

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

大島 直樹 堀 真一 PANG Jian 白根 篤史 岡田 健一 國弘 和明

要旨

5G (第5世代移動通信システム) では、ミリ波を用いた高速通信サービスが期待されています。ミリ波の大きな距離減衰や強い直進性を克服して、効果的に利用するには、フェーズドアレイアンテナによるビームフォーミングが不可欠です。本稿では、5Gにおけるミリ波の普及に向けてキーとなるBFIC (ビームフォーミングIC) とアンテナを小型・低コストに集積するフェーズドアレイモジュール技術を紹介し、65nm CMOSを用いて開発したBFICは、TX (送信) とRX (受信) の信号経路を共有する双方向トランシーバ回路を採用することで、チップ面積を縮小しています。また、28GHz BFICを用いたフェーズドアレイモジュールの開発例を紹介し、これらの技術は、5GやBeyond 5G向けミリ波無線装置の競争力向上に貢献するものです。



ミリ波/5G/フェーズドアレイ/CMOS/アンテナインパッケージ/ウエハーレベルパッケージ

1. はじめに

5G (第5世代移動通信システム) は、4K/8Kなどの高精細映像の伝送や、VR/ARなどの新しいサービスの普及に向けて、従来に比べ10倍に相当する10Gbit/s以上の高速通信を目指しています。その実現のため、5Gでは、より広い信号帯域を利用できるミリ波帯 (30~300GHz) を使用しています。しかし、ミリ波は、距離減衰が大きく直進性も強いので、建物の陰の部分に電波が届きにくいなど、移動通信には適用しにくい特性を有しています。ビームフォーミングは、アンテナから放射する電波を空間合成し、特定の方向に集中したビームを形成する技術で、ミリ波の課題解決に不可欠な技術です。通信したい無線装置の方向に放射電力を集中させることにより、通信距離の拡大が可能になります。また、ビーム方向を切り替えることにより、移動体への追従も可能です。更に、ビームフォーミングは、伝送データの空間多重にも適用できるため、周波数の利用効率を向上し、通信容量を増大することもできます。フェーズドアレイ技術は、ビームフォーミングを無線装置で実現するための手段です¹⁾。

本稿では、ビームフォーミング用IC (集積回路) やアンテナモジュールを中心に、フェーズドアレイ無線機の実装

技術について述べます。

2. フェーズドアレイ無線機の構成

ミリ波帯を無線通信に使用する場合、通信距離の拡大が大きな課題となります。搬送波の周波数が高くなると、自由空間伝搬損失は大きくなります。したがって、ミリ波帯でマイクロ波帯通信と同様の無指向性アンテナを使用すると、十分なリンクマージンを確立できません。そのため、フェーズドアレイ技術を用いたビームフォーミングによって、通信距離を拡大することが有効です。ここでは、ミリ波フェーズドアレイ無線機の基本構成を解説します。

フェーズドアレイには、アクティブ方式とパッシブ方式がありますが、5G向け基地局や端末では、各アンテナ素子に増幅器を備えたAPAA (アクティブフェーズドアレイアンテナ) が広く利用されています。更に、APAAは、位相や振幅の制御の仕方によって、アナログ方式とデジタル方式に分類されます²⁾。ミリ波帯通信では、数百MHzといった広い帯域幅の信号を扱うため、デジタル方式ではA-DやD-Aコンバータなどの消費電力が大きくなるうえに、デジタル信号処理の計算量も膨大になってしまいます。そのため、アナログ方式が一般的に用いられています。

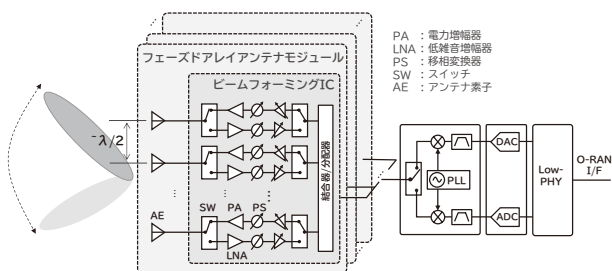


図1 5G向けミリ波フェーズドアレイ無線機の構成

図1に、アナログ方式のフェーズドアレイ無線機の構成を示します。各アンテナ素子は、PA（電力増幅器）やLNA（低雑音増幅器）に加え、位相や振幅を制御するPS（移相器）やVGA（可変利得増幅器）に接続されます。BFIC（ビームフォーミングIC）は、これらの機能素子を集積したもので、5G用のミリ波BFICでは、用途に応じて4～32アレイを集積しています。図1は、RF（無線周波数）移相方式の構成を示していますが、他にもLO（局部発振器）またはIF（中間周波数）移相方式を採用した報告もあり、変復調回路との境界はそれぞれの構成で異なります^{3) 4)}。フェーズドアレイ無線機に、PHY層やMAC層の機能をどの範囲まで組み込むべきかに関しては、端末や基地局など装置ごとに異なるため、さまざまな実装形態が存在します。

3. BFICとアンテナモジュールの設計

今回開発したBFICにおいて、アレイコア部のチップ面積は独自の双方向トランシーバ回路技術により、通常の約半分まで縮小しています⁴⁾。具体的には、図2に示すように、双方向増幅器と双方向ベクトル移相器（PS）及びPA（電力増幅器）-LNA（低雑音増幅器）を兼ねた双方向フロントエンド増幅器で構成されます。基本となる双方向増幅器の回路図を、図3に示します。双方向増幅器のコア部は、クロスカップリング接続された2組の差動対で構成されています。コア部のTXとRXは、テールトランジスタのM3とM6を切り替えることで選択できます。図3の(a)と(b)は、それぞれTXモードとRXモードの動作を示しています。トランジスタM1、M2、M4、M5は同じサイズであるため、どちらの動作モードでも動作していないトランジスタの寄生容量が、動作しているトランジスタのゲートドレイン間の帰還を中和する働きをし、増幅器の利得改善

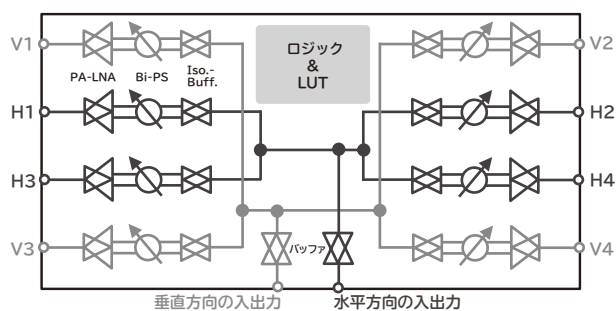


図2 開発したミリ波BFICのブロック図

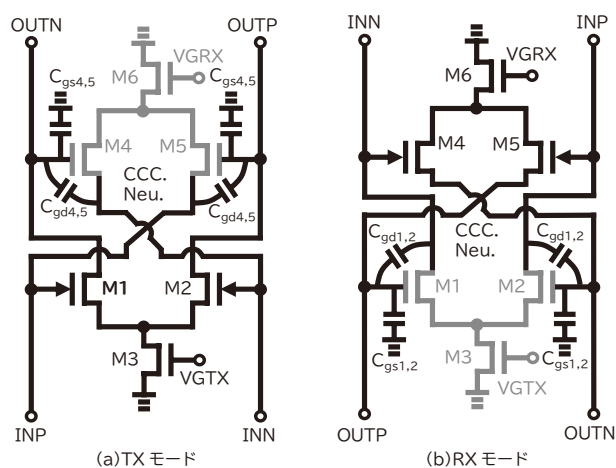


図3 双方向増幅器の回路図

と安定動作を実現しています。更に、必要なチップ面積をできるだけ小さくするため、増幅器を構成する伝送線路からなるインピーダンス整合回路をTXモードとRXモードで共通化しています。ミリ波の周波数帯においては、今回提案したコア部に必要なインピーダンス整合条件はモード切り替えの間も大きく変化することはありません。そのため、TXモードでもRXモードでも、同一の伝送線路でのインピーダンス整合が可能になります。この結果、高性能で面積効率の高い双方向増幅器の実現が可能になります。

APAAでは、およそ波長の1/2の間隔で配置された多数のアンテナ素子とBFICを接続する必要があります。周波数が高いほど配線損失が大きくなることから、ミリ波帯で低損失なモジュールを実現するためには、BFICとアンテナ素子をできるだけ近くに配置しなければなりません。無線基地局用のAPAAモジュールは、通常、64～512個のアンテナ素子を制御するために十数個から数十個の

BFICを使用します。図4に示すように、アンテナとBFICのモジュール実装形態は、AoB（アンテナオンボード）とAiP（アンテナインパッケージ）に大別されます。

AoBの場合、アンテナ素子はPCB（プリント基板）の表面に、BFICは裏面に実装されます。AoBの第一の利点は、汎用PCBを使用できるためコストを低く抑えられることです。更に、BFICの背面へヒートシンクを直接接続できるため、放熱構造が簡易になります。この点も、発熱が大きい無線基地局へ適用する際に大きな利点となります。

AiPの場合、アンテナを半導体ICのパッケージに形成してから、PCB上に配置されます。AiPは半導体パッケージ技術を利用するため、PCBに比べ、設計ルールが微細で製造精度が高いという利点があります。AiPは、通常、アンテナ素子数が4～32程度の比較的小規模のアレイに適用されます。そのため、基地局で使用するような大規模なアレイに適用する場合には、図4（b）に示すようにタイル状に並べて配置する必要があります。スケラビリティが高いことに加え、AiP単位でテストができることも利点として挙げられます。

AiPとAoBのどちらを選択するかは、搭載されるフェーズドアレイ無線装置の規模や実装要件に応じて決められます。

4. 実装と評価結果

図5に、開発した28GHz BFICのチップ写真とブロック図を示します。低コストで量産に適した65nm CMOS技術を利用しており、チップの大きさは4mm×4mmと、

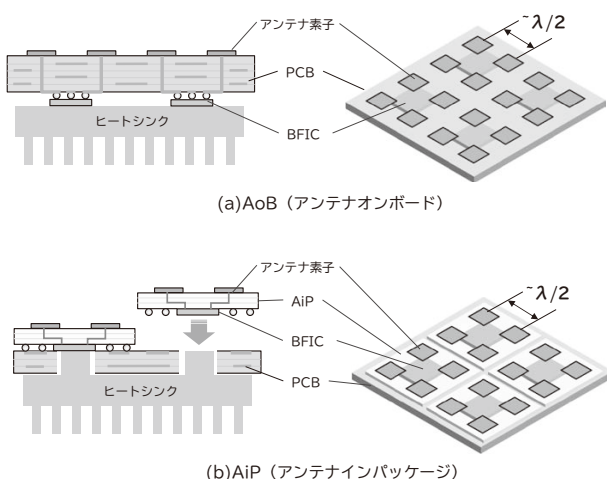


図4 ミリ波APAAモジュールの実装形態

8チャンネルを集積したBFICとしては、最小クラスです。このICは、DP（二重偏波）-MIMOをサポートするため、水平偏波と垂直偏波用にそれぞれ4チャンネルのトランシーバを搭載しています。トランシーバ部分は、第3章で述べたように、フロントエンド増幅器だけでなく可変利得増幅器及び移相器も双方向アーキテクチャを採用しています。このBFICを用いて、AoBタイプとAiPタイプのAPAAモ

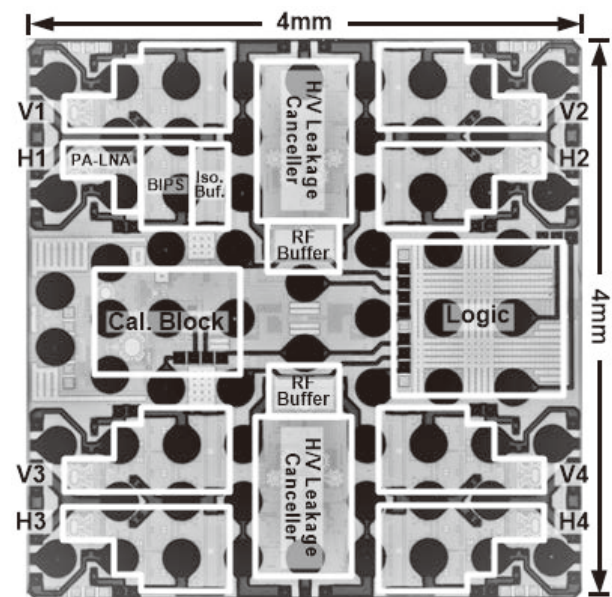


図5 65nm CMOSによる28GHz帯8チャンネルBFIC

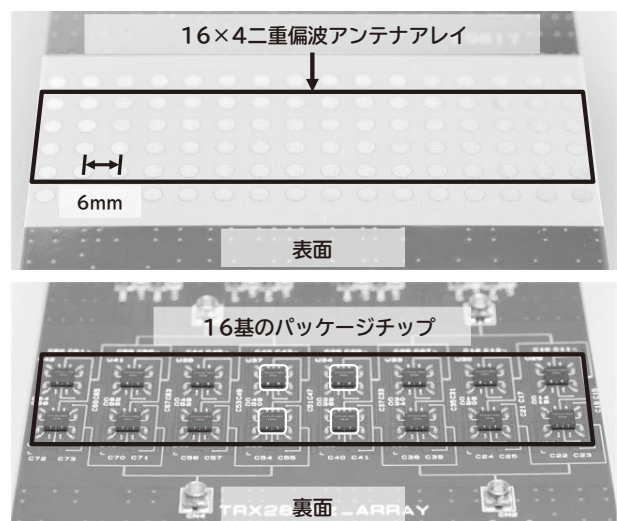


図6 AoBタイプの16×4素子28GHz APAAモジュール

ジュールを開発しました。

図6に、開発したAoBタイプのAPAAモジュールを示します。アンテナ素子は、28GHzに対して0.56波長(λ)に相当する6mm間隔で並んだ構成をしており、16×4素子のアンテナ部の面積は縦3cm×横10cmです。損失を減らすため、アンテナ素子とBFICの間の配線は、4つのアンテナ素子を一組にして1つのBFICと接続することで、最短になるよう設計しています。AoBに使用するBFICは、実装サイズと損失を最小化するためにFan-in型のWLP(ウエハーレベルパッケージ)技術を採用しています。OTA(Over The Air)による測定にて、64素子の二重偏波フェーズドアレイモジュールで52.2dBmのピークEIRP(等価等方輻射電力)を達成しました。DP-MIMO EVMの測定結果は、5G NR準拠の256-QAM信号で3.4%でした。このBFICとAoBについては参考文献4)で詳細に報告されています。

AiPは、chip-last工法によるFan-out WLP技術を用いて、2×2二重偏波フェーズドアレイアンテナを開発しました。AiPのサイズは、13mm×13mm×0.47mmです。RDL(再配線層)の最上層には、2×2の矩形パッチ

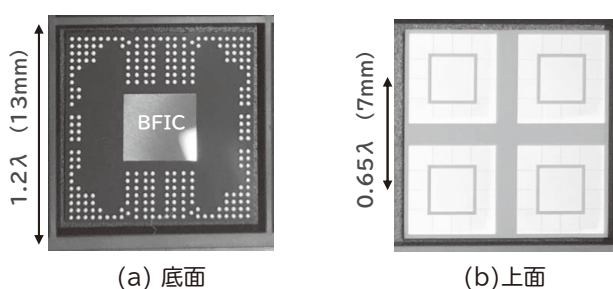


図7 2×2素子28GHzフェーズドアレイAiP

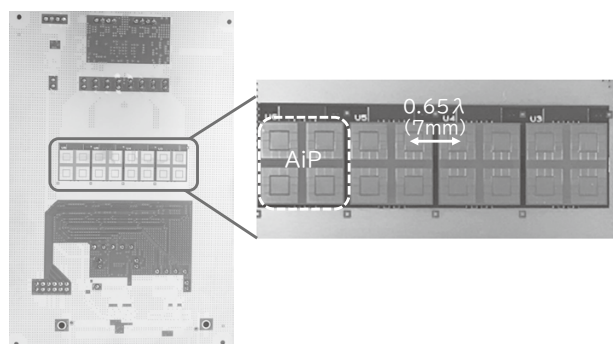


図8 AiPタイプの2×8素子28GHz APAAモジュール

アンテナを搭載しています。アンテナの間隔は7mmであり、28GHzでは0.65λに相当します。このAiPは、並べた時に、隣接するAiP間のアンテナ間隔を0.65λに保つように2次元スケーラブルな設計となっています(図7)。そのため、PCB上に4つのAiPを実装し、図8に示すような8×2素子のAPAAモジュールを構成しました。

試作したAiPで構成されたAPAAモジュールを用いてOTA評価を実施しました。AiPは、TXモードに設定し、受信機としてVNA(ベクトルネットワークアナライザ)と標準ホーンアンテナを1mの距離に設置して評価しました。ビームフォーミングICは、FPGAでSPI(シリアルパリティフェーザルインタフェース)経由で制御しました。

動作するアンテナ素子数を増やしていくと、図9に示すように、EIRPは6dB/octaveの理論に近い勾配で増大しており、今回開発したAiPのスケーラビリティが実証されました。16個のアンテナ素子を動作させると、ピークEIRPは偏波あたり40.5dBmを達成しました。

図10に、8×2素子のアンテナを角度分解能1°で評価した時のビームパターンを示します。3dBビーム幅は±40°、サイドローブは-13dB以下でした。

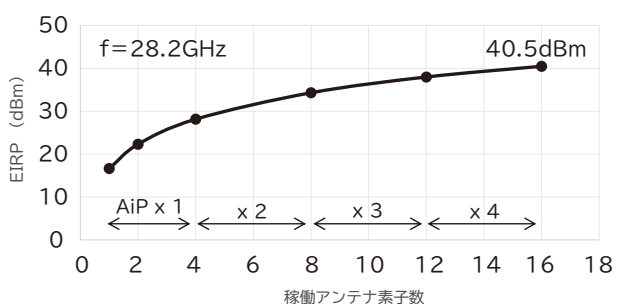


図9 AiPタイプAPAAモジュールで測定したEIRP

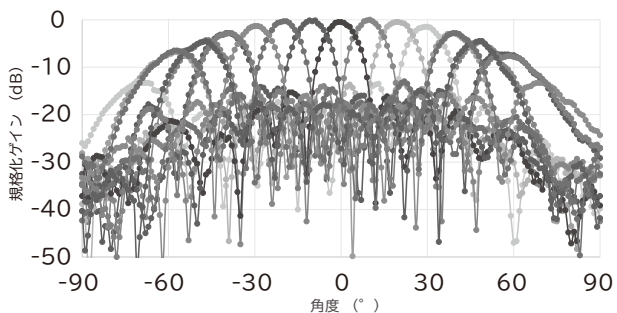


図10 8×2 AiPタイプAPAAモジュールで測定した方位角ビームパターン

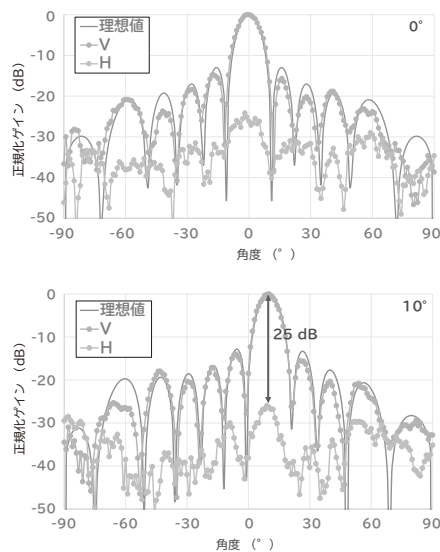


図11 8×2 AiPタイプAPAAモジュールの
ビーム角度0°及び10°における方位角ビームパターンと
交差偏波アイソレーション

図11は、ビーム方向が0°の場合と10°の場合の実測と理想ビームパターンの比較を示したものです。両者は良い一致を示すとともに、偏波間アイソレーションも25dB以上が得られています。これらの良好なビームパターンは、AiPの高い製造精度を実証するものです。

5. まとめ

本稿では、5Gで使用するミリ波フェーズドアレイ無線機について、主にBFICとアンテナモジュールの実装技術を中心に説明しました。BFICでは、双方向トランシーバ回路を採用することで、チップサイズを縮小しました。65nm CMOSで開発した28GHz BFICを用いて、AoBとAiPの2種類のタイプのAPAAモジュールを試作し、二重偏波対応64素子フェーズドアレイAoBと、4素子のスケーラブルAiPの良好な特性を実証しました。これらのBFICとフェーズドアレイモジュール技術は、5G及びBeyond 5G/6G移動通信システム向けに、低コストで小型なミリ波帯無線装置を実現する際にキーとなる技術です。

6. 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) NEC: Beyond 5G ホワイトペーパー技術編, 2022.3
https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/pdf/NEC_B5G_WhitePaper_technology.pdf
- 2) 國弘和明、岡田健一: 5Gを実現するミリ波CMOS回路技術, 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.11, pp.1123-1129, 2018.11
- 3) J. Pang, et al.: A 28-GHz CMOS Phased-Array Transceiver Based on LO Phase-Shifting Architecture With Gain Invariant Phase Tuning for 5G New Radio, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.54, No.5, pp.1228-1242, 2019.5
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8662773>
- 4) J. Pang, et al.: A CMOS Dual-Polarized Phased-Array Beamformer Utilizing Cross-Polarization Leakage Cancellation for 5G MIMO Systems, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.56, No.4, pp.1310-1326, 2021.4
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9316256>

Copyright(C)2022 IEICE

K. Okada, J. Pang, A. Shirane, N. Oshima, K. Kunihiro: Millimeter-wave Phased-array Transceiver for 5G and Beyond, Journal of IEICE, Vol. 105, No.8, pp.706-712, 2022.8

Copyright(C)2022 APMC

N. Oshima, S. Hori, J. Pang, A. Shirane, K. Okada, K. Kunihiro: A Low-Profile, Scalable 28-GHz Phased Array Antenna in Fan-Out Wafer-Level Package for 5G Communication, 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.359-361, 2022.12

執筆者プロフィール

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

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

PANG Jian

東京工業大学
特任准教授

白根 篤史

東京工業大学
准教授

岡田 健一

東京工業大学
教授

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ジ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