

小さな部品と情報の交通整理、見えない技術が未来社会を支える

■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を研究する。

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28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、通信トラフィック変動等に基づき複数のサービスへの資源の分配や調停を行う認知型調停機構自動化等の基本設計を行う。
- (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として、コンテンツ名を用いた通信を実現する経路制御及びトランスポート技術などの基本設計を行う。

2. 光アクセス基盤技術

近年のコンテンツ大容量化に伴い、ユーザ端末等が直接つながる身近なアクセスネットワークも、更なる高速・大容量化が求められている。そのニーズに応えるためには、ネットワーク機器の大容量はもちろん、小型化や高機能・多機能化を実現する、より高度なICTデバイ

ス技術が重要となる。また、利用者端末やIoTデバイスではケーブルを必要としない無線化が必須になりつつあり、光を媒体とする大容量有線ネットワークと、ミリ波やテラヘルツ波等の周波数が高い電波を用いた大容量無線通信をシームレスに利用できる情報通信基盤技術が必要となる。

そこで、デバイス機能の高速化や高精度化と同時に、多数のデバイス機能の並列化を極限まで進めることで、全体として大容量送受信を達成する「パラレルフォトニクス基盤技術」と、光と周波数の高い電波を高度に融合することで通信メディアを意識しない100 Gbps級（現在の100倍から1,000倍）の有線・無線シームレス通信を目指す「100 Gアクセス基盤技術」の研究開発を行う。

平成28年度は以下の計画に沿って研究を実施した。

- (1) 「パラレルフォトニクス」として、高密度集積化に伴う光・高周波クロストークの計測・制御技術、コヒーレント光伝送に向けた超小型波長可変光源技術及び光ファイバ無線のためのミリ波帯シンセサイザ技術と小型・高精度二波長発生ハードウェア技術に関する研究開発を行う。
- (2) 「100 Gアクセス」に係る基盤技術として、光と高周波（100 GHz超）融合に関する基盤技術の研究と、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利用検証を行う。

■平成28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。
 - ①IEEE Communications Magazine誌（インパクトファクタ5.125）に2件掲載。
 - ②IEEE Infocom 2017メインカンファレンスに2件採録（過去5年で国内の採択数は22。今回の採択292（採択率20%）中、国内からの採択数は6）。
 - ③難易度が高い（論文採択率30%未満）国際会議で、3件の論文発表。
 - ④3.2ネットワークシステム研究所項に述べたITU-T Y.3071の勧告化に貢献するなど、ITU-T、IETF/IRTFで標準化活動を実施。

(2) ネットワーク構築制御自動化技術

地理的に分散配置された多数のIoTデバイスからのデータを低遅延で処理するIoTエッジコンピューティング環境を対象とした研究に着手した。本研究では、インフラ層とプラットフォーム層の2階層のアーキテクチャを考案した。図1に、ひとつのインフラ上で動作する複数のプラットフォームがあり、個々のサービス(ライブ配信、交通案内等)がユーザに提供される例を示す。このように、ひとつのインフラ上で複数のサービスが実行できるようにすることで、インフラ提供者は効率的に資源活用ができ、サービス提供者は自前の設備がなくてもユーザへサービスすることができるようになる。インフラ層については、独自のインターフェース構造を設計した。200基地局を想定したシミュレーションによる基礎評価を行い、サービス側が要求する低遅延処理やインフラ側に求められる省電力性を損ねることなく、階層間の制御メッセージ量を従手法に比べ1/100に削減する効果を得られる可能性を確認した。プラットフォーム層においては、本環境において膨大な数のデータフローに対しフローごとに処理資源を割り当てる分散フロー処理プラットフォームを設計した。基礎評価を行い、1,000個のセンサーが毎秒10,000個のデータを生成するデータフロー処理で、100ミリ秒内の高速で資源割り当ての動的変更ができることを確認した。

さらに、多様なサービスそれぞれの品質要求を満たすネットワークを提供するため、インフラが提供する資源を動的に変更する認知型調停機構の自動化の研究を実施し、急激な環境変動が起きても人工知能的な技術を活用した資源マイグレーションによってサービス品質を向上させる手法を設計した。また、ネットワーク・サーバ挙動の監視・複合イベント処理(分析)・割付・調整を繰返しサービスに必要な資源量を見積る自動資源調整方法

の設計と設定自動化(図1)の設計に着手し、サーバへの負荷に応じてサーバ増減等のネットワーク構成変更をできることをエミュレーションで確認した。

(3) 情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術(ICN/CCN: Information/Content Centric Networking)

本来、人間が欲しているのはサーバへのアクセスではなく、コンテンツ(もしくは情報)の取得であるという考えに基づき、「コンテンツを取得するためにサーバのIPアドレスを調べてそのサーバにアクセスし、そこからコンテンツ取得する」という従来の通信プロトコルの無駄を排除し、「コンテンツそのものの識別子を指定してコンテンツ要求を行い、自分の近くにあるネットワーク機器やPCからコンテンツを取得する」ことを可能とする「情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術」の研究を実施している。この技術は、ネットワークを効率的に利用し、結果として、応答性能が高く、品質が良い通信を実現する。

当研究室では、3.2ネットワークシステム研究所項に記したように、コンテンツ名を用いた通信を実現する経路制御及びトランスポート技術の研究として、高品位ストリーミングを目的とするCCNベースのL4C2(Low-Loss Low-Latency Streaming using In-Network Coding and Caching)の基本設計及びシミュレーション評価を行った。L4C2はマルチキャスト、ネットワーク内キャッシュとコーディング、データの部分再送、マルチパスを主な構成要素とする(図2)。L4C2ではビデオデータを複数のデータに分割し、①マルチキャスト機能によってデータを複数の経路で分配、②通信途中のデータ損失を受信側で再生成できるように、ネットワークコーディング機能によって冗長データを生成し、ネットワーク内キャッシュに保管、③データ欠損を検知した場合にはキャッシュされたデータを再送、④これらのデータを複数の経

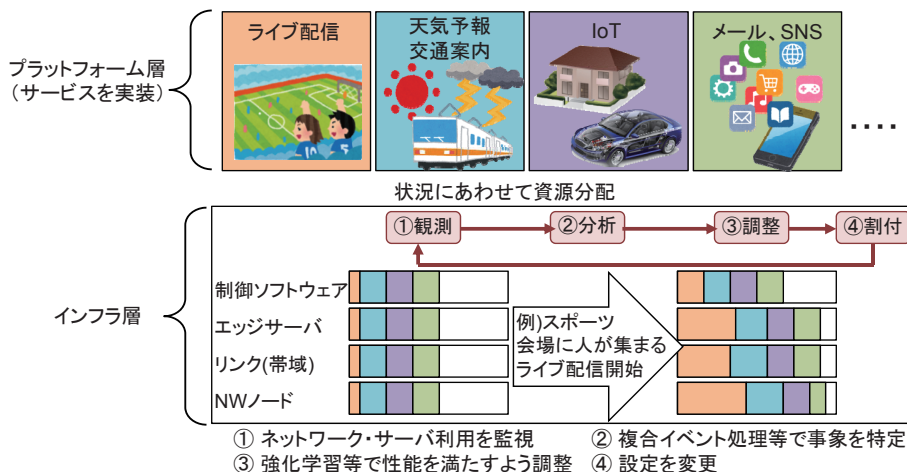


図1 複数のサービスが動作するインフラにおける認知型調停機構の自動資源調整イメージ

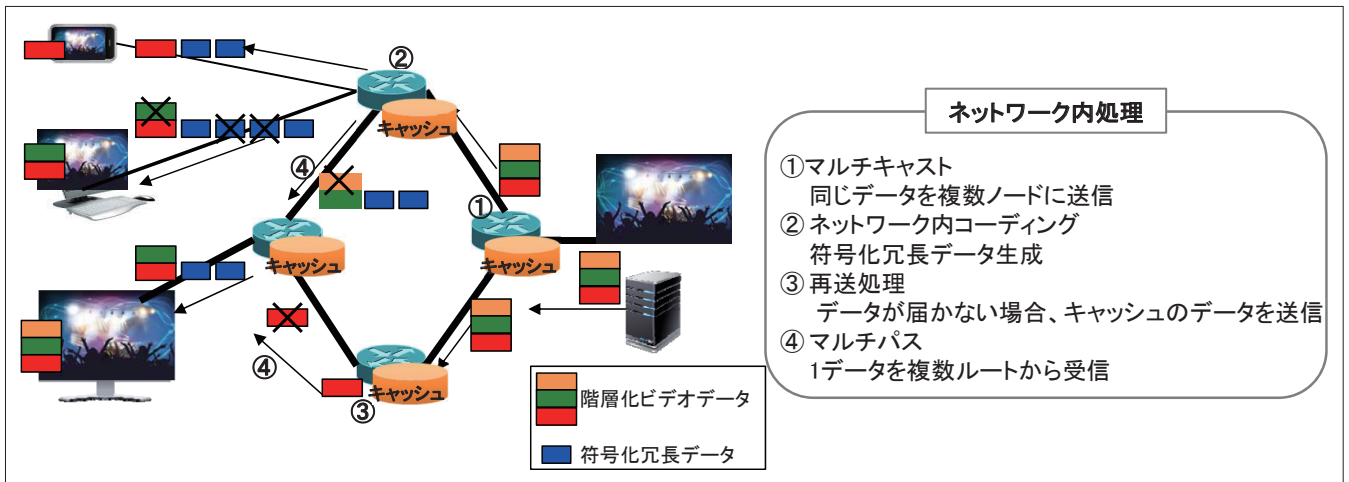


図2 コンテンツ名を用いた高品位ストリーミング (L4C2)

路を用いて受信端末に送信する。

また、受信するデータ損失を最小限に抑えるため、ストリーミングアプリケーションが許容する最大遅延及びネットワーク内リンクの遅延とデータ損失率を推定し、それらに基づいて、ネットワーク内キャッシュ機能と符号化機能を用いた損失データの復元を行い、低遅延かつ高品質なストリーミングを実現する。

L4C2は、CCNの代表的方式CCNxと比較して制御トラフィックを80%削減し、ユーザ体感品質を最大25%向上することをシミュレーションによって明らかにした。本成果は、ネットワーク分野における世界最高峰のフラッグシップ国際会議IEEE Infocom 2017に採択された。

2. 光アクセス基盤技術

(1) パラレルフォトニクス基盤技術

より身近な中短距離通信で利用可能な小型・高機能ICTデバイスを実現するために、デバイス材料の適材適所（材料の特長を最大限に引き出す）の発想の下に異種材料を融合する「ヘテロジニアス技術」と、光と高周波の融合を実現するための機能集積デバイス技術の研究開発を推進した。シリコンフォトニクス集積光回路（Si photonics integrated circuit：Si-PIC）と化合物半導体による高性能量子ドット光ゲインデバイスを融合し、従来テーブルトップサイズ（一辺が数10 cm程度）であった広帯域波長可変量子ドット光源の超小型化（0.002 cc、図3）に世界で初めて成功した。本光源は超小型でありながら、図4に示すように波長1200-1244 nm（8 THzの広帯域）の光生成が可能である。これは、従来の光通信に利用されているCバンド（波長1530-1565 nm、帯域4 THz）のおよそ2倍の周波数帯域となり、利用可能な通信チャネル数の増大に貢献する。また、同集積技術を用い単一の超小型集積光デバイスで二波長を同時に

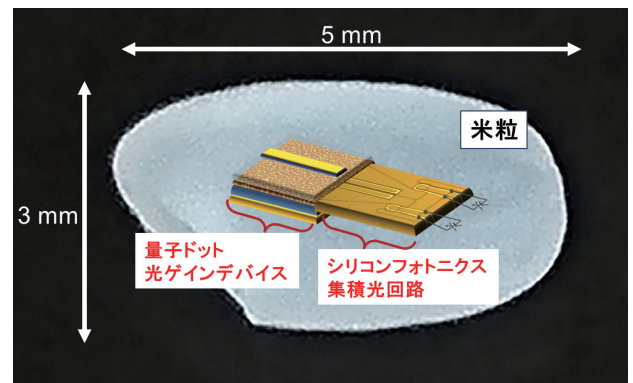


図3 超小型（米粒より小さい）広帯域波長可変量子ドット光源

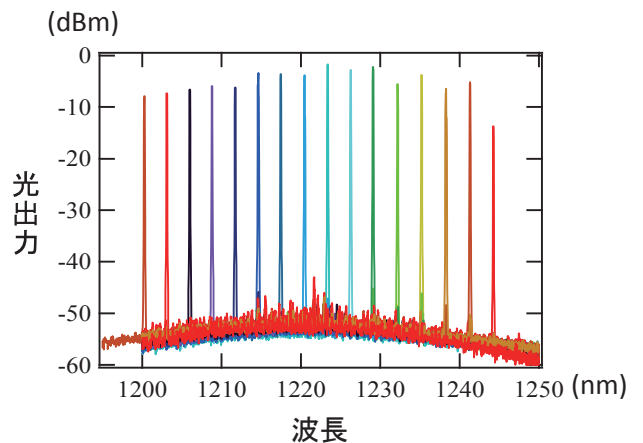


図4 広帯域波長可変量子ドット光源が生成する光の波長特性

生成することに成功し、その成果は光通信関連で著名な国際会議Optical Fiber Communications Conferenceの招待講演に採択された。

当研究室では、無線信号と光信号をシームレスに変換し伝送するための光ファイバ無線技術の基盤技術として、光電気変換技術进行研究している。この技術をさらに発展させ、デバイス駆動電力線が不要な100 GHz級で動作する超高速・高効率光電気変換デバイスの開発に成功

した。また、同デバイスとマルチコアファイバ伝送技術を活用し、100 GHz級高周波信号とデバイス駆動のためのエネルギーを光ファイバで同時に配信・給電する技術を世界に先駆けて確立した(図5)。

本技術により無線アンテナの電力供給線が不要となり、シンプルなアンテナ構成が可能となる。これらの研究成果は、世界最大級の光デバイス関連国際会議The Conference on Lasers and Electro-Opticsで最優秀論文(通称ポストデッドライン論文)の特別セッションに採択された。

(2) 100 Gアクセス基盤技術

アクセスネットワークでは、無線通信部の大容量化・高周波化だけでなく、いかに効率的に、かつ早く無線信号を光ファイバ通信ネットワークに収容するかが大きな課題である。その課題を解決する技術としては、光ファイバ無線技術が非常に有効であると考えられている。この光ファイバ無線の大容量データの送受信に必要な基盤技術として、ミリ波やテラヘルツ波等の周波数が高い無線信号の波形を、光ファイバを介して遠方まで配信するための高精度・高周波基準信号の生成技術「ミリ波／

THz帯基準信号源」の動作実証に成功した。

これまででは、100 GHzを超えるような周波数の高い無線信号を生成・配信することは困難であったが、当研究室で培った高度光波制御技術を応用し、1 THzを超えるような広帯域にわたって周波数間隔の整った光コム信号を生成させる技術を確立することで達成した。図6は、実験の概要図と開発した光コム生成技術を組込んだ高精度基準信号源で無線信号の波形を生成し、無線で送信した周波数1 THz信号の16値直交振幅変調(Quadrature Amplitude Modulation: QAM)信号の復調コンスタレーション図であり、誤差ベクトル強度(EVM: Error Vector Magnitude) 17%程度の良好な変復調を確認した。また、同「ミリ波/THz帯基準信号源」を用い、光と75-100 GHz、300 GHz、1 THz無線信号の相互変換(光・無線・光ブリッジ伝送)の動作実証に成功し、光通信と周波数が高い無線通信のシームレスな接続を可能とする革新的技術を確立した。これらは、第5世代移動通信システム(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、技術の確立に向けて更なる研究開発を進める。

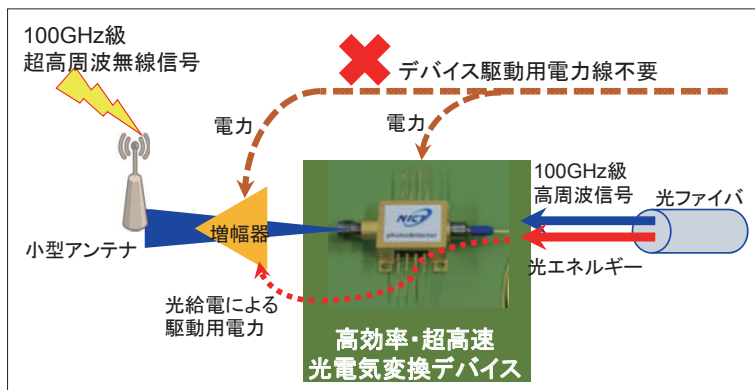


図5 高周波信号とデバイス駆動のエネルギーを光ファイバで同時に配信・給電する技術

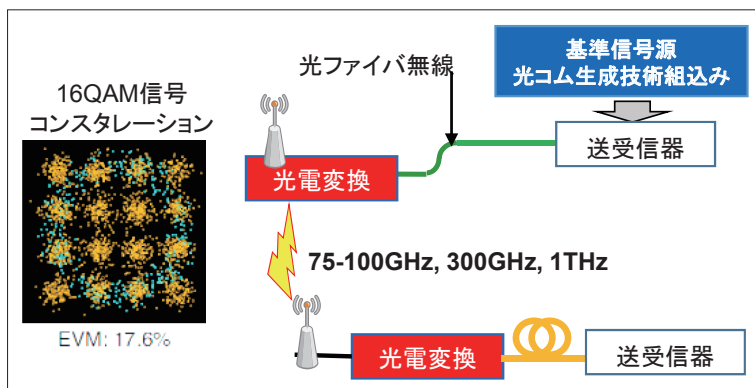


図6 光と高周波をシームレスに融合する光ファイバ無線のための基盤技術