

情報をすばやく見つけ、すばやく運ぶ、プロトコルとハードウェア

■概要

当研究室では、多様化する利用環境や求められる通信品質に対応する「革新的ネットワーク技術」と、エンドユーザへの大容量通信を支える「光アクセス基盤技術」の研究開発を行っている。

1. 革新的ネットワーク技術

ネットワークを利用するアプリケーションやサービスからの要求を満たすネットワークを提供する技術の研究開発を行う。具体的には、ネットワーク制御の完全自動化を目指した「ネットワーク構築制御自動化技術」として、各サービスへの仮想ネットワーク資源（リンクの通信速度やサーバの計算能力）の適切な分配、サービス間の資源調停、論理ネットワークの構築等を自動化する技術、ネットワークインフラの構造や通信トラフィック等が変化してもサービスの品質を保証する技術に関する研究を行う。

また、ネットワークを流通する大容量コンテンツや、ヒトとモノ及びモノとモノの情報伝達等をインターネットプロトコルより効率良くかつ高品質に行うため、データやコンテンツに応じてネットワークの最適な品質制御や経路制御等を行う「新たな識別子を用いた情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術」に関する研究を行う。

平成30年度は以下の計画に沿って、研究を実施した。

- (1) ネットワーク構築制御自動化技術として、大規模デバイス管理のためのIoTディレクトリサービスの設計と開発、サービス間の資源分配・調停及び論理網構築等の設計と開発、IoTエッジコンピューティングを対象としたネットワーク内データ処理の再構成及びネットワークインフラ資源調整を可能とする研究開発を行う。
- (2) 新たな識別子を用いた情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術（ICN/CCN: Information/Content Centric Networking）において、最適な通信経路設定機能及びネットワーク内符号化によるエラー訂正やデータ信頼性向上を実現するトランスポート機能に関する研究開発を行う。また、NICTが開発したICN/CCN通信基本ソフトウェア（Cefore）に

対する高速データ転送機能の開発や、ICNオープンテストベッドの機能拡張を行う。

2. 光アクセス基盤技術

IoT（Internet of Things）や拡張現実感（Augmented Reality: AR）などの将来の魅力的な社会システムを支えるためには、ネットワークの大容量化や機能のフレキシビリティ向上などの基盤技術が重要となる。アクセス網などのより身近な中短距離通信では可動性が注目され、光と無線をシームレスに融合するための情報通信基盤技術が要となる。そのため、光と高周波（ミリ波やテラヘルツ波など）を高度に融合することを可能とする革新的なデバイス技術とそれを活用したネットワークシステム技術の研究開発が重要となり、本研究室では光と高周波を高度に融合することを実現する超小型・機能集積デバイス技術を「パラレルフォトンクス基盤技術」として、また光と高周波による情報通信をシームレスにかつ100 Gbps級の大容量で実現する伝送サブシステム技術を「100 Gアクセス基盤技術」として研究を推進している。平成30年度は以下の計画に沿って、研究開発を実施した。

- (1) パラレルフォトンクス基盤技術：小型・高密度化に伴う光・高周波クロストークの制御技術、耐環境性に優れた高安定デバイス駆動技術及び異種材料の個々の特徴を活かした光・高周波機能集積デバイス技術による送受信モジュール実装に関する研究を実施し、光・無線融合伝送や空間多重光伝送システム等のコヒーレント信号伝送での動作検証を行う。
- (2) 100 Gアクセス基盤技術：光と高周波間の信号相互変換技術を用い40 Gbps超級の光・無線シームレス伝送を可能とする高い空間多重度や高い周波数利用効率に関する光・高周波融合伝送基盤技術の研究及び光や高周波等の伝送メディアを意識させない伝送サブシステムの研究に着手する。リニアセルシステムやミリ波バックホールを対象としたフィールド試験の評価を基に光ファイバ無線技術等の実環境利用の検証を行う。

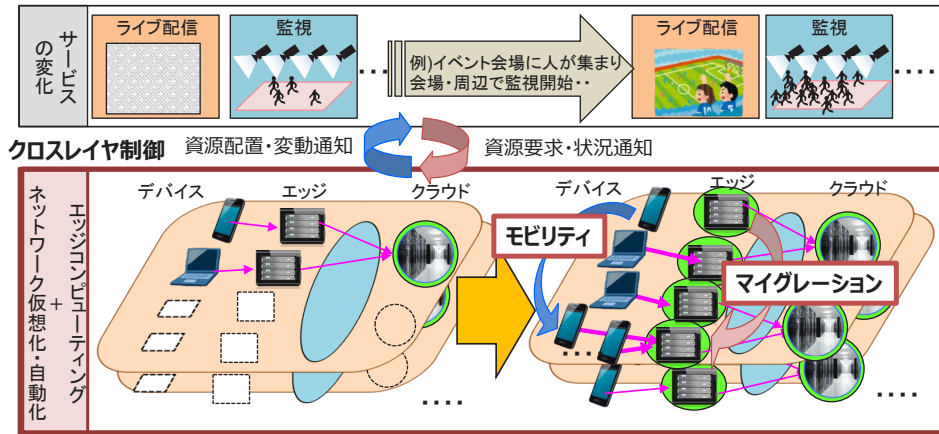


図1 ネットワーク構築制御自動化技術

■平成30年度の成果

1. 革新的ネットワーク技術

(1) 代表的な外部発表を以下に示す。

- IEEE Transaction on Network and Service Management (TNSM) 誌に1件掲載。
- IEEE Transaction on Big Data誌に1件採録。
- IEEE Transaction on Network Science and Engineering (TNSE) 誌に2件採録。
- IEEE Communications Standard Magazine誌に1件掲載。
- ITU Kaleidoscope 2018 国際会議で1件採択（最優秀論文賞を受賞）。
- 国際標準化文書として、IETF RFC 8487を策定。
- 国際標準化提案として、IETF OPSAWG、PIM WG 及びIRTF ICNRG、NWCRCGでインターネットドラフトを提案。
- 国際標準化提案として、ITU-T FGML5G (Focus Group on Machine Learning for Future Networks including 5G) に4機関合同で寄書を提案。
- IEEE ICC 2019に1件、IEEE ICIN (International Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks) 2019に2件、IEEE Globecom 2019に

4件採択。

(2) ネットワーク構築制御自動化技術

- ①多様なサービスのための仮想ネットワーク自動構築制御の全体設計(図1)を行い、IEEE Communications Standard Magazineに掲載された。また、ネットワーク構築技術で用いられる機械学習・AI技術を分類し、ネットワーク制御自動化に不可欠であるネットワークスライスの設計、構築、展開、運用、制御、管理を担うネットワーク機能を定義した成果が、ITUの旗艦国際会議であるKaleidoscope 2018で最優秀論文賞を受賞した。
- ②仮想ネットワーク内のサービスに必要な資源量を見積りエラスティックな資源割当を行う自律型資源制御技術(ARCA: Autonomic Resource Control Architecture)(図2)のアルゴリズム改良を行い、通信サービス維持に必要な計算コスト(資源総量、運用時間、資源調整時間、パケット棄却によるペナルティ、から導出)を、既存のARCAを含む関連手法と比較して12%以上削減可能であることを確認した。
- ③サービス機能チェイニング(SFC: Service Function Chaining)を応用し、サービス品質要求及びトラヒック時変動に応じて複数のサービス間で計算資源を自動調停する技術(IA-SFC: Intelligent Adaptive SFC)にAIを適用したネットワーキング技術研究を開始し、総務省直轄委託プロジェクトを4機関で受託した。当該技術の基本設計に関する成果について、ITU-T FGML5Gに、受託機関合同で寄書を提案した。
- ④IoTエッジコンピューティング技術に関する取組として、ネットワークエッジに置かれた計算資源を発見する分散アルゴリズムを設計・実装し、十万個の計算資源がある状況でも数ミリ秒以内に資源発見で

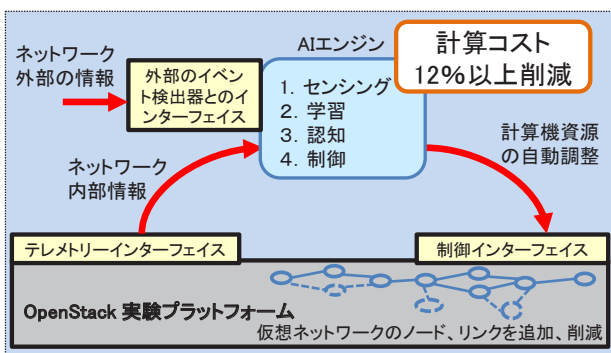


図2 ネットワーク資源自律制御技術 ARCA

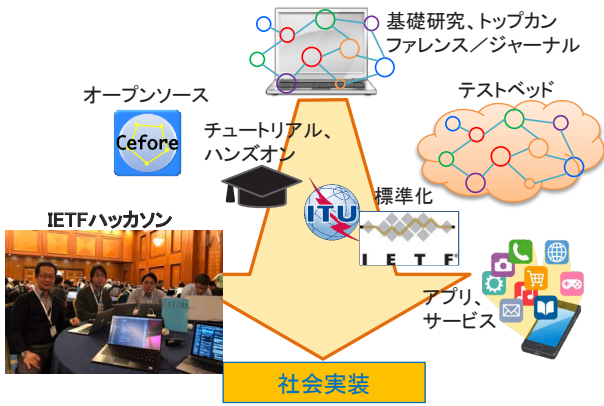


図3 ICN/CCN研究の社会実装に向けた取組：基礎研究、オープンソースCefore及びテストベッド開発、そして国際標準化活動へ

きることをシミュレーションにより確認した。また、移動端末がある環境でも低遅延応答を維持可能なクロスレイヤ制御に基づくインフラ層の制御手法を設計・実装し、テストベッド上で動作を確認した。

(3) 情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術

コンテンツそのものを示す名前などの識別子を指定してネットワークからコンテンツを取得する「情報指向ネットワーク (ICN/CCN)」の研究開発として、ネットワーク内キャッシュ保護のため、ICNルーター間認証機能の詳細設計を行い、IEEE TNSE誌に投稿し採録された。また、大量のデータ交換を、ICNを活用して行うためのアーキテクチャを提案し、IEEE Trans. on Big Data誌に投稿し採録された。またIEEE Infocom 2017にて発表した高品位ストリーミングを目的とするL4C2 (Low-Loss Low-Latency Streaming using In-Network Coding and Caching) の知見を基に、ネットワーク内符号化によるデータ信頼性向上を実現するトランスポート機能 (DAS2C) を設計した。研究成果の社会実装に向けた取組として、当研究室が開発しているICN通信を実現する

オープンソースであるCeforeに関するハンズオン (電子情報通信学会)、実装紹介 (IRTF)、ハッカソン (IETF) を実施した (図3)。ICNオープンテストベッドであるCUTEiの機能拡張を行い、欧州の研究・学術ネットワークであるGEANTへの接続を成功し、現在実施中の日欧委託研究 (ICN2020) の実証基盤として稼働させるに至った。国際標準化活動として、IRTF NWCRCG及びIRTF ICNRGにて提案したドラフトが、共にリサーチグループ・ドラフトに認定された。

2. 光アクセス基盤技術

(1) パラレルフォトンクス基盤技術

小型・高機能集積ICTデバイスを実現するためには、光源や受光素子の小型化、高集積化に関する基盤技術が重要となる。波長可変光源は、情報通信に欠かせないキーとなるハードウェアであるが、従来はレンズなどのバルク素子を組み合わせた外部共振器構造が用いられてきた。このため光源装置は大型となり、身近な中短距離通信等に利用できるようなハードウェアではなかった。今回、デバイスを構成する個々の材料特性を最大限に活かす「適材適所」の発想に基づいた「ヘテロジニアス技術」を活用することで、図4左に示すような非常に小型な波長可変光源モジュールの開発に成功した。これは、化合物半導体量子ドットによる光増幅素子とシリコン半導体材料を用いた波長選択光回路を光結合した構成である。光学接着剤等を適切に利用した光導波路の結合・実装技術により、温度モニタや制御電極を含めて1 cm以下の小型化に成功し、これは従来の光源の大きさに比較して約1,000分の1の体積縮小である。

マルチコア光ファイバ等の空間多重伝送方式は、データセンタ内などの中短距離通信でも効果的である。このマルチコア光ファイバの大容量データを一括で受信する

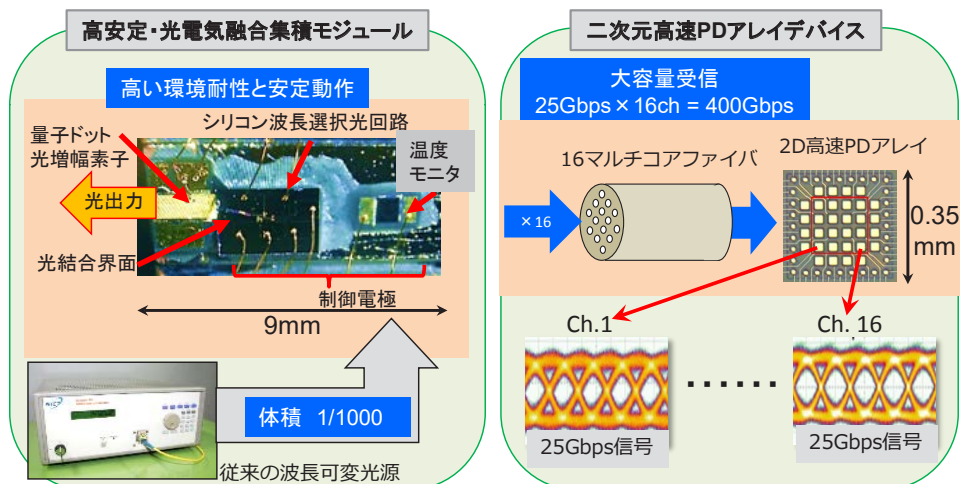


図4 超小型・高機能集積ICTデバイス：ヘテロジニアス波長可変光源と二次元高速PDアレイデバイス

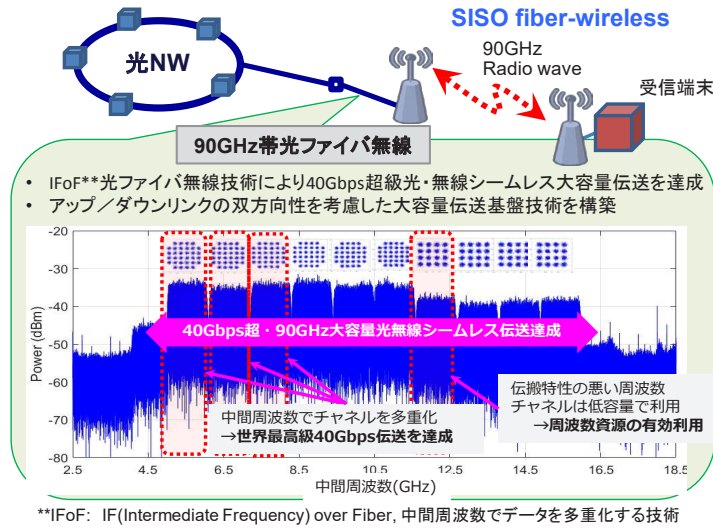


図5 中間周波数を用いた40 Gbps超級大容量光ファイバ無線技術

ためのデバイスとして、図4右の二次元フォトディテクタ (Photo-detector: PD) アレイを開発した。この二次元PDアレイを用いた25 Gbps/chのOOK (On-Off Keying) 信号を16コア同時に伝送する受信サブシステムの構築し、総容量400 Gbpsの大容量伝送に世界で初めて成功した。これらパラレルフォトニクス基盤技術として、小型・集積化された革新的な光源や受光素子に関する研究結果は、光通信分野のトップカンファレンスに採択されるなど、学術的に高い評価を受ける成果につながった。

(2) 100 Gアクセス基盤技術

アクセスネットワークは身近な情報通信であり、光と無線を高度に融合することが今後更に求められる。第5世代モバイル通信システム (5G) の初期導入が2020年に設定されているが、NICTでは更にその先の革新的な情報通信技術の研究開発を目指し、光・高周波のシームレス伝送による100 Gbps級情報通信を実現するための基盤技術の開発をターゲットとしている。図5に今年度開発した中間周波数帯を用いた光ファイバ無線技術 (Intermediate Frequency over Fiber: IFoF) を示す。無線区間は90 GHz帯域を利用し、中間周波数を活用することで、複数のチャンネルを周波数軸上でパッケージ化でき、光や高周波などのキャリア周波数の変化に対してシームレスに、大容量伝送を実現することが可能となる。また、高周波の空間伝播ではチャンネルのクオリティ変化が顕著となるが、図5のグラフのように、チャンネルごとに多値度をアダプティブに変化させ、周波数帯域を効率的に利用した通信が可能となる。このIFoF技術を用いて40 Gbpsの大容量伝送に成功し、またアップリンクについても100波長チャンネルで10 Gbps級の大容量伝送を達成した。本成果は、光通信分野のトップカンファレンスに採択されるなど、学術的に高い評価を受ける成

果となった。また、これらは5G以降の光/無線融合アクセスネットワークの構築に重要となる基盤技術であり、技術の確立と高度化に向けて更なる研究開発を進める計画である。

(3) 社会実装へ向けた取組

NICTでは新素材 (半導体量子ドット構造) を高品質に作製する技術を立ち上げ、それを用いたレーザ光源や光増幅器など革新的なデバイスの研究開発を実施してきた。今回、この量子ドット技術を更に高度化し、企業との密な連携により図6に示すような世界初となる新規波長帯域1,100 nmの波長飛びのない高精度・低ノイズ波長可変光源の開発に成功した。本光源は計測等への利用展開を探索するとともに、新たな波長帯域の確保としてT帯 (Thousand band: 1,000-1,260 nmの波長帯域) の情報通信への利活用も検討する。今後も、NICTで研究開発した基盤技術について、早期から積極的に産学官連携を図り、新技術の社会展開を推進する。

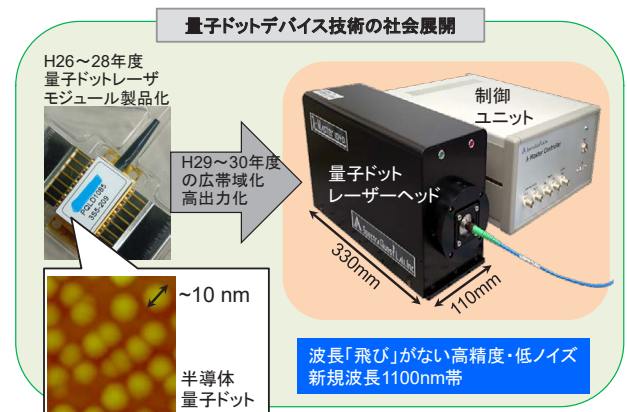


図6 量子ドットデバイス技術の社会展開