

Software Defined Wireless network の研究

研究代表者

妙中 雄三

東京大学 情報基盤センター 助教

1 背景

IoT時代の幕開けとともに、通信の主体が人からモノへと変わりつつある。IoTではモノとアプリケーションが増え続け、それらによる通信の量と種類が膨大となるため、無線ネットワークの益々の大容量化が求められている。無線通信では、周波数資源が有限かつ共有であるため、周波数資源の共有範囲を狭くして同一の周波数を空間的に再利用・大容量化（エリアスループットを拡張）する無線アクセスネットワークの小セル化が進んでいる。膨大な数の小セルを設置するためには、それぞれのアクセスポイントに有線接続を配線するのは極めて困難であるため、無線バックボーンネットワークの必要性が高まっている。無線バックボーンネットワークは複数のアクセスポイントで構成し、アクセスポイントは近接のアクセスポイントと無線接続して、インターネットへの有線接続のある一部のアクセスポイントまでトラフィックをマルチホップ転送（またはシングルホップ転送）する。クライアントの通信はこの無線バックボーンネットワーク上で転送されるため、小セル化の効果を高めるためにも、無線バックボーンネットワークの広帯域化が欠かせない。

無線バックボーンネットワークも周波数資源を利用することから、広帯域化のためには周波数資源の有効利用が欠かせない。これまでの無線バックボーンネットワークでは、空間に広く展開するためホップ間での無線干渉を避ける様にアクセスポイントに周波数を割り当て、経路制御によって空間内にトラフィックを分散させることでネットワーク容量の拡張を行っていた。つまり、周波数をチャンネル単位で利用し、各アクセスポイント（物理的な位置）に対して異なるチャンネルを固定的に割り当てた。しかし、モノ・人が送受信するトラフィックは空間・時間で様々で、アクセスポイントによって、固定的に割り当てたチャンネルに対してトラフィック量が膨大となることでネットワーク容量が不足し、トラフィック量がわずかであれば余剰となるため、限りある周波数資源を効率的に利用できていない。本研究では、従来の原則であった固定的なチャンネル割り当てを行わず、ネットワーク上で周波数資源を柔軟に制御することで無駄のない物理資源の活用を実現する。

これまでの研究では、ネットワーク上で周波数資源利用を制御可能な無線バックボーンネットワークのアーキテクチャと、多様なトラフィックに対して適応的に資源利用を管理する周波数利用手法を提案した[1, 2]。提案アーキテクチャは図1に示す通り、任意の数のチャンネルを並行して利用できる構成（VAPと呼ぶ）をとり、その上でSoftware Defined Network (SDN)を活用したネットワーク資源管理を可能とした。フロー単位で周波数とホップ（空間）を軸にして資源利用を制御する周波数利用手法も提案し、柔軟な資源管理による帯域拡張が可能であることを示した。

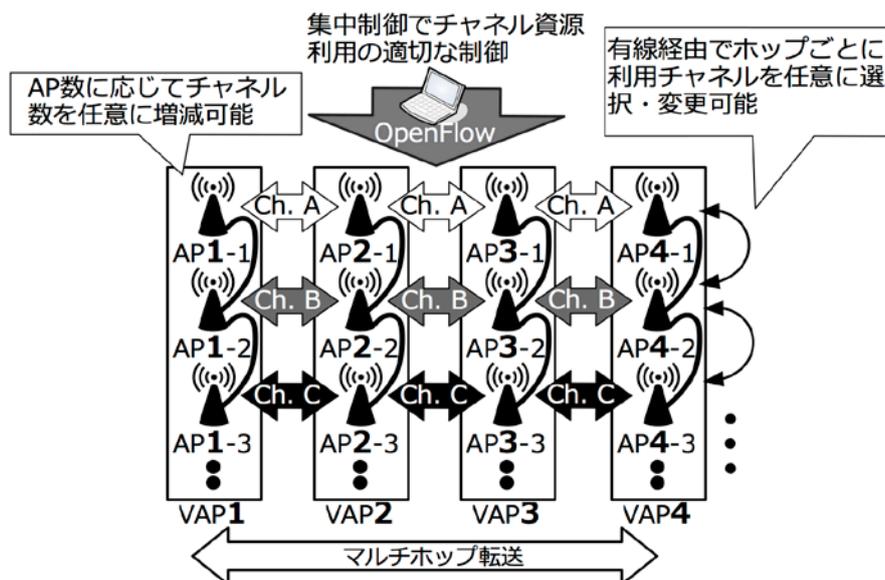


図1 ネットワーク上で周波数資源管理を可能とするアーキテクチャ

しかし、ネットワーク上で周波数資源を適切に管理するためには残る課題が残り、本研究ではこれまで考慮してこなかった無線干渉への適応と SDN 制御に伴う制御メッセージ量の削減に取り組む。これまでは、無線環境は均質で変化がないもの（チャンネル毎のネットワーク資源も均質）を前提としていたが、現実の環境では周囲の無線機器による電波干渉によって、ネットワーク資源に差異や変化が生じてしまう。そのため、被干渉チャンネルにおいて資源超過による損失が発生してしまう可能性があり、被干渉チャンネルも含めて利用可能なネットワーク資源を適切に把握して適応的に資源管理を行う必要がある。一方、SDN を用いた資源管理、特にフロー単位で詳細な至言管理を行う場合には、フロー単位の統計情報収集が欠かせないが、フロー数に比例してその通信量が増えるため制御通信の削減が欠かせない。無線バックボーンネットワークでは、制御ネットワークも無線で構成する必要があり、統計情報収集の増加はネットワーク容量を消費してしまうこととなる。以上の点から、本研究では無線干渉への適応へ向けた無線干渉の検出と適応制御手法と制御通信量を考慮した周波数利用手法を提案する。

2 関連研究

無線干渉への適応技術はこれまでも研究されている[3-5]。文献[3]は、パケットキャプチャ及び解析を行うことで候補チャンネルの順位付けを行う手法を提案している。各無線ノードにおいて干渉端末数とチャンネル利用率を推定し、その順位に基づいてチャンネル割り当てを決定する。文献[4]で提案されている手法では、利用候補チャンネルの受信信号強度を測定し、最も受信信号強度が小さく、かつ空いているチャンネルを利用チャンネルとする。文献[5]では、チャンネルセンシングデータに基づいて複数ある利用候補チャンネルそれぞれの単位時間におけるビジー時間の比率を計算し、閾値を超過したチャンネルを利用対象から除外する方法を提案している。本手法では各無線ノードで干渉検知及び利用チャンネル選択を行う分散制御を採用している。

上記の研究は共通して干渉検知結果を利用候補チャンネルの選別にのみ利用しており、被干渉チャンネルに空き容量が存在する場合でも、その利用を避けてしまう。周波数資源に上限のある無線ネットワークにおいて、ネットワーク容量を最大化するためには被干渉チャンネルの空き容量を含めた全利用チャンネルの有効利用が必要となる。そこで本研究では、被干渉チャンネルの干渉度合いに応じたネットワーク資源管理に取り組む。

また、SDN による通信制御に関連する研究も行われている[6, 7]。文献[6]では、無線バックボーンネットワークにおいて SDN を活用した経路制御を行い、ネットワーク資源利用の最適化を行っている。文献[7]では、多数のゲートウェイがある WBN 環境において、SDN によって経路制御を行っている。これらの研究はどちらも経路制御手法に着目しており、制御通信に関する検討が行われていない。制御ネットワークの構築方法を検討した文献[7][8]においては、制御ネットワークとデータネットワークは同じ物理資源を共有する構成をとっており、制御通信量の増加がデータ通信の帯域に影響を与えてしまう。従って、制御通信の削減の実現が欠かせない。

3 複数チャンネル利用の WBN アーキテクチャとチャンネル有効利用

3-1 複数チャンネル同時利用のためのアーキテクチャ

先行研究[1]では、図 1 に示すように異なるチャンネルを扱う複数台の AP を有線で直列に接続した仮想 AP (VAP) を用いて構築した WBN を提案した。この提案アーキテクチャでは VAP の利用チャンネル数は有線接続する AP の数に応じて増減でき、各ホップにおいて柔軟にチャンネルの切り替えが可能となる。

WMN 上で複数チャンネルを有効利用するために、先行研究ではフロー（送信元・先 IP アドレス/ポート番号で定義）を制御単位とするチャンネル有効利用手法を提案した。SDN の実装としては OpenFlow を用いた。OpenFlow では、OpenFlow コントローラ (OFC) がフローの定義と制御ルールの組（フローエントリ）を決定し、OpenFlow スイッチ (AP) に登録する。AP はフローテーブルに複数のフローエントリを保存し、そのルールに従って実際にフローの操作を行う。また、受信したフローがどのフローエントリにも一致しない場合は OFC に問い合わせ (packet in) を行い、対応するフローエントリを受け取る。このように、OFC が AP に対してフローエントリを適切に登録しながらフロー毎の動的なチャンネル切り替え制御を実現する。

3-2 先行研究：一括フロー選択 複数チャンネル同時利用のためのアーキテクチャ

本手法では、新たに到着するフロー（新規フロー）を容量の大きなチャンネルで一時的に転送し、その後特定のチャンネルに集約する方法を用いる。新規フローが到着した際に、そのフローの送信レートを把握するこ

とは困難である。そのため、新規フローの到着時に残余帯域の少ない無線リンクを用いると、パケットロスが発生する可能性がある。そのため、可能な限り残余帯域が大きい無線リンクに新規フローの割り当てを行い、フローの送信レートが特定できた段階で特定のチャンネルに集約することでチャンネルを有効利用（ネットワーク容量を最大化）する。残余帯域は、チャンネル占有時間（Airtime）を基に算出する[2]。また、多数の新規フローが到着すると、容量が大きいリンクでそれらを同時に転送することになり、無線リンクの残余帯域を正確に把握することができない。そのため、無線リンクの伝送レートと流れるフロー本数から送信レートの期待値を算出し、その値が最大となる無線リンク（高残余リンク）にフローを割り当てる。

また、高残余リンクに割り当てられた新規フローが転送され始めた後、流れているフローの統計情報を取得し、フローの送信レートを把握する。そして、把握したフローの送信レートを基にして、特定のチャンネル（集約チャンネル）にフローを集約する。これにより、新規フローを割り当てる高残余リンクを確保し、新規フロー流入時のパケットロス発生を最小限に抑える。本手法では、(1)のメッセージによって新規フローに対する転送チャンネルを決定し、(2)のメッセージによってフローの送信レート・残余帯域を算出する事でフローの転送チャンネル切り替えを行う。なお、Airtimeの計算には flowstats 取得メッセージで得られるフロー毎の統計情報（処理済みの合計パケット数・合計バイト数）を用いる。

4 無線干渉の検出と適応制御手法

無線干渉により生じるパケット損失の増加を抑え、ネットワーク容量を拡張するためには、無線干渉の素早い見地及び干渉の回避が必要になる。しかし、干渉回避によって被干渉チャンネル自体の利用を控えてしまうと被干渉チャンネルに利用可能な資源が残されていてもそれを有効利用できない。そこで、本研究では無線干渉発生時におけるパケット損失を抑制しつつ、被干渉チャンネルを含めた全チャンネルの周波数資源の有効利用を実現する。

パケット損失抑制と被干渉チャンネルの有効利用を両立するためには、無線干渉をすばやく検知した上で、干渉の影響を受けない程度で周波数資源を利用（トラヒックを転送）することが重要となる。そこで、本研究ではアクセスポイントから取得する統計情報の特徴に基づいて、干渉の発生検知と被干渉チャンネルの空き状況（利用可能帯域）推定を行う。干渉検知後は利用可能帯域に基づいて、被干渉チャンネルで転送中のフローを他チャンネルでの転送に切り替える。

4-1 無線干渉検知と利用可能帯域推定

無線干渉によって輻輳が発生するとフレーム送信に遅延が生じ、未送信のパケットがバッファに蓄積される。本研究では、このバッファ量を計測することで干渉の発生を検出する。VAPを構成する各物理アクセスポイントからインタフェース単位の統計情報を取得し、入力トラヒック量の合計と出力トラヒック量の合計の差分を計算することでアクセスポイント内に滞留するトラヒックの量をバッファ量の増分として計測する。計測タイミングによってバッファ量に誤差が生じるためチェビシェフの不等式を用いて、明確に無線干渉が発生を判断できるバッファ量増分の閾値と、計測誤差と無線干渉を分別するためのバッファ量増分の閾値の2つの基準を定めた。前者は強い無線干渉が発生した場合にバッファ量増分が大幅に増えるため、閾値以上となった場合に干渉と判断する。一方、後者では計測誤差によるバッファ量増分と弱い無線干渉によるバッファ量増分を区別するため、無線干渉の連続性に注目して2回連続してバッファ量増分が設定した閾値を超えた場合に干渉と判断する方法とした。また、ここで取得した出力トラヒック量の合計を干渉状況下でも送信できたトラヒック量（利用可能帯域）として以降のチャンネル利用制御で活用する。

4-2 干渉回避制御

干渉検知時に取得したバッファ量増分に基づいて、干渉回避制御を行う。日干渉チャンネル上で転送中のフローの中からのトラヒック量がバッファ量増分以上で最小となるフローを選択し、転送チャンネルを切り替える。転送先は、フローのトラヒック量に基づいて、そのフローを収容できる空き容量があり、かつ収容後に最も残余が少なくなるチャンネルを選択する。これによって、非干渉チャンネルを利用し続けながらも、利用可能な資源を最大限まで活用することができる。

5 制御通信量を考慮した周波数利用手法

SDNで無線バックボーンネットワークの資源管理を行うと、統計情報取得による現況把握が欠かせない。

これまでの研究ではフロー単位で統計情報を取得しており、制御トラフィック量がフロー数に比例して増加してしまう。制御ネットワークも無線となる環境では、制御通信量がネットワーク容量を圧迫してしまうため、統計情報取得の制御通信を可能な限り削減する周波数利用制御手法を提案する。具体的には、フロー単位の統計情報の代わりに（複数のフロー情報が集約される）インタフェース単位の統計情報を用い、フロー単位での制御が必要な場合には、インタフェース単位の統計情報からフロー単位の情報を推定して利用する。インタフェース単位の統計情報の量は環境によらず変わらないため、フロー数増加時の制御通信量を大幅に削減できる。まず、先行研究で提案した資源利用制御手法（フロー集約手法）を4-1節で説明し、4-2節で同様の制御方針をとりながらも制御通信を削減する一括制御手法を提案する。

5-1 フロー集約手法

本手法では3-2節で説明した通り、新たに到着するフロー（新規フロー）を空き容量の大きなチャンネルで一時的に転送し、その後フローの必要資源量が判明した時点で特定の（空き容量の少ない）チャンネルに集約する方針をとる。新規フローが到着した時点でそのフローの転送に必要なネットワーク容量の把握は困難である。それに伴い、新規フローは到着時点で残余帯域の少ないチャンネルで転送するとパケット損失が発生する可能性があるため、可能な限り残余帯域が大きなチャンネルで転送を開始する。その後、計測を行うことでフローに必要なネットワーク容量を把握し、そのフローを特定のチャンネル（集約チャンネル）に集約することで資源を有効利用する。ただし、多数のフローがまとめて到着した場合や、計測が完了していないフローが存在する場合には、高残余チャンネルではそれら未知のフローが消費するネットワーク帯域が未だ考慮されていない状態である。つまり、特定の高残余チャンネルに全ての新規フローが集中することになり、容量超過で損失が発生してしまう。この様な状況を回避するために、チャンネル毎の残余帯域と未計測フローの数から、フロー単位で獲得できるネットワーク容量が最大（期待値が最大）と見込めるチャンネルを選択して、新規フローを転送する。

高残余チャンネルで新規フローを転送し始めた後、そのフローの統計情報を取得し、フローの送信レートを把握する。その情報を元に、フローを収容可能で空き容量が最小の集約チャンネルを選択し、フローの転送チャンネルを切り替える。これにより新規フローを転送する高残余チャンネルを確保し、新規フロー流入時のパケット損失を抑制する。

5-2 一括制御手法

先行研究では、フロー集約手法をフロー単位の統計情報を取得することで実行していたが、本提案ではインタフェース単位の統計情報に基づいて同様の制御を実現する。フロー集約手法では、高残余チャンネルで一時的に転送したフローを集約チャンネルに集める際に、フロー単位の統計情報が必要である。この時、高残余チャンネルを使う無線インタフェースのインタフェース統計情報を取得し、その時の状況に応じて制御方法を切り替える。全フローをまとめて集約チャンネルで収容できる場合には、フロー単位の情報を扱わず、全フローをまとめて制御する全体一括制御を行う。一方、全フローをまとめて集約できず、一部フローのみを選択する必要がある場合には、フロー単位の情報を推測して一部分のフローのみを集約する部分一括制御を行う。それぞれの詳細を以下に説明する。

（1）全体一括制御

新規フローが到着すると、高残余チャンネルで一時的に転送を開始する。その後、インタフェース統計情報を取得する。インタフェース統計情報は指定したアクセスポイントの指定した無線インタフェース（チャンネル）でのトラフィック送受信の情報が含まれており、対象のアクセスポイントが無線で送受信したフロー全ての情報が含まれる。そのため、フロー単位の情報には分離できない一方で、全てのフローをまとめて扱うことが可能である。そこで、全フローをまとめて集約可能なチャンネルがあるか計算する。具体的には、全てのフローを集約でき、移動後の残余帯域がさらに少なくなる（チャンネル容量をより効率的に利用する）チャンネルがあれば、全てのフローの転送チャンネルを切り替える（図2）。

（2）部分一括制御

全体一括制御でフロー集約できない場合には部分一括制御を行う（図3）。インタフェース統計情報を利用する点は変更せず、その情報からフロー単位の統計情報を予測する。まず、新規フローが到着すると、高残余チャンネルで一時的に転送を開始する。この時、新規フローの到着を知らせる制御メッセージ packet-in が、新規フローを受け取ったアクセスポイントから SDN コントローラへ送られる。packet-in はそのフローを扱う制御ルール（転送チャンネル）がアクセスポイントに登録されるまでは、パケットが到着するたびに SDN コントローラに送られ続ける（図4）。つまり、1つ目の packet-in から制御ルールの登録までの必要時間が一

定（つまり、ネットワーク遅延とコントローラの処理遅延が一定）であると仮定すると、packet-in の数はフローの転送レートに比例する。この特徴を利用し、インタフェース統計情報を packet-in 数の比に分けて、フロー情報として扱う。その情報を元に、先行研究と同様の方法で集約チャンネルに切り替える。

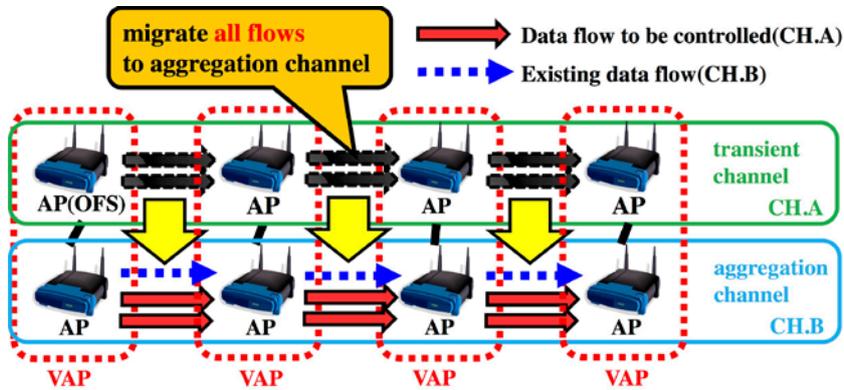


図 2 全体一括制御の概要

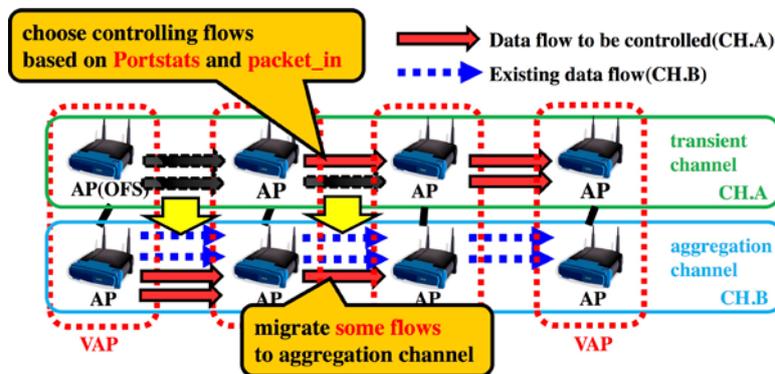


図 3 部分一括制御の概要

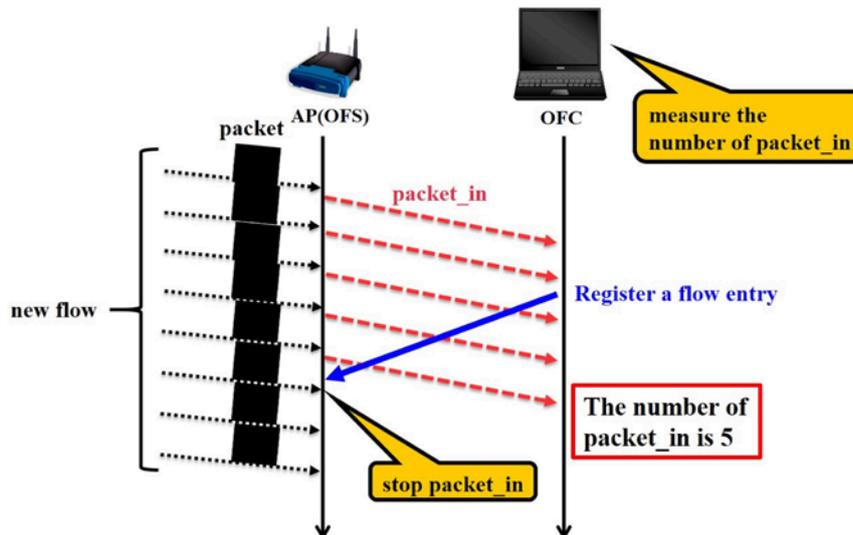


図 4 packet_in メッセージ送信の動作例

6 基礎特性評価

6-1 実験環境の構成

図 1 で示した VAP を実機で構成して、実験を行う。各物理アクセスポイントには Buffalo の WZR-HP-AG300H

に OpenWrt をインストールし、Open vSwitch によって SDN に対応させた。SDN コントローラには Trema を利用し、制御ネットワークでの転送制御が制御内容への影響を最小限とするために、全 AP と有線接続した。

6-2 無線干渉回避の性能評価

6-1 節で説明した VAP を 2 セット用いて 2 チャネル 1 ホップの無線ネットワークを構成し、これとは別に無線干渉を発生させるアクセスポイントと、トラヒック生成を行う PC を準備した。実験では、PC1 から PC2 へ 3 秒ごとに 1Mbps の新規フローを送信開始し、合計 42Mbps になるまで増やし続ける。42 本目のフローの送信が開始された 5 秒後に PC3 から PC4 に向けて 28Mbps の干渉トラヒックを送信する。実験開始から 200 秒後に全てのトラヒック生成を止め、実験を終了する。

本実験における従来手法（フロー集約手法）と提案手法のパケット損失数と損失率を表 1 に示す。パケット損失率で比較すると、従来手法では 20% 弱のパケットが損失したのに対し、提案手法では 1% 以下にまで抑制できていることがわかる。従って提案手法を用いることによって、干渉発生に伴って生じるパケット損失を低減できたといえる。

表 1 の中央値をとった試行についてスループットの時間推移を従来手法は図 5、提案手法のものは図 6 に示す。本シナリオにおける干渉発生地点は実験開始後 128 秒地点である。従来手法では、干渉発生以降は Ch. 116 のスループットが大幅に低下し、合計スループットもこれに伴って低下したままである。一方提案手法は、Ch. 116 のスループットが干渉発生時に大幅に低下しているが、その後に Ch. 132 のスループットが急激に増え、合計スループットの下落状態は 1 秒程度で改善している。これは提案手法の干渉回避制御が適切に動作し、干渉検知後速やかに Ch. 116 に流れていたフローの一部が Ch. 132 に切り替えたことで、スループットがすぐに干渉発生前の水準にまで回復したものと考えられる。また、被干渉チャンネルの利用可能帯域である 14Mbps を継続利用しており、被干渉チャンネルを含めた有効利用も実現している。

6-3 制御通信量削減の性能評価

6-1 節で説明した VAP を 2 セット用いて 3 ホップの無線ネットワークを構成し、周波数は 100 と 132 の 2 チャネルを用いる。本実験では、PC1 が 4Mbps のフローを PC2 へ送信し、20 秒後に 8Mbps と 0.1Mbps のフローを同時に送信開始する。60 秒間トラヒックを継続したのち、実験を終了する。

表 2 に従来手法と提案手法のパケット損失数を示す。この表からは従来手法と提案手法のどちらもパケット損失数は極めて少なく抑えられていることがわかる。従来手法はフロー単位の統計情報を用い、提案手法ではより荒いインタフェース統計情報を用いているにもかかわらず、従来手法と同等の性能を示している。また、制御通信量の比較では、従来手法が実験を通して 412,254 バイトあったのに対し、提案手法では 289,386 バイトに約 30% の削減が実現できている。このように、わずかなフロー数の実験においても、提案手法は大幅な制御通信量の削減を実現できている。以上の結果から、提案手法はフロー集約手法の性能を損なうことなく、制御通信量を削減できたと言える。

表 1 干渉時におけるパケット損失数の比較

	従来手法		提案手法	
	損失数	損失率	損失数	損失率
最大値	98114	19.88%	1791	0.36%
中央値	93985	19.12%	642	0.13%
平均値	96645	19.57%	321	0.07%
最小値	89098	18.04%	266	0.05%

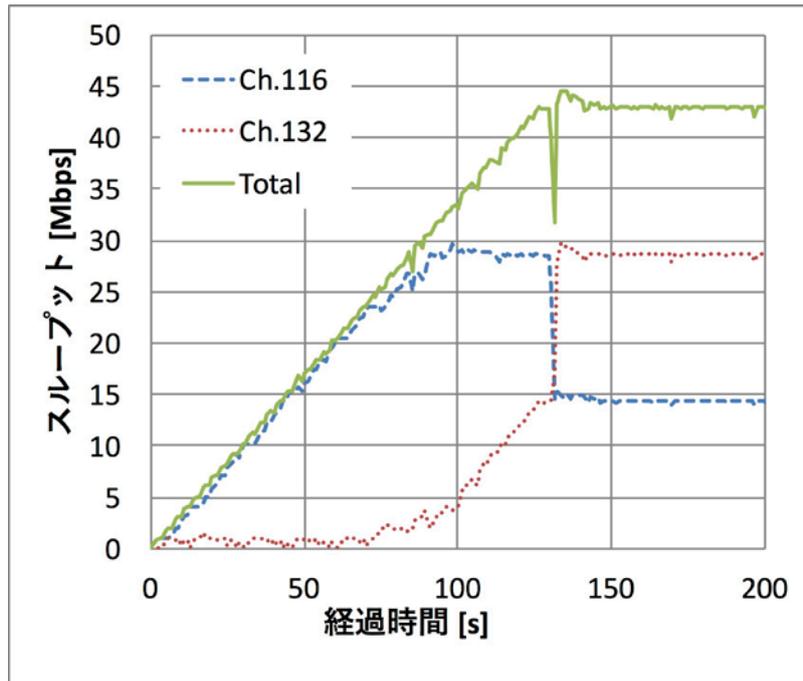


図 5 従来手法のスループット変化

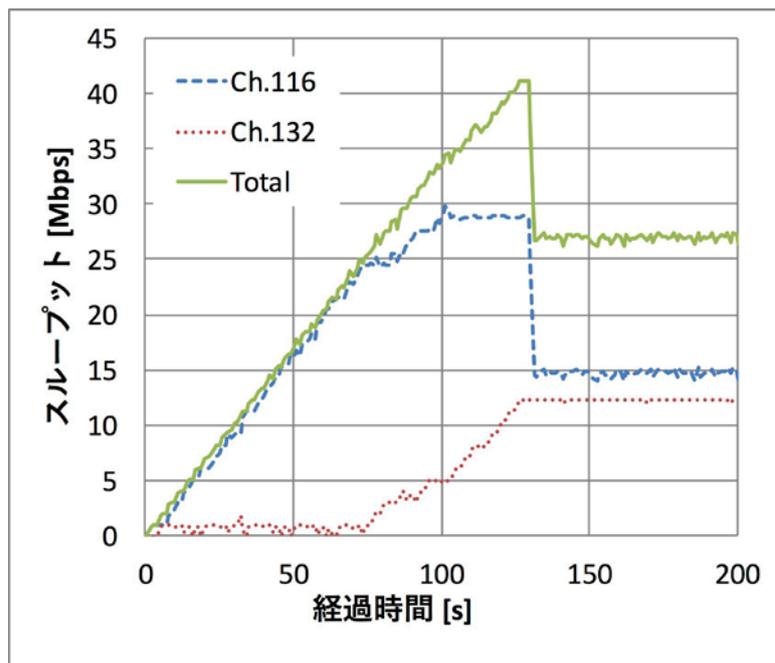


図 6 提案手法のスループット変化

7 まとめ

本研究では、無線バックボーンネットワークの広帯域化を目指し、周波数資源を効率的に活用するためのチャンネル有効利用の研究を行っている。これまでにネットワークにおいて柔軟なチャンネル利用を可能とするアーキテクチャと、そのアーキテクチャ上でチャンネルを有効利用する手法を提案し、その有効性を確認している。しかし、無線環境に差異がなく、制御に係るオーバーヘッドの影響は考慮していなかった。そこで本研究では、無線干渉による無線環境の変化を想定して、被干渉チャンネルの利用可能帯域の低下を適切に検出しながら、チャンネルの利用を回避するのではなく、空き容量を可能な限り活用する手法を提案した。また、制

御通信の削減においては、これまでの研究では全てのフローの詳細情報を収集してチャネル利用制御を行っていたのに対し、荒い情報収集で制御通信を削減しながら、フロー単位の情報を正確に予測する手法を提案した。これらの手法を実環境において評価した結果、無線干渉が発生する環境では被干渉チャネルを含む全ての無線資源を有効に活用できること、また既存手法と同等のチャネル利用効率を実現しながらも制御通信を大幅に削減できることを示した。

【参考文献】

- [1] Y. Taenaka and K. Tsukamoto, "An efficient traffic management framework for multi-channel wireless backbone networks," IEICE Communications Express, vol.3, no.3, pp.98– 103, March 2014.
- [2] M. Tagawa, Y. Taenaka, and K. Tsukamoto, "A Channel Utilization Method for Flow Admission Control with Maximum Network Capacity toward Loss-free Software Defined WMNs," Proceedings of the 14th International Conference on Networks (ICN 2015), February 2016.
- [3] K. N. Ramachandran, et al. "Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks." INFOCOM, 2006.
- [4] S. Kim, J. Cha, and J. Ma. "Interference-aware channel assignments with seamless multi-channel monitoring in wireless mesh networks." IEEE International Conference on Communications (ICC), 2009.
- [5] F. Juraschek, and G. Mesut. "External interference-aware channel assignment." 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013.
- [6] Y. Peng, L. Guo, Q. Deng, Z. Ning, and L. Zhang, "A Novel Hybrid Routing Forwarding Algorithm in SDN Enabled Wireless Mesh Networks," Proceedings of IEEE International Symposium on Big Data Security on Cloud, pp.1806–1811, August 2015.
- [7] P. Dely, A. Kasser, and N. Bayer, "OpenFlow for Wireless Mesh Networks," Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2011), pp.1–6, August 2011.
- [8] A. Detti, C. Pisa, S. Salsano, and N. Blefari-Melazzi, "Wireless Mesh Software Defined Networks (wmSDN)," Proceedings of IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2013), pp.89–95, November 2013.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Estimation Based Adaptable Flow Aggregation Method for Reducing Control Traffic on Software Defined Wireless Networks	In Proceedings of The 8th International Workshop on Information Quality and Quality of Service for Pervasive Computing	2017年3月
Multi-Radio Software Defined WMNにおける無線干渉回避制御手法の性能評価	電気情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2017年3月
Multi-Channel Software Defined WMNにおける無線干渉度合の推定および干渉回避制御に関する初期検討	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2016年10月
Software Defined Wireless Networkにおける制御トラヒック削減とチャネル有効利用を両立したフロー集約手法 ～マルチチャネル無線メッシュネットワークにおける有効性評価～	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会	2016年9月