

小さな部品と情報の交通整理、未来社会を支える見えない技術

■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29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、ネットワーク環境の変化に俊敏に対応するサービス品質保証のためのエラスティックサービス性能安定化機構、資源の認知型調停機構の詳細設計等を行う。

(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、(ICN/CCN: Information/Content Centric Networking)における高効率ネットワーク内分散キャッシュ機能の詳細設計等を行う。

2. 光アクセス基盤技術

IoT (Internet of Things) や拡張現実 (AR: Augmented Reality) などの高度な社会インフラを実現するために、ネットワークの大容量化やフレキシビリティ向上などの高度な機能性を支えるためのネットワーク基盤技術が重

要となる。特にアクセス系ネットワークなどの中短距離における高速・大容量通信を実現するためには、高い可動性が注目されることから、光を媒体とする大容量な有線ネットワークと、ミリ波やテラヘルツ波等の高周波を用いた無線ネットワークをシームレスに接続・融合するための情報通信基盤技術が必要となる。そのため、光と高周波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システム基盤技術の研究開発が重要となり、本研究室では小型なチップ内で光と高周波を高度に融合することを可能とする機能集積デバイス技術を「パラレルフォトニクス基盤技術」として、また光と高周波を高度に融合することで100 Gbps級の有線・無線シームレス伝送を目指す技術を「100 Gアクセス基盤技術」として研究を推進している。平成29年度は以下の計画に沿って、研究開発を実施した。

(1) 高密度かつ高精度な送受信・交換を実装するICTハードウェア基盤技術「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・制御技術とそれを駆使した超小型・超高速パラレル光受信技術、超小型波長可変光源を用いたコヒーレント信号伝送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、それらの高安定動作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) 間の信号相互変換技術を用いた10 Gbps超の光・高周波相互変換と伝送技術、高速波形転送技術「SoF (Sensor on Fiber)」の原理検証等による光・高周波融合に関する基盤技術の研究を実施するとともに、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等での利用検証を行う。

■平成29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^{*1} Transactions on Networks and Service Management誌 (平成29年インパクトファクタ 3.134) に1件掲載、1件採録。
- IEEE Communications Standards Magazine (平成

29年創刊)に1件掲載。

- IEEE/IFIP NOMS (Network Operations and Management Symposium)2018のメインカンファレンス(直近5回の採択率が25~30%であり、2018年は採択数56に対し国内からの採択論文は2)に採択等、論文採択率30%未満または旗艦会議と位置付けられている主要な国際会議で、11件の論文発表または採択。
- IETFの2つのWG、IRTFの4つのRGでインターネットドラフトを提出(IETFではWGドラフト扱い)、ITU-T SG13でドラフト作成に着手するなど、標準化活動に関連した発表を実施。

(2) ネットワーク構築制御自動化技術

今のクラウドやネットワークでは、1つのインフラ上に複数のサービスプラットフォームがあり、それぞれのプラットフォームで個々のサービス(ライブ配信や監視など)の情報が流通し、処理され、ユーザにサービスが届けられている。このように、1つのインフラ上で複数のサービスを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ができるようになる。

これからの社会では、人々の行動変化や環境変化に伴い、様々な新しいサービスがすばやく登場することが期待され、また、個々のサービスでもネットワークを流通する情報は今まで以上に変動する。そこで、概要に述べた、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継続して実施した。

具体的な成果例を以下に記す。サービス品質要求及びトラフィック時変動に応じて、CPU飽和発生や経路変更等に起因するサービス品質劣化の抑制に向け、複数の仮想ネットワークの計算・通信資源を投機的に自動分配調停する機構の応用にサービス機能チェーン(SFC: Service Function Chaining)を定め、複数のSFC間で資源を自動調停する機構を設計した(図1)。資源をサービスごとに固定に割り当てる方法と比較し、全てのサービス機能チェーンにおけるCPU飽和発生頻度を90%以上低減でき、サービス品質向上に寄与できることを確認した。さらに、ネットワーク・サーバ挙動の監視・分析・調整・割付を繰返して各仮想ネットワーク内でサービスに必要な資源量を見積る「エラスティック資源割当ARCA(Autonomic Resource Control Architecture)」を、実用性能訴求と標準化寄与のためにクラウド環境構築用のソフトウェア群OpenStack^{*2}上で資源調整プラットフォームとして実装し、RedHat^{*3} Innovation Award Asia Pacificを受賞した。IoTエッジコンピューティングの取組に関して国際会議IEEE LANMAN2017で基調講演し、国内学会で優秀研究賞を受賞した。

(3) 情報・コンテンツ指向型ネットワーク技術

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

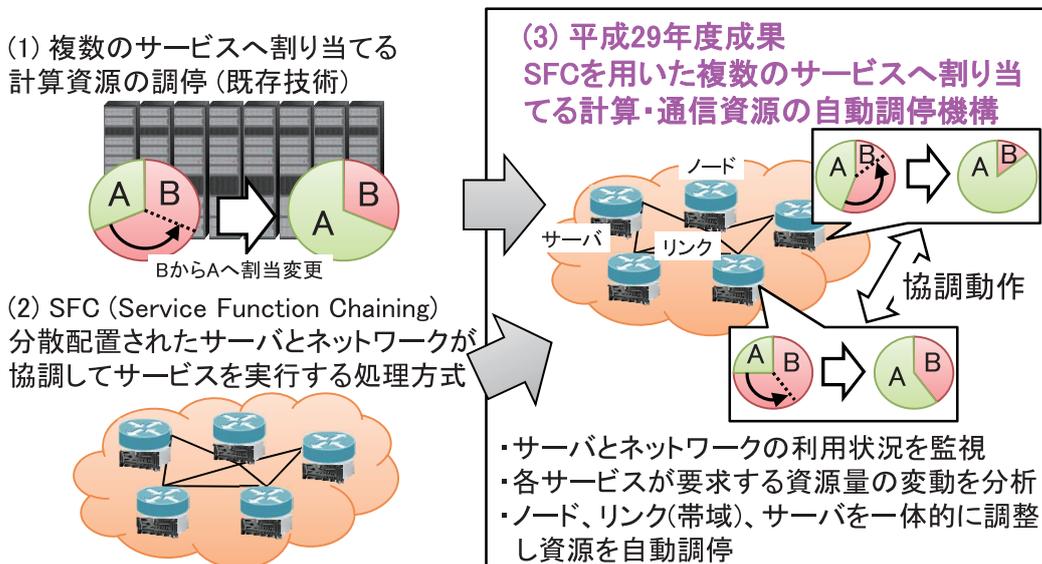


図1 複数SFC間の自動調停

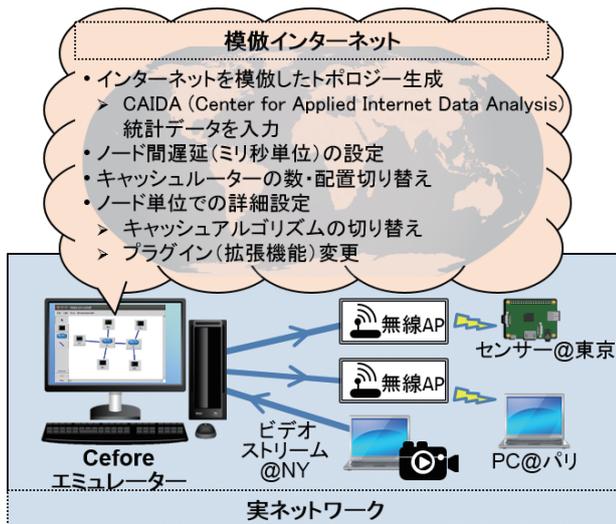


図2 Ceforeを組み込んだCCNエミュレーション

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。

平成29年度は、前年度開発に着手したICN/CCN通信基本ソフトウェアプラットフォーム「Cefore」の開発を継続して行い、安定化させ、その1stリリースをオープンソースとして公開した。Ceforeは、Linux^{*4}、Mac OS^{*5}、Raspberry Pi^{*6}、Android^{*7}上で稼働する。軽量かつ汎用的な基本機能実装 (cefnetd) と拡張機能Pluginライブラリ (キャッシュ、モビリティ、トランスポート、など) を分離することで、高性能なバックボーンルーターから軽量のセンサーノードまで幅広く動作する。電子情報通信学会でチュートリアル (2回) 及びハンズオンなど、Ceforeの普及活動を開始した。さらに、開発コードの大規模検証が容易な仮想ネットワーク環境を提供するため、Ceforeを組み込んだネットワークエミュレータ (以下、Ceforeエミュレータ) を開発した (図2)。1,000台規模のCeforeノードからなる模倣インターネットトポロジーを約1分で構成し、ネットワーク上のキャッシュ配置やキャッシュ置換アルゴリズムを自在に設定できる。さらに、実際の無線LANアクセスポイントをCeforeエミュレータに接続してエミュレーションするなど、模倣ネットワークと実通信環境を融合した実験・検証も可能にした。その他、ネットワーク内コーディング基本機能をCeforeのPluginとして実装したCefore機能の充実や、エラー訂正とデータ完全性を考慮したネットワーク内コーディング技術の詳細設計などを実施した。

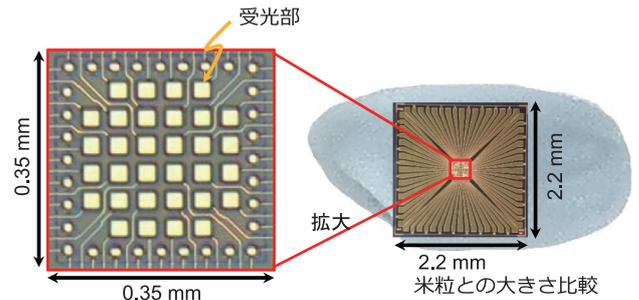


図3 超小型・高集積2次元受光アレイ素子

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

より身近な中短距離通信で利用可能な小型・高機能集積ICTデバイスを実現するために、デバイスの中で材料個々の特性を最大限に活かす「適材適所」の発想の下「ヘテロジニアス技術」を開発し、さらに光と高周波を極微小空間で高度に融合するためのクロストーク制御技術の研究開発を推進した。光ネットワークの大容量化のためにマルチコアやマルチモード光ファイバ等の空間多重伝送技術の活用が積極的に検討されているが、空間的に複雑に分布した光信号を受信側でいかにスムーズに解読するかが課題となる。これを解決するデバイスとして、図3に示す超小型・高集積2次元受光アレイ素子を世界に先駆けて開発した。この受光デバイスでは、光と高周波のクロストーク抑圧を図りつつ、わずか0.35 mm角の中に32個の10 Gbps超級の受光素子を高密度集積することに成功した。この受光デバイスを用いることで、マルチコアファイバで伝送される複数の光信号を単一デバイスで一括受信でき、さらに複数の光学モードを含むような複雑なマルチモード伝送信号を簡便に受信できることを実験的に示した。その研究成果は、世界最大級の光通信国際会議ECOC (European Conference of Optical Communication) 2017に採択され、各種メディアに取り上げられるなどの顕著な成果となった。

また、シリコンフォトンクス集積光回路 (Si-PIC : Si Photonics Integrated Circuit) と化合物半導体による高性能量子ドット光ゲイン素子を融合し、単一の超小型集積光デバイスでありながら二波長を同時に生成するミリ波シンセサイザ用超小型Two-toneレーザ光源の動作原理の実証に世界で初めて成功した。この光源から発生する二波長の周波数間隔は最大で200 GHz程度まで調整できることから、光とミリ波帯高周波を融合する情報通信のキーデバイスとして期待される。さらに、この超小型Two-toneレーザ光源等に用いる光ゲイン材料として、独自半導体結晶技術を駆使することで150℃以上の過酷環境下でも安定に動作する広帯域量子ドット光増幅チップの開発に成功した。これらの研究成果は著名国際会議

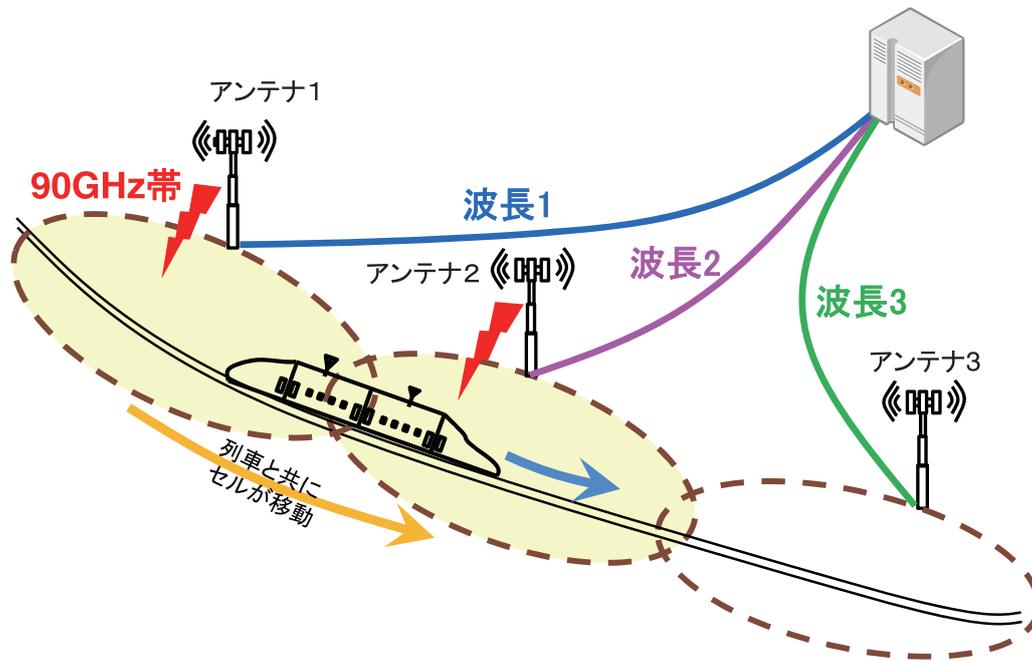


図4 高速鉄道のための“途切れない”光ファイバ無線通信技術

等の招待論文に採択された。

(2) 100 Gアクセス基盤技術

アクセスネットワークにおいて大容量で利便性の高い通信網を実現するためには、ユーザに近い無線通信領域は周波数の高い電磁波の利用が必須となり、さらにいかに早く、効率的にその大容量無線信号を光ファイバ通信ネットワークに収容・接続するかが重要な技術課題となる。光ファイバ無線技術は、光ファイバ通信と無線通信をシームレス接続することを可能とする基盤技術であり、本研究ではその大容量化に向けた研究開発を実施した。空間多重を用いた大容量無線リンク技術として90 GHzのミリ波帯によるMIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 技術を開発した。この2×2 MIMO方式による20 Gbps、16 QAM (Quadrature amplitude modulation) 信号の光・無線シームレス伝送に成功し、光通信分野のトップカンファレンスOFC (Optical Fiber Communications Conference) 2018にて招待講演を行った。

周波数が高い電磁波を利用した大容量無線システムでは、従来のシステムと比較し無線局がカバーするエリア(セル)が狭くなり、セル間を移動する際のハンドオーバーが重要なポイントとなる。特に高速鉄道等での移動中は、接続している基地局が頻繁に切り替わり、接続が途切れてしまう課題がある。この課題を解決するために、産学と連携し光技術を用いた「途切れない無線リンクを構築する基盤技術」の研究開発を行っている(図4)。平成29年度は、高速鉄道向け通信システムの要素技術として、シームレスに無線局を切り替える技術とミリ波

信号を利用した大容量無線通信技術を開発し、ファイバ無線ネットワークにおいて、無線局から20 Gbps無線信号の送信に成功した。鉄道位置情報を基に信号配信する無線局を決め、移動する列車に近い無線局へ信号を適時配信することにより、あたかも無線基地局が高速鉄道に付随して移動しているようになり、移動中も接続が途切れない通信システムの構築が可能になる。これにより時速500 kmを超える高速鉄道を光ネットワーク上で追跡しながら適宜信号を配信することが可能であることを原理的に実証した。本成果は、光通信分野のトップカンファレンスOFC2018の最優秀論文(通称ポストドドライン論文)の特別セッションに採択された。これらは、第5世代モバイル通信システム(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、技術の確立と高度化に向けて更なる研究開発を進める。

*1 IEEEは、The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.の登録商標または商標です。

*2 OpenStackの文字表記は、米国とその他の国におけるOpenStack Foundationの登録商標です。

*3 Red Hatは米国及びその他の国において登録されたRed Hat, Inc.の商標です。

*4 Linuxは米国及びその他の国におけるLinus Torvaldsの登録商標です。

*5 Mac OSは、米国及びその他の国々で登録されたApple Inc.の商標です。

*6 Raspberry Pi は、Raspberry Pi財団の商標です。

*7 Androidは、Google Inc. の登録商標です。