

コンピュータビジョン融合制御で超える超高周波無線通信性能の限界

研究代表者 西尾理志 京都大学大学院情報学研究科 助教

1 はじめに

ミリ波通信は第五世代移動体通信 (5G) や次世代無線 LAN 企画 IEEE 802.11ay など次世代無線アクセスネットワークの重要技術として研究開発が盛んに行われている [1-3]。3-300 GHz の周波数帯域を用いた大容量通信が特徴で、60 GHz 帯ミリ波通信では、1 チャンネルあたり 2.16 GHz の帯域が利用でき、シングルキャリア伝送でも最大 4.6 Gbit/s の通信が可能である。また、指向性の強いアンテナを用いて通信を行うため、周波数を空間的に再利用できるという利点がある。しかし、ミリ波通信はこれまでのマイクロ波帯無線通信とは伝搬特性が大きく異なるため、無線アクセスネットワークに適応するにあたって様々な課題が残されている。

特に大きな課題として見通し通信路遮蔽がある。ミリ波通信では人体や植物などが見通し通信路を遮ると、通信品質が大きく劣化する [4, 5]。見通し通信路で通信できない場合は回折波や反射波で見通し外通信を行うこととなるが、回折波は直接波と比べて 10 dB 以上の減衰が見込まれる。また反射波でもコンクリート製や木製の壁では反射率が 16% と低いいため使用可能な伝送レートが制限されたりフレーム損失が生じたりする。そのため人の往来が多いところで利用すると、直接波による見通し通信と回折波や反射波による見通し外通信とでは通信速度に大きな差が生じる。通信速度が低下している場合でも当該無線局が信号を送信し続けられ、周囲の無線局に干渉を与え続け、更にフレームロス増大に伴う再送が頻発するため、チャンネル利用効率が低下することが懸念される。加えて、伝送レートが極めて高いため、MAC (Medium Access Control) 制御のオーバーヘッドがデータ伝送に対して相対的に大きい。そのため、遮蔽を緩和するために頻繁なアンテナ指向性制御など複雑な MAC 制御を導入すると逆にスループットを低下させることが懸念される。同様の問題は、より高い周波数を用いた無線通信、例えば、可視光通信やテラヘルツ波通信でも生じる。

これら超高周波帯通信の中でも、カメラを用いた可視光通信 (カメラ VLC) が近年注目を集めている [6, 7]。LED を送信機、カメラのイメージセンサを受信機として通信を行う。LED 照明やスマートフォンのカメラなど既存設備を送受信機に利用できるほか、今後、人工知能サービスに向けて設置台数の増加が見込まれる監視やユーザ解析のためのカメラを受信機として使用できる。特筆すべき特徴は、受信機がカメラであるため、通信と同時にその場の状態を解析することができる点である。カメラの動画はその視野内にいるユーザやその周囲の状態に関する情報を内包している。そういった情報は、アプリケーションやサービスにのみ用いられてきた。しかし、ここには通信環境におけるユーザや遮蔽物の位置、それらの移動に関する情報といった通信制御に役立つ情報も内包されている。

本研究では、見通し通信路遮蔽と行った超高周波帯通信の課題を解決するため、カメラ動画情報を活用した新たな通信制御を検討する。具体的には、カメラ VLC の通信とセンシング能力を超高周波帯通信制御、特にミリ波通信制御に活用したミリ波-カメラ VLC のハイブリッド通信制御を提案する。VLC と無線通信のハイブリッドシステムは既に提案されている [8-12]。しかしながら、既存研究はフォトダイオードを受信機とした可視光通信を対象とし、カメラによるセンシング能力を考慮したものではない。また、既存研究はマイクロ波通信を対象としており、本研究の対象とするミリ波通信とは性質が異なる。本研究の貢献は、ミリ波通信-カメラ VLC ハイブリッドアーキテクチャ設計、カメラ情報を用いたミリ波通信制御の Proof of Concept である。

2 提案システムアーキテクチャ

ミリ波-カメラ VLC ハイブリッドシステムに基づくアプリケーション設計には、ミリ波通信とカメラ VLC を融合するアーキテクチャ設計が重要である。我々の知る限り、そのようなアーキテクチャは未だ提案されていない。本設計の重要な点は既存の機能と新たに加わる機能がシームレスに連携することにある。本研究

では、ハイブリッドシステムが有するべき機能を、ネットワーク機器ごと、および、ネットワークレイヤごとに記述する。

2-1 ネットワーク機器ごとの機能

図1にハイブリッドシステムを示す。ネットワークは、ローカル無線アクセス、ローカル有線ネットワーク、グローバルネットワークの3つに分割される。ローカル無線アクセスは独立したミリ波通信とカメラVLCユニットにより構成される。本研究では、導入や普及を容易にするため、フロントエンドデバイス（無線基地局、カメラ等）の再設計を避け、既存機器を最大限に活用することを目標とする。

カメラVLC機器は、通信に加えローカルの通信環境の情報を取得し、ローカル有線ネットワークにあるセンシングマネージャに送信する。センシングマネージャは得られたセンシング情報を統合し、通信制御に有益な情報を抽出する。例えば、ユーザの密度や基地局-端末間の通信品質、ミリ波通信や可視光通信の遮蔽予測である。同じくローカル有線ネットワークに属するコーディネータは、センシングマネージャから得た情報をもとに、SDN（Software Defined Network）ルータを制御し、トラフィックを制御する。センシング情報はインターネット上のサーバにもアップロードされ、複数のアクセスネットワークにまたがる大域的な制御や、コンテキストウェアアプリケーションなどモバイルサービスの制御に利用される。

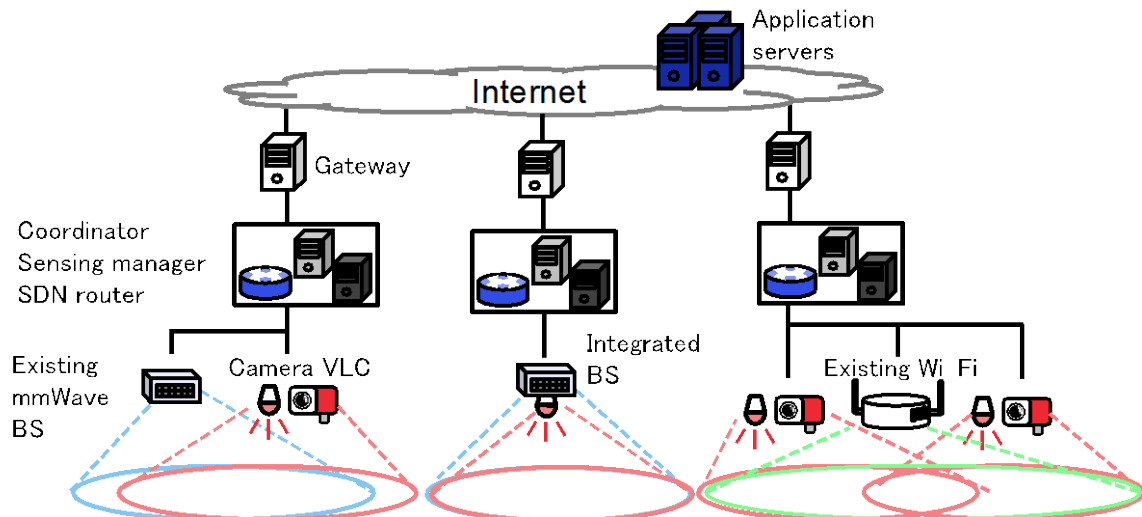


図1: システム構成

2-2 レイヤモデル

図2に提案するネットワークスタックをレイヤモデルで示す。ネットワークスタックは物理層（PHY）、媒体アクセス制御（MAC）層、ネットワーク/トランスポート層、アプリケーション層、マネジメント層で構成される。MAC層はMAC下位層とMAC上位層に分けられ、PHY層とMAC下位層がハードウェアにより実装され、その他のレイヤはソフトウェアによる実装とする。ハイブリッドシステムを従来のデバイスに対応可能とするため、PHYおよびMAC下位層に、既存のミリ波通信、VLCおよび、その他無線通信のPHYおよびMAC層の機能を定義する。

PHY層の設計において、ハイブリッドシステム特有の新機能としてプロアクティブセンシングを導入する。プロアクティブセンシングにより通信環境の視覚的な情報収集を可能とする。ミリ波通信とカメラVLCでは見通し通信が必要なため、リンク品質は通信環境のジオメトリに大きく依存する。カメラVLCによるプロアクティブセンシングにより、ジオメトリを推定しその変化を予測することによって、ユーザおよび障害物の位置および移動を予測できる。

ハイブリッドMACでは予測情報に基づく通信制御を提供する。遮蔽等によるミリ波通信のリンク品質の変化は急峻であり、遮蔽が発生した後は迅速に対応する必要がある。そのためMAC下位層の機能として定義し、マイクロ秒オーダの制御を可能とする。具体的にはアンテナ指向性制御などがある。上位MACでは、コンピュータビジョン（CV）に基づくMACを導入する。カメラによるセンシングにより、無線環境のジオメトリとそのダイナミクスを把握し、状況に応じたメディアアクセス制御を提供する。例えば、良いリンク状態が長

く続くときのみ通信を行う日和見的な通信制御が考えられる。これは、即応性を要求しない通信、例えば、大容量バックアップデータのアップロードなどに有効である。

カメラ VLC は、データ通信だけでなく、ミリ波通信の制御チャンネルとして、確認応答やアンテナ指向性制御のための制御情報、チャンネル状態、端末位置情報などを通知するために使用できる。カメラ VLC はミリ波通信とは独立した通信帯域であるため、ミリ波通信によるデータ通信と干渉しない。用途の具体例は位置情報ウェアなアンテナ指向性制御である[13]。従来のミリ波通信システムでは、MAC レイヤでのアンテナ指向性制御、特に適切な放射角を決定するためのセクタスイープが大きなオーバーヘッドとなりスループットを低下させる。そこで、制御チャンネルを用いて端末の場所を予め通知することでミリ波通信帯域を消費することなく、アンテナ指向性制御のオーバーヘッドを削減できる。

ネットワーク/トランスポートレイヤでは、プロアクティブおよびコンテキストウェアなリンクアグリゲーション機能およびネットワーキング機能を定義する。ネットワークトラフィックは、下位レイヤのカメラによるセンシング情報に基づいて管理され、ルーティングされます。加えて、従来のマルチホーミングやマルチパスルーティング制御機能[14、15]はこの層で提供される。

ローカルコーディネータとセンシングマネージャの機能を提供するマネジメントレイヤを定義する。加えて、この層にセキュリティ管理機能を定義する。カメラ VLC は、顔や動きなどのモバイルユーザに関する重要な情報を提供することができ、その情報に基づいて、認証やアクセス制限などの機能を提供する。これはハイブリッドシステムの特徴的な機能である。

アプリケーション層では、ハイブリッドシステムのセンシング機能を活用したコンテキストウェアアプリケーションやセンシング情報の共有機能を提供する。ローカルのカメラ情報は監視やユーザ解析、ナビゲーションサービス等に有用であることが想定される。そのような外部アプリケーションのための API (Application Programming Interface) を提供する。

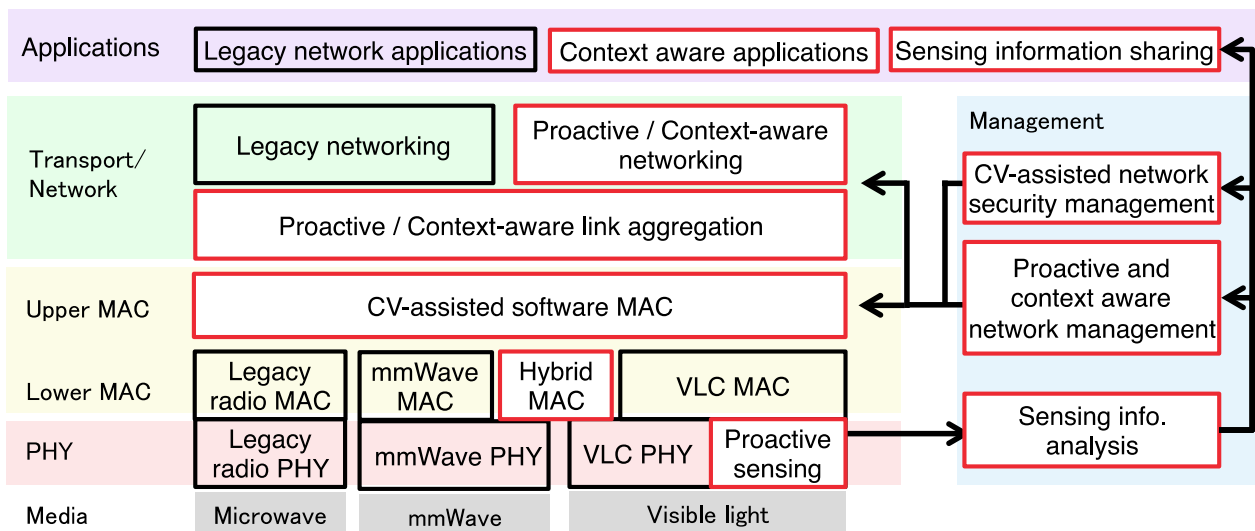


図 2: 提案レイヤモデル

2-3 ハイブリッドアーキテクチャを用いた通信制御: カメラ画像からのミリ波通信スループット推定

ハイブリッドアーキテクチャに基づく通信制御として、ミリ波通信のスループットを画像から推定する技術を実現した。1章で述べたようにミリ波通信は人体遮蔽により急峻に通信品質が変化するため、特に人の往来のある場所では通信品質が不安定となる。本研究は、通信品質の良好な無線リンクを活用することで周波数利用効率を高めることを目的とし、各無線リンクの通信品質の予測を実現する。

スループット推定システムは、ミリ波 BS (base station)、RGB-D (Depth) カメラ、通信制御部、及び学習器からなる。学習器は有線ネットワークでミリ波 BS、RGB-D カメラ、及び通信制御部と接続される。RGB-D カメラはカラー画像だけでなく、距離も取得することが可能である。深度画像からはカメラの視野角内にある物体までの距離が取得できるため、ミリ波通信品質に大きな影響を及ぼす遮蔽物の位置情報の高精

度な取得が可能である。RGB-D カメラの画像は接続された学習器へと送信される。学習器は機械学習アルゴリズムを用いて、過去の通信品質情報から現在の通信品質を推定する。

本方式は学習フェーズと推定フェーズからなる。BS と STA がフレームを互いに送受信している時、BS に接続された学習器は学習フェーズとなる。一方、BS と STA が互いにフレームを送信していない時、BS に接続された学習器は推定フェーズとなる。学習フェーズにおいて、学習器は RGB-D カメラから得られた深度画像とミリ波 BS から得られた実測スループットの関係を学習する。学習手法は次節で述べる。推定フェーズにおいて、学習器は RGB-D カメラから得られた深度画像から、スループットを推定する。

機械学習アルゴリズムとして、オンライン機械学習アルゴリズムの一つである AROW (Adaptive Regularization of Weight Vectors) [16]を用いる。RGB-D カメラは推定精度向上のため、高解像度かつ高いフレームレートでの動画の撮影が望ましく、得られた画像データが非常に大きくなると考えられる。そのため本方式では、画像を得るたびに逐次的にモデルが更新可能であり省メモリかつ高速に計算可能なオンライン機械学習アルゴリズムを採用している。

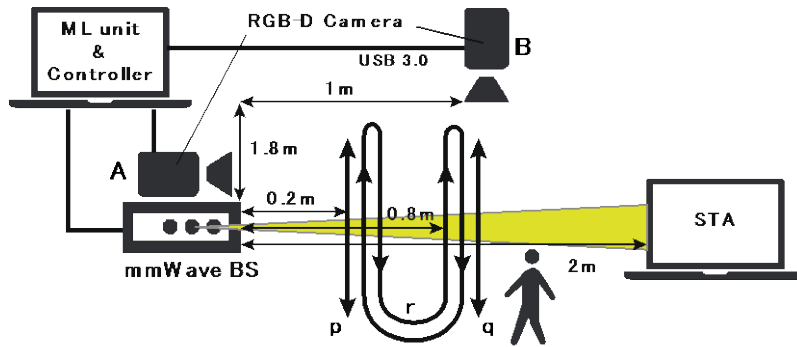
時刻 t において得られた実測スループットを s_t 、深度画像を AROW の入力用に変換した配列を i_t とする。学習フェーズにおいて AROW は正規化したスループット $r_t = s_t / \eta$ と変換後の深度画像 i_t の対応を学習する。ここで、 η はスループットの正規化係数であり、 r_t は 0 から 1 の値をとる。推定フェーズにおいては、AROW は i_t から推定正規化スループット r'_t を推定し、学習器は推定スループット $s'_t = \eta r'_t$ を出力する。

カメラから得た深度画像を AROW の入力となる 1 次元 2 値配列に変換する手順を述べる。計算量を削減するため、深度画像の解像度を $H \cdot W$ ピクセルへと変換する。その後、深度画像の最大値が D となるように各ピクセルの深度値を正規化する。具体的には、 (x, y) にあるピクセルの深度値を $d_{x,y}$ とし、全ピクセルについて $[d_{x,y}]$ 番目の値が 1、それ以外が 0 となる D サイズの 2 値配列を作成する。最後に、それぞれの配列を連結することで、AROW の入力である i_t を得る。

学習器が BS から実測通信品質を得たときは、学習器はカメラ画像と通信品質の関係の学習し、実測通信品質を通信制御部へ送信する。一方、学習器へ BS から実測通信品質が送信されていないとき、学習器は現在の通信品質をカメラ画像から推定し、推定通信品質を通信制御部へと送信する。ここで、学習器は複数のカメラと接続でき、また、カメラも複数の学習器と接続することができる。通信制御部は学習器から受け取った、実測または推定通信情報をもとに通信制御する。

本方式の有効性を実験により検証した。図 3 に実験構成を示す。ミリ波 BS 及び端末位置は固定とする。ミリ波 BS から端末へ iPerf3 を用いて TCP トラフィックを発生させ、0.2 s ごとにスループットと深度画像を取得した。トラフィック発生中、歩行者が BS 前方を左右から交互に約 1 m/s の速度で 4 s に一度通過する。カメラの位置が A (BS と同じ位置)、歩行者の移動経路が経路 r (BS 前方 0.2 m と 0.8 m 地点を交互に往復) の環境の結果を報告する。機器の床からの高さはそれぞれ、BS とカメラが 0.7 m、STA が 0.9 m とした。AROW のパラメータ r は 200、入力にはカメラから得た深度画像を (x, y, z) 方向に $(20, 20, 20)$ の解像度の 1 次元 2 値配列に変換したものをを用いた。正規化係数 η はスループットが 1000BASE-T Gigabit Ethernet によって最大 1 Gbit/s に制限されることから $\eta = 1$ Gbit/s とした。実験では 10 分間、学習フェーズとして深度画像とスループットの対応を学習した後、学習を止め、推定フェーズとして 10 分間深度画像からのスループット推定を行った。この時、推定フェーズでは推定値との比較を行うため、同時にスループット測定を行った。推定フェーズ終了後、推定結果と実測スループットから提案方式の RMS (Root Mean Square) 誤差を算出し比較を行った。

図 4 に、カメラが A の位置であり、人が BS 前方 0.2 m と 0.8 m 地点を交互に往復 (経路 r) した場合の実測及び推定スループットの時系列の一部を示す。実測スループットの低下開始に合わせて推定スループットも低下開始しており、見通し通信路の遮蔽開始を画像から判断できていることがわかる。このとき RMS 誤差は 122 Mbit/s であった。また、一度の学習・推定に必要な計算時間は平均してそれぞれ 1.40 ms と 1.36 ms であった。これは、人体遮蔽の期間に比べて非常に早く、十分高速にスループット推定ができているといえる。



mmWave BS	Dell Wireless Dock D5000
ML unit/Controller	Apple MacBook Air Mid 2013 (CPU: Intel Core i7, RAM: 8 GB)
mmWave STA	Dell Latitude E5540 (CPU: Intel Core i5, RAM: 4 GB)
RGB-D camera	Microsoft Kinect for Windows (Model: 1656)
Wired Network	1000BASE-T Gigabit Ethernet
WLAN	IEEE 802.11ad
Channel	62.64 GHz

図 3: 実験構成

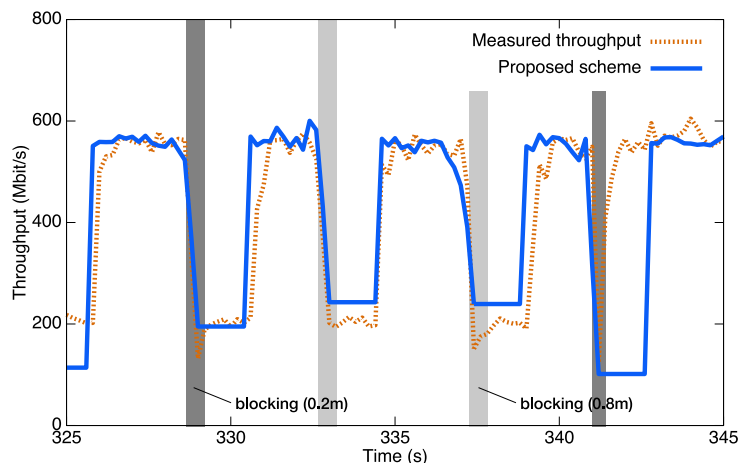


図 4: 実測及び推定スループットの時系列。カメラの位置が A、歩行者の移動経路を r (BS 前方 0.2 m と 0.8 m 地点を交互に往復) とした場合を示す。

3. 研究課題

本研究は萌芽的な研究であり、多くの課題が残されている。本節では研究課題を挙げる。

3-1 カメラ画像からの無線通信に関する情報抽出

従来の画像解析技術は、画像に写る事物を検出したり、意味解釈したり、といった目的のもと研究開発が進められてきた。しかし、提案システムでは通信に焦点を置き、通信に関わる情報を抽出する必要がある。カメラ画像自体には、幾何学的トポロジー、エリア内の物体の移動などの通信品質に関わる情報が内包されている。しかし、画像と通信品質を直接対応付けるモデルはない。それを実現する 1 つの方法に機械学習がある。2-3 で紹介した研究はその実現例の 1 つである。本研究はスループット以外の通信品質情報、例えば、受信信号電力やパケット損失率、遅延なども画像から推定できる可能性を示唆している。また、見通し通信路や反射波の経路など電波伝搬経路を空間的に把握できる可能性がある。見通し通信路の空間的位置が推定できれば、画像上の物体の移動予測から、通信路が遮蔽されるタイミングを予測することが可能となる。一

方で、複数の通信端末や基地局、遮蔽物が存在したときに関しては未知数であり、検討の余地が大いにある。

3-2 プロアクティブ通信制御

カメラによる推定や予測を活用した通信制御を新たに検討する必要がある。MAC 層ではアンテナ指向性制御があげられる。ミリ波通信ではフェーズドアレイアンテナなど指向性制御が可能なものが使用される。そのため、利得が最大化されるよう基地局側と端末側で最大放射方向を適切に設定する必要がある。特に IEEE 802.11ad 規格では、選択可能な最大放射方向をセクタと呼び、ビーコン間隔毎に各セクタに制御フレームを送信し、指向性制御を行うよう既定されている。利得を最大化するには基地局と端末のすべてのセクタの組み合わせに対し制御フレームを交換して品質を調べる必要があり、帯域と電力を消費する。提案システムでは、端末移動予測を用いることで走査範囲を限定し、無駄な制御フレーム交換を削減することができる。また、指向性制御にかかる時間を削減することができ、端末が移動した場合もすぐさま高い利得で通信を開始することができる。と期待される。

ネットワークレイヤにおける制御として経路制御がある。一般的に経路制御メカニズムはプロアクティブルーティングとリアクティブルーティングに分類できるが、本稿で提案するプロアクティブ経路制御はプロアクティブルーティングとは異なる。一般的なプロアクティブルーティングでは事前に各リンク状態を把握することでルーティングテーブルを作成し、パケット発生時にはテーブルを参照するだけで経路決定する。各リンクの状態は、パケットロス率やスループットなど通信品質などの統計から決定されるため、実際にリンク状態が変化してからテーブルの更新までに一定の観測時間を要し、ミリ波通信であればその間の End-to-End の通信品質が大きく低下する。一方、提案システムではミリ波通信環境予測を用いることで実際の状態変化に先立ちルーティングテーブルを更新することが可能となる。そのため、End-to-End の通信品質をほとんど低下させることなく、安定した高速通信を提供できる。更に、見通し通信路遮蔽予測とユーザ端末移動予測により、経路ごとにその経路が遮蔽なく利用できる時間長や将来的に使用可能となる経路まで把握することができ、経路選択の戦略を拡張することができ、さらなる性能向上の可能性が期待できる。

トランスポートレイヤの制御としては流量制御がある。流量制御の目的として見通し通信路遮蔽時の干渉低減が考えられる。ミリ波通信では見通し通信路遮蔽時には見通し外通信が行われるがフレームロス率が大きく増加し、使用される伝送レートも低くなる。しかし、信号は送信され続け近くにあるミリ波通信機器の通信に干渉を与えるため、見通し通信路遮蔽が発生している間のシステム全体のスループットは低下する。これを解消するため見通し通信路遮蔽予測に基づき当該通信路の流量を制限する方法を提案している[17]。提案方式では、遮蔽される経路のトラフィックを停止することで、ロスが多く非効率なミリ波通信を止め、その分の帯域を他の基地局が使用できるようにすることで、システム全体のスループットが向上する。流量制御の方法としては、基地局やプロキシサーバにおいてバッファリングさせる方法が考えられるが、バッファ容量の制限があるため適切なバッファリング制御が必要となる。

4. まとめ

本研究では、ミリ波通信とカメラ通信を用いた高速モバイルネットワークのためのハイブリッドアーキテクチャを提案した。ハイブリッド通信システムのためのネットワークスタックを設計し、その実現例の1つとしてカメラ画像からのスループット推定を検討し、カメラ画像からでもミリ波通信のスループットが最大スループットの10%程度の誤差で推定できることを明らかにした。また、本分野の研究が促進されることを期待し、ハイブリッドシステムを実現するための研究課題を明らかにした。

【参考文献】

- [1] T. S. Rappaport, Shu Sun, R. Mayzus, Hang Zhao, Y. Azar, K. Wang, et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! IEEE Access, 1:335–349, 2013.
- [2] Sundeep Rangan, Theodore S Rappaport, and Elza Erkip. Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges. Proceedings of the IEEE, 102(3):366–385, mar 2014.
- [3] Lochan Verma, Mohammad Fakhrazadeh, and Sunghyun Choi. Wifi on steroids: 802.11AC and 802.11AD. IEEE Wireless Communications, 20(6):30–35, dec 2013.

- [4] Martin Jacob, Sebastian Priebe, Robert Dickhoff, Thomas Kleine-Ostmann, Thorsten Schrader, and Thomas Kurner. Diffraction in mm and sub-mm wave indoor propagation channels. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 60(3):833–844, 2012.
- [5] George MacCartney, Theodore Rappaport, Mathew Samimi, and Shu Sun. Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design. *IEEE Trans. Commun.*, PP(99):1–1, 2015.
- [6] Ashwin Ashok, Marco Gruteser, Narayan Mandayam, Jayant Silva, Michael Varga, and Kristin Dana. Challenge: Mobile Optical Networks Through Visual MIMO. In *Proc. of MobiCom '10*, pages 105–112, Sep. 2010.
- [7] R. D. Roberts. Undersampled frequency shift ON-OFF keying (UFSOOK) for camera communications (CamCom). In *Proc. of IEEE WOCC*, pages 645–648, May 2013.
- [8] Hao Ma, Lutz Lampe, and Steve Hranilovic. Integration of indoor visible light and power line communication systems. In *Proc. of IEEE ISPLC*, pages 291–296, March 2013.
- [9] H Chowdhury and M. Katz. Cooperative data download on the move in indoor hybrid (radio-optical) WLAN-VLC hotspot coverage. *Eur. Trans. Telecommun.*, 25(3):294–307, 2014.
- [10] Dushyantha A. Basnayaka and Harald Haas. Hybrid RF and VLC systems: Improving user data rate performance of VLC systems. In *Proc. of IEEE VTC*, pages 1–5, 2015.
- [11] Moussa Ayyash, Hany Elgala, Abdallah Khreishah, Volker Jungnickel, Thomas Little, Sihua Shao, et al. Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: Concepts, opportunities, and challenges. *IEEE Commun. Mag.*, 54(2):64–71, 2016.
- [12] Rong Zhang, Jiaheng Wang, Zhaocheng Wang, Zhengyuan Xu, Chunming Zhao, and Lajos Hanzo. Visible light communications in heterogeneous networks: Paving the way for user-centric design. *IEEE Wireless Communications*, 22(2):8–16, 2015.
- [13] Seongah Jeong, Osvaldo Simeone, Alexander Haimovich, and Joonhyuk Kang. Beamforming Design for Joint Localization and Data Transmission in Distributed Antenna System. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 64(1):62–76, Jan 2015.
- [14] Changqiao Xu, Enda Fallon, Yuansong Qiao, Lujie Zhong, and Gabriel-miro Muntean. Performance Evaluation of Multimedia Content Distribution Over Multi-Homed Wireless Networks. *IEEE Trans. Broadcast.*, 57(2):204–215, jun 2011.
- [15] Ramin Khalili, Nicolas Gast, Miroslav Popovic, and Jean Yves Le Boudec. MPTCP is not pareto-optimal: Performance issues and a possible solution. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 21(5):1651–1665, 2013.
- [16] Koby Crammer, Alex Kulesza, and Mark Dredze. Adaptive regularization of weight vectors. In *Proc. of Advances in Neural Information Processing Systems*, pages.414–422, Dec., 2009.
- [17] Takayuki Nishio, Ryohei Arai, Koji Yamamoto, and Masahiro Morikura. Proactive traffic control based on human blockage using RGB-D cameras for millimeter-wave communications. In *Proc. of IEEE CCNC 2015*, pages.23–24, Jan. 2015.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
High-Speed Mobile Networking Through Hybrid mmWave-Camera Communications	ACM Mobicom Workshops VLCS 2016	2016年10月
Geometry Aware Proactive Control of mmWave Communications	WINLAB IAB Fall 2016	2016年10月
Machine-learning-based throughput estimation using images for mmwave communications	Proc. IEEE VTC Spring	2017年6月