

# 5G/6G屋内ワイヤレス通信向け1ビットアウトフェージング変調による光ファイバ無線システム

堀 真一 加瀬 裕真 大島 直樹 國弘 和明

## 要旨

本稿では、1ビットアウトフェージング変調を利用した光ファイバ無線 (RoF) システムを提案します。提案するRoFシステムは、分散アンテナユニット内に消費電力の大きいデジタルアナログコンバータを必要とせず、また、光送受信器に要求される動作速度を緩和することでデバイスコストを削減します。このシステムにおける信号帯域幅1GHzの広帯域伝送実験では、ACLR (隣接チャネル漏えい電力比) に関する3GPP規格に適合することが実証されています。今回提案するRoFシステムは、他のシステムと比べ、高い帯域効率を備えていることも示されています。したがって、このRoFシステムは5G/6Gのモバイルネットワークシステムに向けて、費用対効果の高い屋内ワイヤレスソリューションを提供します。



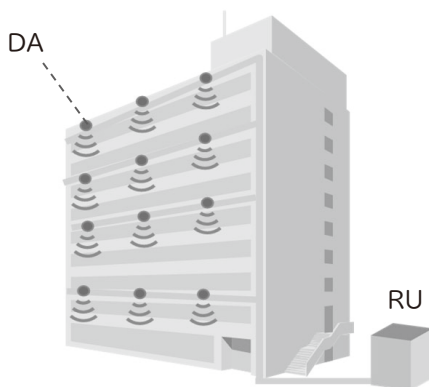
光ファイバ無線(RoF)/アウトフェージング/屋内ワイヤレス/Beyond 5G/6G

## 1. はじめに

ミリ波技術を活用した高速ワイヤレス通信は5G (第5世代移動通信システム) で既に導入されており、Beyond 5G/6Gにおいてもキー・テクノロジーとして期待されています。一方で、ミリ波帯は、大きな伝搬損失と高い直進性を有するため、屋外に設置された基地局から障害物の多い屋内の端末への伝搬は、困難です。モバイル通信のトラ

フィックの80%以上は屋内で発生するため<sup>1)</sup>、屋内ミリ波通信環境におけるQoS (サービス品質) 改善は必須の要素です。ミリ波帯DA (分散アンテナユニット) を屋内環境に高密度に展開することは、QoSの改善に効果的であるものの、実用化にはDAの小型化と低消費電力化、そしてコスト低減が必要です。図1に示した光ファイバ無線 (RoF) システムは、屋内環境に柔軟に設置可能な小型で低消費電力なDAを提供できるという点で、有望なソリューションです。

現行のRoFシステムは、それぞれ図2の(a) (b) (c) に示すように、DRoF (デジタルRoF)、ARoF (アナログRoF)、 $\Delta\Sigma$  RoF (デルタシグマRoF) に分類されます。DRoFシステムは既に実用化されており、屋内のモバイルネットワークシステムで広く利用されています。DRoFで用いられるDAは、広帯域信号に対応したDAC (デジタルアナログコンバータ) を装備しているため、電力消費が大きくコストも高くなります。ARoFのDAはDACを必要としないため、消費電力は少なく、サイズも小さくできるという特徴があります。ARoFシステムでは、ひずみによる信号劣化を避けるために、線形性に優れた、高コストなE/O (電気光) コンバータとO/E (光電気) コンバータを含む光送受信器が必要になります。 $\Delta\Sigma$  RoFシステムではDA内に高い線形



DA : 分散アンテナユニット、RU : 無線ユニット

図1 屋内ワイヤレス通信のための光ファイバ無線システム

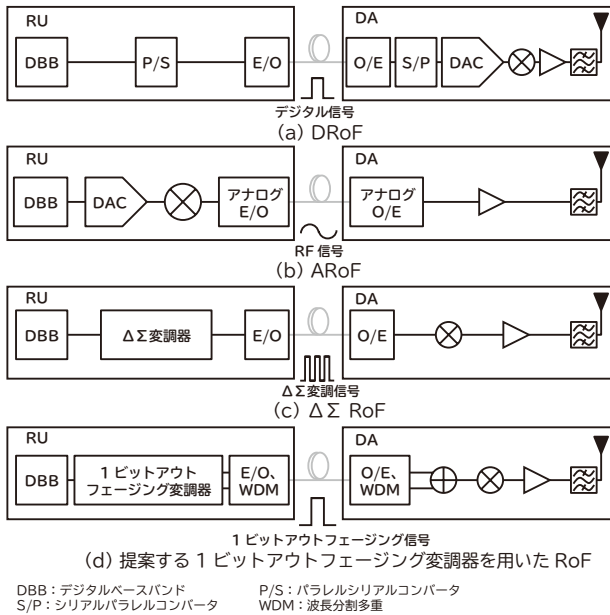


図2 RoFシステムのブロック図

性を持つE/OやO/Eデバイス、あるいは消費電力が大きなDACを必要としないため<sup>2)3)</sup>、小型のDAを使用した低コストRoFシステムの実装が可能です。しかしながら、ミリ波帯を使う広帯域通信においては、 $\Delta\Sigma$ 変調器のサンプリングレートを高くする必要があるため、光送受信器には高速動作が要求され、コストが上がる原因になります。

NECでは、低コストの光送受信器を使用できるよう、図2(d)に示すような1ビットアウトフェージング変調によるRoFシステムを提案します。

## 2. 1ビットアウトフェージング変調の動作原理

アウトフェージングとは、図3に示すように、振幅変調と位相変調されたオリジナルの信号ベクトル $S_{\text{org}}(t)$ を、位相変調のみを持つアウトフェージング信号ベクトルのペア、 $S_1(t)$ と $S_2(t)$ に変換する技術です<sup>4)</sup>。振幅 $A(t)$ と位相 $\theta(t)$ は、次の式に示すように、極座標変換によってI/Q(同相成分と直交成分)信号から生成されます。

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \\ \theta(t) = \tan^{-1}(Q(t)/I(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$S_1(t)$ と $S_2(t)$ はそれぞれ、式(2a)と(2b)で表せます。

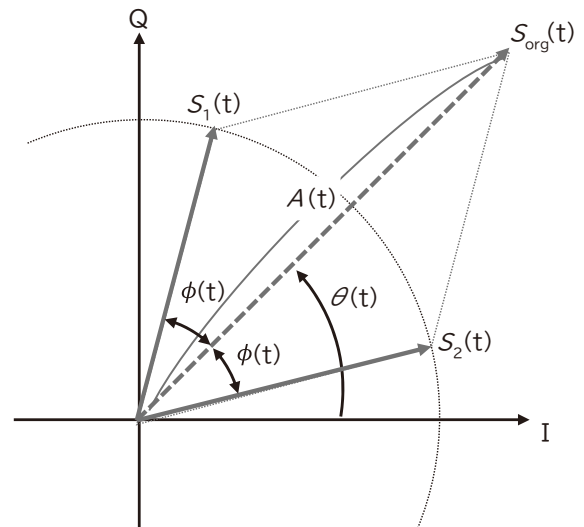


図3 ベクトル分離によるアウトフェージングの原理

$$S_1(t) = \frac{A_{\text{max}}}{2} \cos(2\pi f_c t + \theta(t) + \phi(t)) \quad (2a)$$

$$S_2(t) = \frac{A_{\text{max}}}{2} \cos(2\pi f_c t + \theta(t) - \phi(t)) \quad (2b)$$

$$\phi(t) = \cos^{-1}\left(\frac{A(t)}{A_{\text{max}}}\right) \quad (2c)$$

前述の式で、 $f_c$ と $A_{\text{max}}$ はそれぞれ、搬送周波数と、 $A(t)$ の最大値を表します。アウトフェージングの原理として、次の式で表現されるように、 $S_{\text{org}}(t)$ は $S_1(t)$ と $S_2(t)$ を合成することで再生されます。

$$S_{\text{org}}(t) = A(t)\{\cos(2\pi f_c t + \theta(t))\}. \quad (3)$$

提案するRoFシステムで、 $S_1(t)$ と $S_2(t)$ は振幅を値ゼロと比較することにより、矩形の信号波 $S_{1b}(t)$ 及び $S_{2b}(t)$ に変換されます。これらの信号を、1ビットアウトフェージング信号と呼びます。

図4に、 $S_{\text{org}}(t)$ 、 $S_{1b}(t)$ と $S_{2b}(t)$ 、及び従来の $\Delta\Sigma$ 変調器の出力信号 $S_{\Delta\Sigma}(t)$ の、それぞれの波形を示します。 $S_{\text{org}}(t)$ の周期は $1/f_c$ であり、 $S_{1b}(t)$ と $S_{2b}(t)$ の周期も $1/f_c$ になります。したがって、これらの信号のパルス幅は $1/(2f_c)$ となり、光送受信器に要求される遷移速度は $f_c$ の2倍になります。一方で、 $S_{\Delta\Sigma}(t)$ の波形は、サンプリングレートである

$f_s$ で更新されるため、 $S_{\Delta\Sigma}(t)$ の遷移速度は、 $f_s$ に等しく、 $f_c$ の2倍よりはるかに大きな値になります。よって、提案するRoFシステムでは、従来の $\Delta\Sigma$  RoFシステムと比べ、低い遷移速度であることにより、低コストな汎用光送受信器をミリ波帯通信向けに使用できるようになります<sup>5) 6)</sup>。これは、提案するRoFシステムが持つ強みです。

また図4に示すように、 $\Delta\Sigma$  RoFシステムのパルスパターンがランダムであるのに対し、提案するシステムは基本的に高低のレベルが時間間隔 $1/(2f_c)$ で交互に切り替わるという均一なパルスパターンを備えています。このことにより、提案するシステムは、パルスのパターンに依存するタイミングジッタの影響を受けにくい特徴を有しています。

### 3. 回路構成

第3章では、1ビットアウトフェーシング変調を用いたRoFシステムの回路構成を紹介し、図5は、提案するRoFシステムのブロック図です。

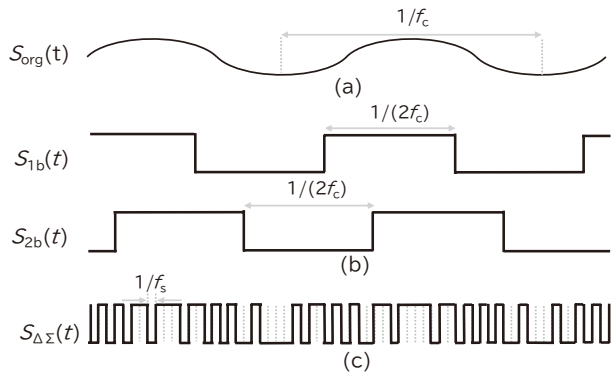


図4 (a)  $S_{org}(t)$ 、(b)  $S_{1b}(t)$ と $S_{2b}(t)$ のペア、(c) 従来の $S_{\Delta\Sigma}(t)$ の各波形

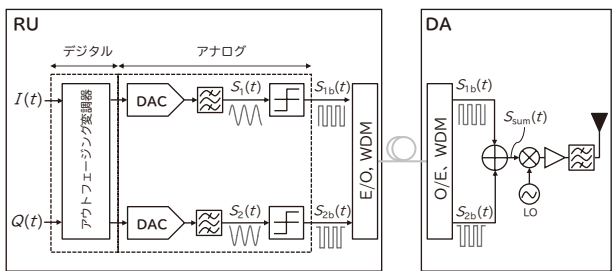


図5 提案RoFシステムのブロック図

RU (無線ユニット) 内部では、デジタルベースバンド信号のI/Q (同相成分と直交成分) がアウトフェーシング変調器に与えられ、デジタル信号処理によって中間周波数 $f_{IF}$ でのアウトフェーシング信号ペアに変換されます。出力信号はDAC、及び、アンチエイリアスフィルタを介してアナログ信号 $S_1(t)$ と $S_2(t)$ に変換されます。これらの信号は続いてコンプレータで $S_{1b}(t)$ と $S_{2b}(t)$ に変換されたのち、光ファイバを介してDAに伝送されます。WDM (波長分割多重) によりRUとDA間を、1本の光ファイバで接続することが可能です。DA内部では $S_{1b}(t)$ と $S_{2b}(t)$ が合成され、中間周波数 $f_{IF}$ のオリジナル信号が再生されます。このオリジナル信号は、例えばミリ波帯といった所望の高周波帯にアップコンバートされ、増幅とフィルタリング後、無線送信されます。

### 4. 実験結果

図6に、提案するRoFシステムを検証するための実験ベンチを示します。実験では、64QAM変調を用いた5G NR信号を用いました。また、信号帯域幅 $f_{BW}$ として100MHz及び400MHzの2種類を用いました。アウトフェーシング変調器からの出力信号ペア $S_1(t)$ と $S_2(t)$ は、AWG (任意波形発生器) 内で生成され、波長1,310nm、最大伝送速度10Gbps/チャンネル、4チャンネルを有するQSFP+ (quad small form-factor pluggable

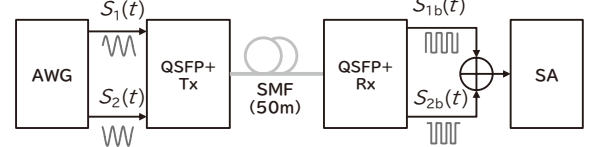
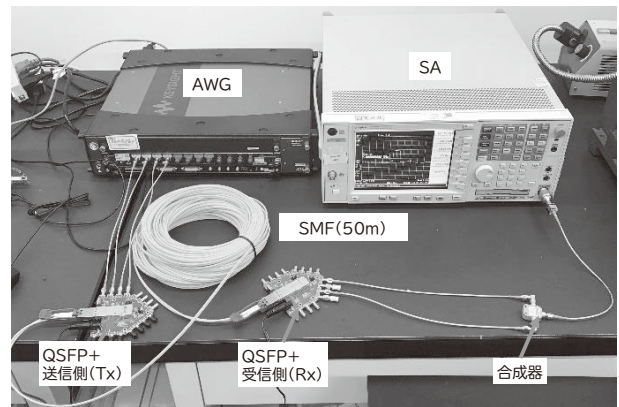
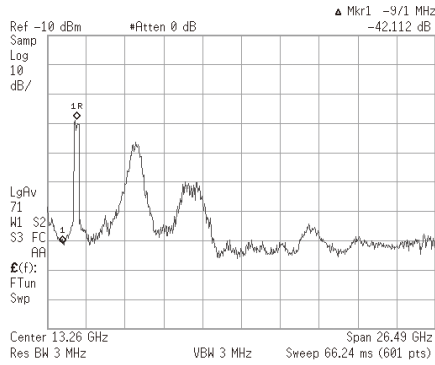
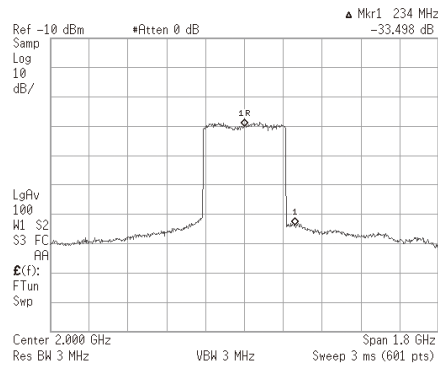


図6 提案するRoFシステム評価の実験ベンチ



(a) 26.49GHzスパン



(b) 1.8GHzスパン

図7  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ 、 $f_{BW} = 400\text{MHz}$ とした場合の測定スペクトル

plus) モジュールに入力されます。入力された信号は、本モジュール内部で矩形化され  $S_{1b}(t)$  と  $S_{2b}(t)$  となったのち、E/O変換されます。これらの信号は、屋内環境を想定して、50mのSMF（シングルモード光ファイバ）経由で受信側に伝送されます。受信側では受信した信号を合成し、スペクトルアナライザで測定します。参考実験として、AWGからの出力信号をファイバ伝送なしに合成器に直接入力した場合の測定も行いました。

図7に、 $f_{IF}$ を2GHz、 $f_{BW}$ を400MHzに設定して測定した  $S_{sum}(t)$  のスペクトルを示します。計測された ACLR は -36dB であり、3GPP規格に適合しました。

実験では、シグナルアナライザを用いてEVM（エラーベクトルマグニチュード）を測定しました。図8に示すのは、 $f_{IF}$  に対するEVMの測定結果です。実線は光ファイバ伝送時のEVM、点線は参照となる光ファイバ伝送なしのEVMを示します。円形プロットは  $f_{BW}$  が100MHzの時のEVM、ダイヤモンド形プロットは  $f_{BW}$  が400MHzの時のEVMで

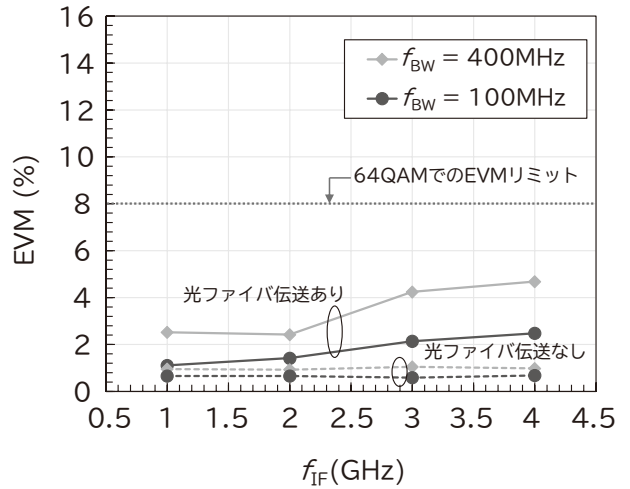


図8 計測したEVM対  $f_{IF}$

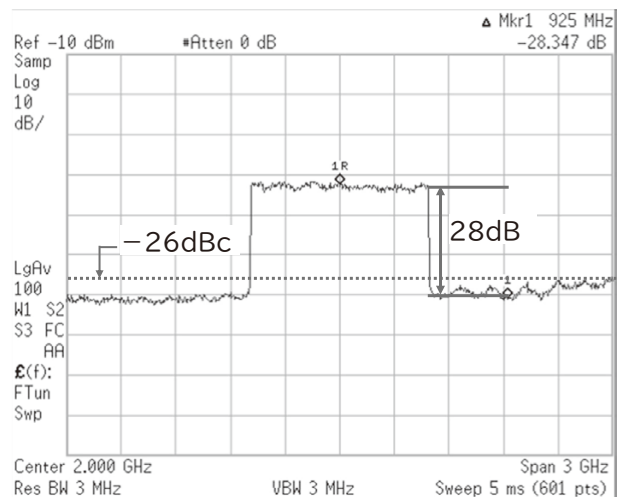


図9  $f_{IF} = 2\text{GHz}$ 、 $f_{BW} = 1\text{GHz}$ で測定したスペクトル

す。3GPP規格では64QAM方式によるEVMの上限は8%と定義されており<sup>7)</sup>、今回の測定ではすべての場合でこの制限内の結果となりました。 $f_{IF}$ が1GHzと2GHzではEVMは3%以下、3GHzでは4.24%、4GHzでは4.68%であり、64QAM 3GPP規格に適合しています。

図9は、Beyond 5G/6Gに向けた、帯域幅1GHz（10×100MHz）のOFDM（直交周波数分割多重）信号による  $S_{sum}(t)$  のスペクトルの測定結果です。SNR（S/N比）は28dBを超えており、所望チャネルと隣接チャネルの平均電力差は26dBc以上でした。これは、37～52.6GHz帯におけるACLRの3GPP規格を満たすことを意味します。

表 提案するRoFシステムと従来のRoFシステム

	[2]	[3]	提案内容	
	$\Delta\Sigma$	$\Delta\Sigma$	1ビットアウトフェーシング	
$f_c$ または $f_{IF}$ (GHz)	0.96	25	2	2
$f_s$ (GHz)	5	100	-	-
SNR (dB)	30	29.1	33.4	28
EVM (%)	2.8	3.76	2.85	5.7
$f_{BW}$ (MHz)	252	500	400	1,000
デバイス速度(Gb/s)	5	100	4	4
チャンネル数	1	1	2	2
帯域効率(MHz/Gbps)	50.4	5	100	125
ACLRに関する 3GPP規格に適合	不適合	適合	適合	適合

## 5. 考察

本稿では、提案するRoFシステムの性能を、デバイスコストの観点で従来のRoFシステムと比較して検討しました。表は、提案するRoFシステムと従来の $\Delta\Sigma$  RoFシステムとの性能を比較したものです。光送受信器に求められるデバイス速度は、今回提案するRoFシステムでは $f_{IF}$ の2倍ですが、 $\Delta\Sigma$  RoFシステムにおいては、サンプリング速度に等しくなります。帯域効率は、 $f_{BW}$ と各光送受信器のチャンネル当たりに必要なデバイス速度との比として定義されます<sup>2)</sup>。NECが提案するRoFシステムの帯域効率は世界最高の値であり、ACLRに関する3GPP規格に適合しています。

## 6. むすび

本稿では、1ビットアウトフェーシング変調を用いたRoFシステムを提案しました。このシステムは3GPP規格を満たす最大の帯域効率を備えています。これは、当システムが5G/6G向け屋内モバイルネットワークに低コストで適用できることを意味します。

## 7. 謝辞

本研究は、総務省委託研究「電波資源拡大のための研究開発(JPJ000254)」の成果の一部です。

## 参考文献

- 1) J. Liu, J. Wu, J. Chen, P. Wang, and J. Zhang: Radio Resource Allocation in Buildings with Dense Femtocell Deployment, 2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp.1-5, 2012.8  
<https://doi.org/10.1109/ICCCN.2012.6289286>
- 2) J. Wang et al.: Delta-sigma Modulation for Next Generation Fronthaul Interface, Journal of Lightwave Technology, vol.37, no.12, pp.2838-2850, 2019.6  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2872057>
- 3) H. Li, M. Verplaetse, J. Verbist, J. Van Kerrebrouck, L. Breyne, C.-Y. Wu, L. Bogaert, X. Yin, J. Bauwelinck, P. Demeester, and G. Torfs: Real-Time 100-GS/s Sigma-Delta Modulator for All-Digital Radio-over-Fiber Transmission, Journal of Lightwave Technology, vol.38, no.2, pp.386-393, 2019.7  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2931549>
- 4) K. Kunihiro, S. Hori, and T. Kaneko: High Efficiency Power Amplifiers for Mobile Base Stations: Recent Trends and Future Prospects for 5G, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals, vol.E101-A, no.2, pp.374-384, 2018.2  
<https://doi.org/10.1587/transfun.E101.A.374>
- 5) S. Hori, Y. Kase, N. Oshima, and K. Kunihiro: Radio-over-Fiber Systems with 1-bit Digital Modulation for 5G/6G Indoor Wireless Communication, 17th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (IEEE VTS APWCS 2021), 2021  
<https://doi.org/10.1109/APWCS50173.2021.9548764>
- 6) Y. Kase, S. Hori, N. Oshima, and K. Kunihiro: All-digital Outphasing Modulator for Radio-over-Fiber System, 2020 50th European Microwave Conference (EuMC), 2021.1  
<https://doi.org/10.23919/EuMC48046.2021.9338002>
- 7) 3GPP TS 38.104: Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 18), V18.0.0, 2022.12

Copyright(C)2023 IEICE

Y. Kase, S. Hori, N. Oshima, K. Kunihiro: Radio-over-Fiber System with 1-bit Outphasing Modulation for 5G/6G Indoor Wireless Communication, IEICE Transactions on Electronics, 2023.7, DOI: 10.1587/transele.2022ECP5043

## 執筆者プロフィール

堀 真一

ワイヤレスアクセス開発統括部  
プロフェッショナル

加瀬 裕真

ワイヤレスアクセス開発統括部

大島 直樹

海外モバイルソリューション統括部  
プロフェッショナル

國弘 和明

ワイヤレスアクセス開発統括部  
シニアプロフェッショナル

# NEC 技報のご案内

NEC 技報の論文をご覧いただきありがとうございます。  
ご興味がありましたら、関連する他の論文もご一読ください。

NEC技報WEBサイトはこちら

NEC技報 (日本語)

NEC Technical Journal (英語)

## Vol.75 No.1 オープンネットワーク技術特集

～オープンかつグリーンな社会を支えるネットワーク技術と先進ソリューション～

オープンネットワーク技術特集よせて  
NECのオープンネットワークに向けた技術開発と提供ソリューション

### ◆ 特集論文

#### Open RANとそれを支える仮想化技術

Open RANがもたらすイノベーション  
モバイルネットワークにおける消費エネルギー削減  
自己構成型スマートサーフェス  
Nuberu: 共有プラットフォームによる高信頼性のRAN仮想化  
vrAln: vRANにおけるコンピューティングリソースと無線リソースのためのディープラーニングベースのオーケストレーション

#### 5G/Beyond 5Gに向けた無線技術

グリーン社会の実現に向けたNECにおける5G/Beyond 5G基地局のエネルギー効率化技術開発  
双方向トランシーバアーキテクチャを備えたミリ波ビームフォーミングICとアンテナモジュール技術  
5G/6G屋内ワイヤレス通信向け1ビットアウトフェーシング変調による光ファイバ無線システム  
空間分割多重を用いた28GHz帯マルチユーザー分散Massive MIMO  
28GHz帯マルチユーザー分散MIMOシステムを用いたOTFS変調信号のOTA測定  
Sub6GHz帯アクティブアンテナシステムにおける空間多重性能の改善  
トランジスタ非線形モデルを使用しないブラックボックスドハティ増幅器の設計手法  
最大8マルチユーザー多重化を実現する39GHz帯256素子ハイブリッドビームフォーミングMassive MIMO

#### オープンAPN (オープン光・オール光)の実現への取り組み

APN実現に向けたNECの取り組み～Openな光ネットワーク実現に向けて～  
APN実現に向けたNECの取り組み～APN製品(WXシリーズ)の特長～  
APN実現に向けたNECの取り組み～フィールドトライアル～  
オールフォトニクスネットワークを支えるシリコンフォトニクス光源による波長変換技術  
NEC Open Networksを支える光デバイス技術～800G超の光伝送技術～

#### コア&パリアーネットワークへの取り組み

カーボンニュートラルな社会の実現に向けたデータプレーン制御を支える技術  
5G時代の人々の暮らしを支えるNECのネットワークスライシング技術  
Beyond 5G、IoT、AIを活用したDX推進を支えるアプリケーションアウェアICT制御技術  
通信事業者向け5Gコアネットワークにおけるパブリッククラウド活用

#### 高度なネットワークサービスを提供する自動化・セキュア化への取り組み

OSSにおける運用完全自動化へのNECの取り組み  
利用者の要件に基づくネットワークの自律運用技術とセキュリティ対応の取り組み  
情報通信ネットワークの安全性を向上するセキュリティトランスペアレンシー確保技術  
ネットワーク機器のサプライチェーン管理強化に向けた取り組み

#### ネットワーク活用ソリューションとそれを支える技術

通信事業者向け測位ソリューション  
5Gのポテンシャルを最大限に引き出すトラフィック制御ソリューション(TMS)  
ローカル5G向け小型一体型基地局「UNIVERGE RV1200」及びマネージドサービス  
産業DXを支えるローカル5G活用によるパーティカルサービス  
ローカル5G、LAN/RAN融合ソリューション

#### グローバル5G xHaulトランスポートソリューション

トランスポートネットワークの高度化を実現するxHaulソリューション・スイート  
xHaulトランスフォーメーションサービス  
xHaulトランスポート自動化ソリューション  
5G/Beyond 5Gにおける固定無線トランスポート技術  
Beyond 5Gに向けたSDN/自動化  
高効率・大容量無線伝送を実現するOAMモード多重伝送方式

#### Beyond 5G/6Gに向けて

Beyond 5G時代に向けた取り組み

### ◆ NEC Information

2022年度C&C賞表彰式典開催



Vol.75 No.1  
(2023年6月)

特集TOP