の周波数帯を使った 5G ミリ波通信システムの普及には、ミリ波に対応した 5G 端末が重要となる。当社では、モバイルキャリアが展開するパブリック 5G と、企業や自治体が限定された特定エリア内において専用の 5G ネットワークを構築するローカル 5G の両方で利用可能な産業用 5G 端末を開発した。本 5G 端末は、高速通信を実現するためのミリ波と、安定通信を実現するための Sub6 の両周波数帯での通信を同時使用 (NR-DC^{※2}) し、ミリ波と Sub6 のアンテナを筐体内に内蔵することで、高速かつ安定した無線通信を可能としている。

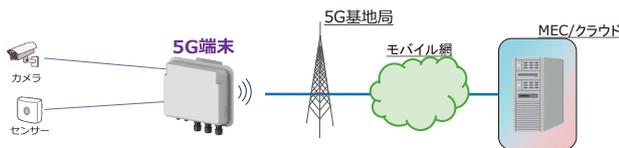


図13 外観とシステム構成例

表1 機器仕様

項目	仕様
5G	3GPP ^{※3} Rel-16対応 SAモード ^{※4} 対応周波数：Sub6、ミリ波
無線LAN	IEEE802.11 a/b/g/n/ac/ax
有線LAN	100/1000BASE-T×3
その他IF	RS-485×1、接点(DI×1、DO×1)
サイズ	315×247×82mm
重量	3.0Kg
電源	PoE or AC100V (ACアダプタ)
消費電力	25W以下
動作環境	動作温度：-20～50℃ 動作湿度：5～95%
冷却方式	自然冷却 (ファンレス)
防塵・防水	IP66
その他機能	ルーター、VPNパススルー/クライアント、 NAPT、DHCP、エッジ処理機能

表2 通信性能

方向	スループット例
下り (基地局⇒端末)	約2.5Gbps
上り (端末⇒基地局)	約0.6Gbps

外観とシステム構成例を図13、機器仕様を表1に示す。

NR-DCでの通信性能の一例を表2に示す。

当社 5G 端末は、広温度範囲 (-20～50℃) で動作し、防塵防水機能を有しているため、環境条件の厳しい工場や屋外で使用可能である。工場において製品の良品判定を AI 処理で自動判定する場合、高解像度の画像データが必要となる。ミリ波による高速通信を活用することで、サイズが大きい画像データを短時間で収集でき、工場の生産性を向上させることが可能となる。また、屋外では、高速な通信回線が整備されていない建物に、本 5G 端末を設置することで、高速通信回線の短時間での構築が可能となる。また、本 5G 端末はエッジ処理機能^{※5}を有し、ユーザが必要とするアプリケーションの追加実装が容易なことを特徴としている。ミリ波を活用した高速通信と組み合わせることで、ユーザ要件に合わせた最適なソリューションの実現が可能となる。

6. 結 言

5G 及び 6G 時代で必要となるブロードバンド無線通信で必要となるミリ波帯の電波による無線通信システムの経済的な社会実装に向けて、ミリ波通信システムへの A-RoF 適用を検討し、使用可能であることを示した。A-RoF の応用例として、5G ミリ波分散アンテナシステムへの適用可能性を示した。また、ミリ波の端末側の取り組みとして、5G ミリ波対応産業用端末について紹介した。これらの要素技術を活用し、ミリ波の広帯域性を活かした 5G、6G 通信システムの経済的な商用展開に貢献していく。

7. 謝 辞

この成果の一部は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託事業「ポスト 5G 情報通信システム基盤強化研究開発事業」(JPNP20017) の結果得られたものです。

用語集

※1 Small Form-Factor Pluggable

ネットワーク機器に使われる、機器ポートに活線挿抜可能な小型光トランシーバの業界標準の一つ

※2 NR-DC

5G 通信において Sub6 とミリ波を組み合わせて運用する技術。

※3 3GPP

携帯システムの仕様を作成する標準化団体。

※4 NSA モード、SA モード

4G と 5G の組合せによるサービスが NSA モード、5G のみによるサービスが SA モード。

※5 エッジ処理機能

エンドユーザーの近くで取得データの処理や解析を行う機能。

参考文献

- (1) B5GPC, White paper "Beyond 5G White paper -Message to the 2030s"
[Online] Available: https://b5gp.jp/w/wp-content/uploads/pdf/whitepaper_en_1-51.pdf
- (2) <https://www.o-ran.org/>
- (3) Byung Gon Kim et al., "RoF-Based Mobile Fronthaul Networks Implemented by Using DML and EML for 5G Wireless Communication Systems," JLT., Vol. 36, pp. 2874-2881 (2018)
- (4) Recommendation ITU-T G.9803
- (5) 川瀬 他, 「5G ミリ波無線信号の IFoF 伝送における波長分散耐力の検討」、2021 年電子情報通信学会総合大会、B-10-42
- (6) 川瀬 他, 「EML を用いた IFoF 伝送のミリ波基地局への適用検討」、2022 年電子情報通信学会総合大会、B-5-108
- (7) 桂 他, 「アナログ RoF を用いた基地局上り信号受信レンジに関する考察」、2023 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-5-70
- (8) Luiz Anet Neto et al., "Simple Estimation of Fiber Dispersion and Laser Chirp Parameters Using the Downhill Simplex Fitting Algorithm," JLT., Vol. 31, pp. 334-341 (2013)
- (9) Eunmi Chu et al., "A Novel Link-to-System Mapping Technique Based on Machine Learning for 5G/IoT Wireless Networks," Sensors, 19 (5) , 1196 (2019)
- (10) 川瀬 他, 「IFoF 伝送 5G ミリ波基地局への SFP 型アナログ RoF モジュールの適用検討」、2023 年年電子情報通信学会総合大会、B-5-113

執筆者

船田 知之* : シニアスペシャリスト
情報ネットワーク研究開発センター
主幹



大道 文雄 : 情報ネットワーク研究開発センター
主幹



川瀬 大輔 : 情報ネットワーク研究開発センター
主席
博士 (工学)



中村 美琴 : 情報ネットワーク研究開発センター



小河 昇平 : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長



自念 圭輔 : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長
博士 (工学)



* 主執筆者