

# サービス固有の接続性制御を可能とする WiFi ネットワーク仮想化技術

中内清秀 荘司洋三

本稿ではサービス固有の接続性を制御するための WiFi ネットワーク仮想化技術を提案する。WiFi は急増するモバイルトラフィックのオフロード先として注目される一方で、混雑時に通信の重要性や緊急性に関係なく接続性が著しく低下することが課題である。提案技術は、仮想化技術を用いて特定サービス用に基地局資源を専用のに確保することで接続性の制御を可能にする。VoIP サービスを例に、遅延違反率の向上効果を示す。

## 1 まえがき

モバイルデータトラフィックの急激な増加を受けて、セルラネットワークからのトラフィックオフロード先として WiFi の重要度がますます高まっている。将来的には VoIP 等の音声サービスやサイバーフィジカルシステム (CPS) 等の遅延要件が厳しいアプリケーションでの利用も期待されている。一方で、ユーザが密集する WiFi エリアではネットワークの混雑が多発し、アプリケーションの接続性の著しい低下を引き起こしている。遅延要件が厳しいアプリケーションで WiFi を利用するためには、WiFi における QoS 制御が必須となる。

WiFi における QoS 制御方式として IEEE 802.11 e<sup>[1]</sup> が標準化されているが、Class-of-Service (CoS) 情報をパケットヘッダに書き込む処理を端末に追加する必要があるため、利用は限定的である。別のアプローチとして、有線ネットワークにおいて検討されているネットワーク仮想化技術<sup>[2]-[5]</sup> が注目され、WiFi への応用も検討されている<sup>[6]-[7]</sup>。しかし、チャネル容量の変動、干渉、ブロードキャスト等の無線固有の特性を考慮する必要があり、ネットワーク仮想化技術をそのまま WiFi に適用することは困難である<sup>[8]-[10]</sup>。先行研究として、WiFi 基地局を複数事業者が共用利用するための WiFi 基地局仮想化方式<sup>[11]-[16]</sup> が提案されているが、対象が基地局単体であり、基地局間協調が検討されていないため、WiFi ネットワーク全体での基地局資源利用効率低下や基地局間ハンドオーバー中の通信切断等が課題となる。

本稿では、サービス固有の接続性を制御することを可能とする WiFi ネットワーク仮想化方式を提案する。特定サービス用に専用基地局資源を確保し、当該サービス利用端末に対してのみ基地局接続を許可することで、WiFi ネットワークが混雑状態であっても、優先

すべき特定のサービスのパケットレベル遅延違反率を低減できる。技術的特徴は、複数の物理基地局に対して同一の MAC アドレスを設定することで、基地局選択やハンドオーバー等の制御機能を基地局及び端末から分離し、ネットワーク主導で制御できる点である。さらに、端末接続時に、基地局バックホールにおけるレイヤ 2 経路設定まで連動して行うことで、必要となるネットワーク設定をすべて自動化できる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、**2**において WiFi ネットワーク仮想化、及び仮想基地局 (vBS) の概念を述べる。**3**において、提案する WiFi ネットワーク仮想化アーキテクチャの詳細として、機能モデル、vBS 構成原理、vBS 接続原理を示す。**4**では提案方式の導入効果についてのシミュレーション評価結果を、**5**では市販 WiFi モジュールと商用 OpenFlow<sup>[17]</sup> スイッチを用いて開発した概念実証プロトタイプの概要を、それぞれ示す。最後に **6** でまとめを述べる。

## 2 WiFi ネットワーク仮想化

図 1 に WiFi ネットワーク仮想化の一般モデルを示す。WiFi ネットワーク仮想化とは、物理的な WiFi ネットワーク資源及び物理的な無線資源の抽象化と分離により、カスタマイズ可能な複数の独立論理 (仮想) WiFi ネットワークを共通の WiFi ネットワーク設備上で同時運用することを可能にする技術である<sup>[6][8]-[10][18]</sup>。本稿では、上記の資源をまとめて基地局 (BS) 資源と呼ぶ。また、図 1 に示す通り、複数の物理基地局により提供される BS 資源群を仮想基地局 (vBS) と定義する。言い換えると、vBS はマルチチャネル WiFi 基地局と等価である。BS 資源群が特定サービスに対して専用のに割り当てられた vBS を、サービス専用 vBS と定義する<sup>[19][20]</sup>。

一般に、WiFi における基地局選択や基地局間ハン

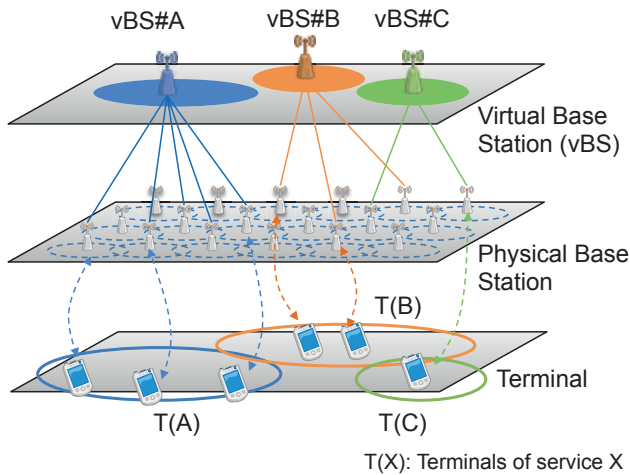


図1 WiFi ネットワーク仮想化の一般モデル

ドオーバは、端末が検出する信号強度等の情報を用いたベンダ固有アルゴリズムに基づき、端末主導で行われる。そのため、特定のサービスを利用する端末だけを、サービス専用 vBS を構成する基地局に誘導するといった制御が困難であった。提案する WiFi ネットワーク仮想化技術の利点は、端末ごとに異なるベンダ固有のアルゴリズムに依存することなく、すべての端末の基地局選択と基地局間ハンドオーバをネットワーク主導で制御できることである。また、もう 1 つの利点は、IEEE 802.11 e に対応していない端末が行う通信に対して、同等の通信品質を与えることができることである。

基地局接続及びハンドオーバ処理は、必然的に基地局バックホールにおける当該端末向けレイヤ 2 経路設定を伴う。ハンドオーバ遅延やハンドオーバ中のパケット欠落を防止するためには、レイヤ 2 経路設定をこれらの処理と連動させ、かつ即時に行う必要がある。そこで本研究では、経路設定に OpenFlow<sup>[17]</sup> を利用する。

隣接する複数の物理基地局を利用して、マルチチャネルを利用する vBS を構成する場合、隣接チャネル干渉の影響を考慮する必要がある。例えば、5 GHz 帯のチャネル 36、40、44 を隣接する 3 つの基地局で同時に利用した場合、スループットが最大で 50% 以上低下することが報告されている<sup>[21]</sup>。しかし、送信タイミングを基地局間で協調的に決定し、擬似的に BS 資源を時分割化することで、隣接チャネル干渉の影響を低減することができる<sup>[21]</sup>。

### 3 原理

#### 3.1 機能モデル

図 2 に、提案する WiFi ネットワーク仮想化アーキ

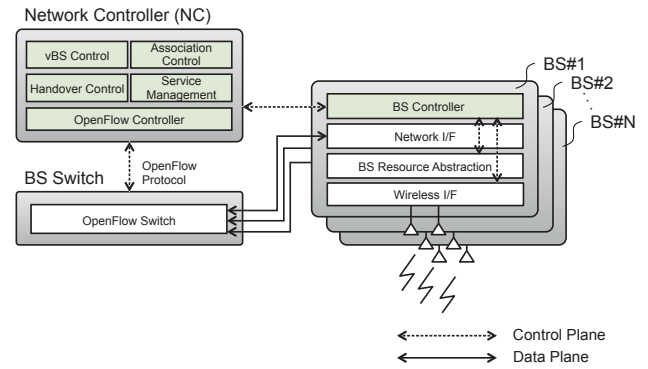


図2 機能モデル

テクチャ<sup>[22]</sup>の機能モデルを示す。構成要素は、ネットワークコントローラ (NC)、基地局スイッチ (BS-SW)、基地局 (BS) の 3 つである。NC は WiFi ネットワーク内の集中コントローラであり、配下の基地局における接続処理やハンドオーバ処理を一元制御する。BS-SW は、OpenFlow コントローラとしての役割ももつ NC からの指示に基づき、パケットヘッダの 5 タプルにより表現される特定フローの経路設定を行う機能をもつプログラマブルなスイッチである。BS 内では BS 資源抽象化機能が特徴的な機能であり、端末に対して BS の物理構成を隠蔽することで、サービス専用仮想基地局 (vBS) が複数の BS にまたがる論理統合的な構成を可能にする。なお、提案するアーキテクチャは、IEEE 802.11 の特定の通信モードに依存せず、原理的に最新の IEEE 802.11 ac や 802.11 ad にも適用可能である。

提案する WiFi ネットワーク仮想化は、仮想基地局構成原理、仮想基地局接続原理、仮想基地局間シームレスハンドオーバ原理の 3 つの原理により実現される。本稿では、このうち仮想基地局構成原理と仮想基地局接続原理について説明する。仮想基地局間シームレスハンドオーバ原理は、端末が利用するサービスの登録や切替えに伴って仮想基地局間を切り替える時に必要となる原理であるが、詳細については、文献 [22] を参照されたい。

#### 3.2 仮想基地局構成原理

図 3 に仮想基地局構成原理を示す。図 3 (a) は、ターゲットサービスが異なる 2 つのサービス専用 vBS が構成される時の基地局設定方法を示している。vBS#1 及び vBS#2 は、それぞれ BS#1 と BS#2、BS#3 と BS#4 から構成されている。これら 4 つの物理 BS は、ここでは異なるチャンネルに設定されるものとする。特徴的なのは、4 つの物理 BS がすべて同じ MAC アドレス、及び BSSID (Basic Service Set Identifier) に

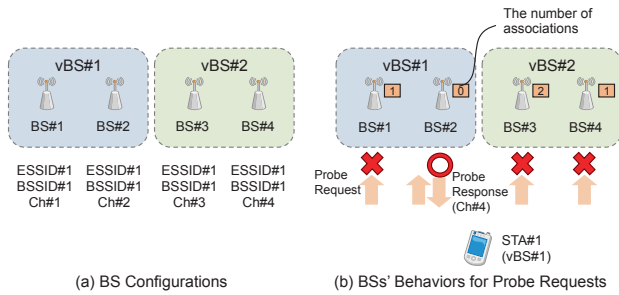


図3 仮想基地局構成原理

設定される点である。これは、BS 選択や BS 間ハンドオーバー等の制御ロジックを、BS 及び端末から分離し、代わりに NC による集中的な制御・判断を可能にするためである。同様に、各 BS において、同一の ESSID が設定される。その結果、各 BS から送信されるビーコンは、送信元 MAC アドレス及び BSSID が同一であり、BS パラメータセットフィールド内のチャンネル番号のみが異なるフレームとなる。

一方、図3(b)は、アクティブスキャンを目的とした Probe Request フレームの処理方法を示している。ここでは、対象端末(STA1)がすでに vBS1 に紐付けられていると仮定する。端末が当該 ESSID において利用可能な BS を発見する動作は、通常の WiFi 端末と同様である。すなわち、STA1 は最初に特定のチャンネルにおいて、ターゲット ESSID を含む Probe Request をブロードキャストする。STA1 は、タイムアウト時間 (MaxChannelTime) 内に対応する Probe Response フレームを受信しない場合、別のチャンネルにおいて同様に基地局発見を試行する。提案方式では、STA1 からの Probe Request を受信した各 BS は、NC から応答指示を受信するまで Probe Response の送信を保留するため、最終的に STA1 近傍のすべての BS が、それぞれ異なるチャンネルで Probe Request を受信することになる。

Probe Request 受信時に、BS 自身による判断で即座に Probe Response 応答を行う通常の WiFi と異なり、提案方式では Probe Request に応答すべきかどうかを NC が判断する。すなわち、NC は Probe Request を送信した端末とどの BS との接続を確立させるかを決定する。NC から応答指示を受け取った BS だけが Probe Response 応答を行うため、STA1 は最終的にはターゲット ESSID における利用可能な BS を1つ発見することができる。図3(b)では、vBS1 を構成する BS の中で、BS 選択アルゴリズムに基づいて選択された BS#2 が、Probe Response 応答を行っている様子を示している。ここでは、BS 間での接続数の平均化を目的として、接続数が最も少な

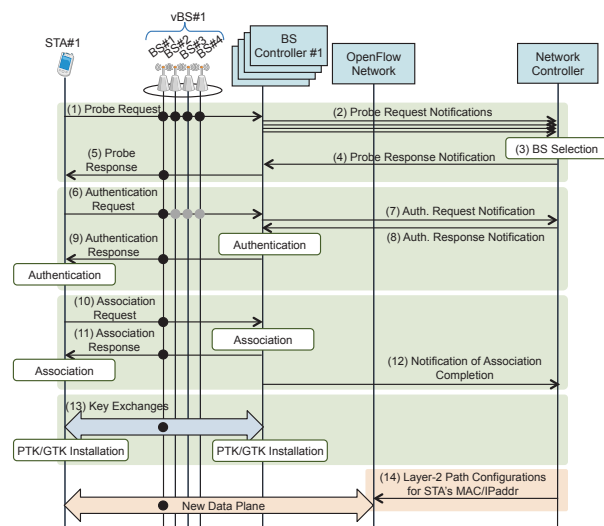


図4 仮想基地局接続原理

い BS を選択するアルゴリズムが採用されている。なお、この BS 選択アルゴリズムは、各 BS におけるトラフィック量や RSSI (Received Signal Strength Indicator) に基づくアルゴリズム等への置換が可能である。

### 3.3 仮想基地局接続原理

図4に仮想基地局接続原理を示す。具体的には、端末によるアクティブスキャン(Probe Request 送信)から、認証、アソシエーション、鍵交換、及びこれらの手続きと連動した基地局バックホールにおける経路設定までの一連の手続きを説明する。なお、本節では vBS1 は4つの BS (BS{1,2,3,4}) から構成され、それぞれ異なるチャンネルに設定されているものとする。図4における BS コントローラは、BS 内において認証、アソシエーション、及び無線インタフェース設定等の処理を行うソフトウェアモジュールを明示的に示したものである。ここでは BS と BS コントローラを合わせて、簡潔に BS と呼ぶこととする。また、図4における OpenFlow ネットワークとは、BS-SW を抽象的に表現したものである。提案方式では、BS-SW は単一である必要はなく、複数の OpenFlow スイッチによる構成も可能である。

アクティブスキャン手続きでは、まず端末から Probe Request を受信した各 BS は、Probe Response を端末に送信せず、Probe Request から取得した端末の MAC アドレスを含む Probe Request 通知を NC に送信する(ステップ(1)、(2))。NC は、一定時間内に当該端末についての Probe Request 通知を複数の BS から受信した場合、前節で述べた BS 選択アルゴリズムに従って、BS を1つ選択する(ステップ(3))。選択された BS をターゲット BS と呼ぶ。NC から、

当該端末に対する Probe Response 通知を受信したターゲット BS は、次に当該端末から Probe Request を受信した時に、即座に Probe Response で応答する(ステップ(4)、(5))。

認証手続きにおいても同様に、NC から Authentication Response 通知を受信したターゲット BS だけが、当該端末への Authentication Response を送信する(ステップ(6)~(9))。認証手続きにおいても BS が再度 NC へ通知を行う理由は、電力消費を抑制するためにアクティブスキャンを実施しない端末の収容を可能にするためである。一方、続くアソシエーション手続きでは、認証手続きを完了した端末だけが実行するため、Association Request を受信したターゲット BS は当該端末に対して即座に Association Response で応答する(ステップ(10)~(12))。

鍵交換手続きは、従来の WiFi と同様に、IEEE 802.11 i<sup>[23]</sup>に基づいて行う(ステップ(13))。具体的には、WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2) CCMP (Counter Mode Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol) 方式に基づく鍵交換及びフレーム暗号化を行う。4-way ハンドシェイク手順により、ターゲット BS と端末間でペア一時鍵(pairwise transient key (PTK))を共有する。マルチキャスト通信を暗号化するためのグループ一時鍵(group temporal key (GTK))も同様に、定期的な 2-way ハンドシェイク手順により共有される。

最後に、端末から BS-SW 上流のゲートウェイ(GW)までのデータプレーンを確立するために、OpenFlow ネットワークにおいて当該端末に対するレイヤ 2 経路設定を行う(ステップ(14))。NC 内の OpenFlow コントローラが、OpenFlow プロトコルの Flow\_Mod メッセージを使って BS-SW 内のフロー表に当該端末を発着するフローを登録する。例えば、図 3 (b) に示した構成では、BS-SW 内のフロー表には下記の 2 つのフローが登録される。ここで、MAC\_STA1、MAC\_GW は、それぞれ STA1、GW の MAC アドレスを示す。また、Port\_to\_BS2、Port\_to\_GW は、それぞれ OpenFlow スイッチ(BS-SW)において BS2、GW が接続された物理ポートを示す。同一 vBS に収容された端末間通信を可能にするために、OpenFlow スイッチにおいては、MAC ラーニングと ARP (Address Resolution Protocol) メッセージの処理も有効化される。

Flow entry 1 :

```
Match: SrcMAC = MAC_STA1
      && DstMAC = MAC_GW
Action: SendOutPort( Port_to_GW )
```

Flow entry 2 :

```
Match: DstMAC = MAC_STA1
Action: SendOutPort( Port_to_BS2 )
```

### 4 遅延違反率低減効果

提案する WiFi ネットワーク仮想化方式の有効性を、VoIP (Voice over IP) サービスとベストエフォート (BE) サービスのトラフィック混在により混雑状況下にある WiFi ネットワークにおける、VoIP サービスのパケットレベルの遅延違反率 (Delay Violation Ratio; DVR) により評価した。遅延違反率は、VoIP のような遅延に対してセンシティブなアプリケーションの性能評価指標として特に有効である。提案方式の DVR を、標準のアクセス方式である IEEE 802.11 DCF、標準の QoS 方式である IEEE 802.11 e EDCA と比較した。イベント駆動型シミュレータである QualNet<sup>[24]</sup> を利用し、BS 4 台、静止端末 400 台によりネットワークを構成し、WiFi ホットスポットに VoIP 端末と BE 端末が混在、密集する環境を構築した。VoIP 音声コーデックとして G.729 を採用し、それに基づき、パケットサイズ 60 Byte (内訳は、ペイロード 20 Byte、RTP ヘッダ 8 Byte、UDP ヘッダ 12 Byte、IP ヘッダ 20 Byte)、パケット間隔 20 ms 固定のトラフィックを発生させた。一方、BE 端末から、パケットサイズ 1500 Byte、パケット間隔 100 ms 指数分布の UDP トラフィックを発生させた。

VoIP サービスの場合、一般に許容可能な最大エンド・エンド遅延は 250 ms である。有線ネットワークにおける伝送遅延を約 100 ms と仮定すると、無線 MAC におけるバッファリング及びスケジューリング部分の許容遅延は 150 ms となる。VoIP 通信を行う 2 台の端末が共に WiFi を利用する場合、無線リンクの許容遅延は 75 ms 以下となる。音声品質を向上させるためには、無線リンクにおける遅延は 50 ms 以下が望ましいという報告もある<sup>[25]</sup>。そこで、本稿では遅延違反となる閾値を 50 ms とした。比較のため、BE サービスに対しても同じ閾値を利用した。

提案方式では、VoIP 端末のみを収容する VoIP 専用 vBS を構成し、4 つの BS のうち 3 つを当該 vBS に専用的に割り当てる構成とした。NC においては、VoIP 端末がこれらの 3 つの BS に均等に配分される基地局選択アルゴリズムを採用した。BE 端末は、すべて残りの 1 つの BS に収容される。一方、IEEE 802.11 及び IEEE 802.11 e では、VoIP 端末、BE 端末とも、RSSI に基づく BS 選択を行い、結果として 4 つの BS に均等に配分されることとなった。IEEE 802.11 e では、VoIP パケット、BE パケットの送信に、

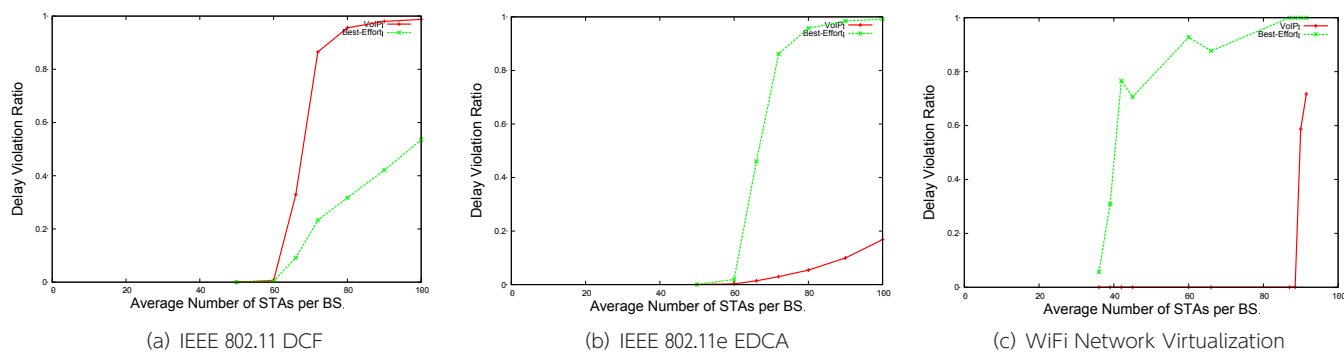


図5 VoIP サービスの遅延違反率

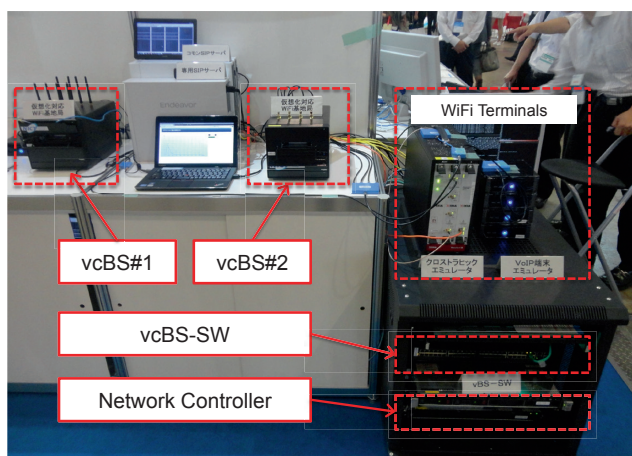


図6 プロトタイプシステム (外観)

それぞれ AC\_VI クラス、AC\_BE クラスを利用した。VoIP 端末、BE 端末の比率は 1:1 とした。干渉を避けるため、4つの BS にはそれぞれ異なるチャンネルを設定した。

図5に、IEEE 802.11、IEEE 802.11e、及び WiFi ネットワーク仮想化方式における VoIP サービスと BE サービスの DVR を示す。横軸は 1 BS 当たりの平均接続端末数を表す。図5(a)及び図5(b)では、端末数が60(ネットワーク負荷0.36)を超えると、VoIPのDVRが増加する。この時、IEEE 802.11eの方がグラフの傾きが緩やかなのは、VoIPパケットに対する優先送信処理を行うためである。

一方、図5(c)では、端末数が88.5(ネットワーク負荷0.53)を超えるまでVoIPサービスのDVRはほぼ0である。これは、VoIP端末がVoIP専用vBSの最大容量(この場合、3BS合計で端末177台)に達するまで、DVRを制御できることを示す。上記のシミュレーション結果から、結論は次のようになる。まず、VoIPのDVRが制御できるネットワーク負荷をvBS容量と定義すると、提案方式によりvBS容量を47%向上できる。次に、提案方式では、IEEE 802.11eと比較して、VoIPのDVRを最大9%低下させることができ、IEEE 802.11eをサポートしない端末に対し

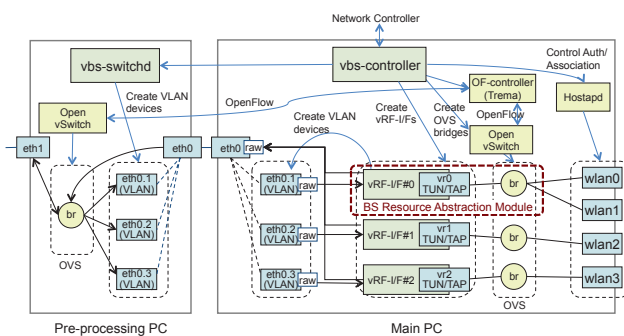


図7 仮想化対応基地局 (vcBS) のソフトウェア構成

ても同等以上の接続性を提供できる。

## 5 概念実証プロトタイプ

概念実証を目的として、vBS構成機能を有する仮想化対応基地局(vcBS)2台、BS-SWに相当する仮想化対応基地局収容スイッチ(vcBS-SW)1台、及びNCから構成されるWiFiネットワーク仮想化プロトタイプシステムを開発した。図6にプロトタイプシステムの外観を、図7にvcBSのソフトウェア構成を、それぞれ示す。vcBSのハードウェアは、単一vcBSで最大4つのBSから構成されるvBSが生成できるように、前処理PC、メインPC、及び4つの市販WiFiモジュールを組み合わせて構成した。WiFiモジュール数の拡張性を考慮し、BS間でトラフィックを振り分ける役割を行うOpenFlow機能を前処理PCに分離する構成とした。PC間はギガビットイーサネット(GbE)で接続し、メインPCのminiPCIeスロットに4つのWiFiモジュールを接続する構成とした。前処理PCは、Dual-Core 1.33 GHz ARMプロセッサ、1 GB RAMを、メインPCは、Quad-Core 2.8 GHz Intel Core i5プロセッサ、8 GB RAMをそれぞれ具備する。vcBS内に閉じたBS間ハンドオーバーのシームレス化、4.4で述べた端末接続時のデータプレーンの即時構築のために、メインPCにもOpenFlowをソフトウェアとして実装した。メインPC、前処理PCのOpenFlow機能

## 4 新世代ネットワーク基盤技術

には、オープンソースの Open vSwitch (OVS) を利用した。WiFi モジュールは、IEEE 802.11 a/b/g/n、2.4 GHz/5 GHz デュアルバンド、及び 2 × 2 MIMO をサポートし、デバイスドライバが Linux OS に標準搭載される Atheros AR9280 チップセットを内蔵するものを選定した。

vcBS-SW として、GbE 48 ポートの市販 OpenFlow スイッチを利用した。全トラフィックの集約ポイントであるため、転送性能を確保するために OVS ではなく、ハードウェアタイプを選定した。当該スイッチは、OpenFlow 1.0 をサポートし、最大 2048 フローエントリを保持できる。最後に NC は、x86 IA サーバ (Linux OS) 上に、アプリケーションソフトウェアとして実装した。vcBS-SW に対する OpenFlow コントローラ機能は、オープンソースの Trema<sup>[26]</sup> を利用して実装した。

図 8 に、コモン vBS からサービス専用 vBS へのシームレスハンドオーバーに要する時間の計測値をボックスプロットで示す。試行回数は 10 回である。中央値は 40.3 ms、最大値は 63.7 ms であった。また、一連のハンドオーバー動作中に、パケット欠落が発生しないことを、無線リンクのパケットキャプチャにより確認した。これらの結果により、ハンドオーバー動作が、VoIP 等の遅延センシティブなアプリケーションに与える影響は限定的であると考えられる。

## 6 あとがき

本稿ではサービス固有の接続性を制御するための WiFi ネットワーク仮想化技術を提案した。具体的には、物理的な WiFi ネットワーク上に、複数基地局の論理統合により形成される論理的なマルチチャネル基地局である仮想基地局 (vBS) の概念、vBS 構成原理、及び vBS 接続原理を提案した。提案方式は、特

定サービスに対して専用基地局資源を割り当てた上で、特定サービス利用端末に対してのみ当該基地局資源の利用を許可することで、WiFi 混雑環境下においてパケットレベルの遅延違反率を低減させることができる。従来の WiFi ネットワーク仮想化方式は、単一の物理基地局の無線資源を論理分割するものであるため、WiFi ネットワーク全体での基地局資源利用率の向上や、基地局間ハンドオーバー時のサービス一時停止等が課題であった。これに対して、提案方式は複数の物理基地局の無線資源を論理統合するものであり、基地局選択や基地局間ハンドオーバーの判断を NC に集約し、基地局バックホールのレイヤ 2 経路まで協調的に制御することで、これらの問題の解決を図っている。VoIP サービスを対象として、ベストエフォートの UDP トラフィック混在環境下における遅延違反率をシミュレーションにより評価し、IEEE 802.11 e 非対応端末でも、IEEE 802.11 e と同等以上の遅延違反率低減効果が得られることを示した。上記原理を実証するために WiFi ネットワーク仮想化プロトタイプシステムを構築した。プロトタイプシステムを使った実験により、コモン vBS からサービス専用 vBS への基地局間ハンドオーバーが 65 ms 以内で完了し、かつパケット欠落が発生しないことを実証し、VoIP 等の遅延にセンシティブなアプリケーションに対しても実用的であることを示した。今後の課題として、より現実的な環境における徹底的な評価や、端末が基地局間をノマディックに移動する環境における有効性の実証等に取り組む予定である。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたって、建設的な意見を頂いたネットワークシステム総合研究室のメンバに感謝する。特に、洞察に富んだコメントや提案を頂いた今瀬 真氏、村田 正幸教授、西永 望氏に感謝する。

### 【参考文献】

- 1 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Amendment: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. IEEE Std 802.11e-2005, Nov. 2005.
- 2 Thomas Anderson, Larry Peterson, Scott Shenker, and Jonathan Turner, "Overcoming the Internet Impasse through Virtualization," IEEE Computer, 38(4), April 2005.
- 3 Andy Bavier, Nick Feamster, Mark Huang, Larry Peterson, and Jennifer Rexford, "In Vini Veritas: Realistic and Controlled Network Experimentation," Proc. ACM SIGCOMM '06, Sept. 2006.
- 4 Akihiro Nakao, "Network Virtualization as Foundation for Enabling New Network Architectures and Applications," IEICE Trans. Communications, E93-B(3):454-457, 2010.
- 5 N.M. Mosharaf, Kabir Chowdhury, and Raouf Boutaba, "A Survey of Network Virtualization. Computer Networks," 54(5), April 2010.
- 6 Sanjoy Paul and Srinu Seshan, "Virtualization and Slicing of Wireless Networks," GENI Design Document 06-17, GENI Wireless Working

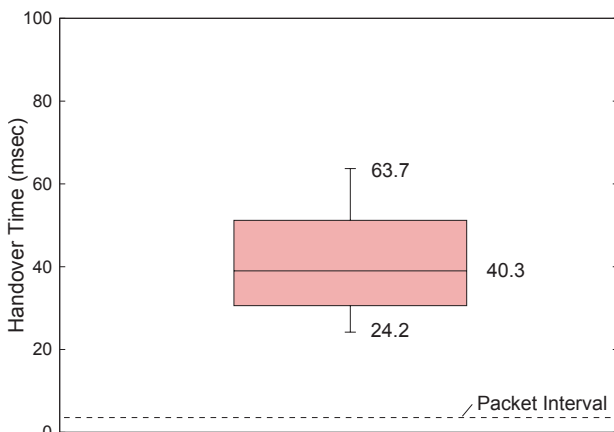


図 8 サービス専用 vBS へのシームレスハンドオーバー時間

- Group, Sept. 2006.
- 7 Gregor Schaffrath, Christoph Werle, Panagiotis Papadimitriou, Anja Feldmann, Roland Bless, Adam Greenhalgh, Andreas Wundsam, Mario Kind, Olaf Maennel, and Laurent Mathy, "Network Virtualization Architecture: Proposal and Initial Prototype," Proc. ACM VISA ' 09, Aug. 2009.
  - 8 Xin Wang, Prashant Krishnamurthy, and David Tipper, "Wireless Network Virtualization," Proc. ICNC ' 13, Jan. 2013.
  - 9 Chengchao Liang and Fei Richard Yu, "Wireless Network Virtualization: A Survey," Some Research Issues and Challenges. IEEE Comm. Surveys and Tutorials, 16(3), July 2014.
  - 10 Mao Yang, Yong Li, Depeng Jin, Lieguang Zeng, Xin Wu, and Athanasios V. Vasilakos, "Software-Defined and Virtualized Future Mobile and Wireless Networks: A Survey," Mobile Networks and Applications, Sept. 2014.
  - 11 Bernard Aboba, "Virtual Access Points," IEEE document, IEEE 802.11-03/154r1, May 2003.
  - 12 Gregory Smith, Anmol Chaturvedi, Arunesh Mishra, and Suman Banerjee, "Wireless Virtualization on Commodity 802.11 Hardware," Proc. WiNTECH ' 07, Sept. 2007.
  - 13 Rajesh Mahindra, Gautam Bhanage, George Hadjichristofi, Ivan Seskar, Dipankar Raychaudhuri, and Yanyong Zhang, "Space Versus Time Separation For Wireless Virtualization On An Indoor Grid," Proc. NGI ' 08, April 2008.
  - 14 Gautam Bhanage, Dipti Vete, Ivan Seskar, and Dipankar Raychaudhuri, "SplitAP: Leveraging Wireless Network Virtualization For Flexible Sharing Of WLANs," Proc. IEEE GLOBECOM ' 10, Dec. 2010.
  - 15 Eiji Miyagaki and Akihiro Nakao, "Cache Sharing Method Using IEEE 802.11 Wireless Access Points for Mobile Environment," Proc. IEEE ICC ' 11, June 2011.
  - 16 Kiyohide Nakauchi, Yozo Shoji, and Nozomu Nishinaga, "Airtime-based Resource Control in Wireless LANs for Wireless Network Virtualization," Proc. ICUFN ' 12, July 2012.
  - 17 Nick McKeown, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulker, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner, "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 38(2), April 2008.
  - 18 Fangwen Fu and Ulas C. Kozat, "Stochastic Game for Wireless Network Virtualization," IEEE/ACM Transactions on Networking, 21(1), Feb. 2013.
  - 19 Yozo Shoji, Manabu Ito, Kiyohide Nakauchi, Zhong Lei, Yoshinori Kitatsuji, and Hidetoshi Yokota, "Bring Your Own Network — A Network Management Technique to Mitigate the Impact of Signaling Traffic on Network Resource Utilization—," Proc. MobiWorld 2014, Jan. 2014.
  - 20 Kiyohide Nakauchi, Yozo Shoji, Manabu Ito, Zhong Lei, Yoshinori Kitatsuji, and Hidetoshi Yokota, "Bring Your Own Network — Design and Implementation of a Virtualized WiFi Network—," Proc. IEEE CCNC' 14, Jan. 2014.
  - 21 Yozo Shoji and Takeshi Hiraguri, "Virtualization-capable Multichannel WiFi System with a Coordinated Downlink Transmission Technique," Proc. 9th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 2014.
  - 22 Kiyohide Nakauchi and Yozo Shoji, "WiFi Network Virtualization to Control the Connectivity of a Target Service," IEEE Transactions on Network and Service Management, 12(2), pp.308-319, June 2015.
  - 23 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std 802.11-2012, March 2012.
  - 24 Qualnet. <http://web.scalable-networks.com/content/qualnet/>.
  - 25 Syed A. Ahson and Mohammad Ilyas, "Voip Handbook: Applications, Technologies, Reliability, and Security," CRC Press, Dec. 2008.
  - 26 Trema. <http://trema.github.io/trema/>.



**中内清秀** (なかうち きよひで)

ネットワーク研究本部ネットワークシステム  
総合研究室主任研究員  
博士(工学)  
ネットワーク仮想化、モバイルネットワーク  
制御



**荘司洋三** (しょうじ ようぞう)

ソーシャル ICT 推進研究センターソーシャル  
ICT 研究室室長/ネットワーク研究本部  
ネットワークシステム総合研究室研究マネー  
ジャー  
博士(工学)  
光・無線通信システム