

動的資源適合型ネットワークシステムにおける周辺端末連携機能 の実装と評価

戸川和晃[†] 橋本浩二[†]

概要: ネットワークトラフィックが増加傾向にある中で, 大規模イベント開催時や自然災害発生時は通常よりも多くのネットワーク資源がネットワークの末端で求められる. LTE などの高速通信が可能なスマートデバイスの普及によって, 誰もが高速通信を可能とする環境が整いつつあるが, 局所的かつ一時的に増加するトラフィックをより効率的に処理するためには, ユーザが所有しているスマートデバイスを活用することが有効であると考えられる. ここで, 1台のスマートデバイスで処理することができるトラフィックには限度があるため, 複数のスマートデバイスを協調動作させることが必須となる. しかし複数台のスマートデバイスを協調させ, ネットワーク資源を集約する仕組みは確立されていない.

そこで我々は動的資源適合型ネットワークシステムにおいて, 周辺端末連携機能を開発した. 開発した周辺端末連携機能ではユーザのスマートデバイスのネットワーク資源を集約し, 利用可能帯域を増加させること目的としている. 上述した機能を実現するために, 我々は Software Defined Networking (SDN)と SDN を実現するためのプロトコルである OpenFlow を使用した.

本稿では, 提案システム的设计やプロトタイプシステムの構築について述べる. プロトタイプシステムを用いた評価実験では, 周辺端末の台数とスループットの関係性を評価し, 周辺端末数が増加するにつれて利用可能帯域が増加し, また, スループットのばらつきも小さくなることを示した.

Implementation and Evaluation of Cooperative Device Functions for Dynamic Resource Adaptive Network System

KAZUAKI TOGAWA[†] KOJI HASHIMOTO[†]

1. はじめに

近年, ネットワークトラフィックは増加し続けている. 総務省の報告によると, 我が国のブロードバンド契約者の総ダウンロードトラフィック想定値は 2014 年 5 月時点で 2,892Gbps だったのに対して, 2015 年 5 月には 4,439Gbps と約 53.5%増加している[1]. 同様に総アップロードトラフィックの想定値も 905Gbps から約 35.5%増加し 1,226Gbps となっている. また, 固定通信トラフィックだけではなく, 移動通信トラフィックもダウンロードとアップロードともに増加し続けている.

さらに, 大規模イベント開催時や自然災害発生時は局所的かつ一時的にネットワークトラフィック量が通常時と比べて多くなることが分かっている. また, 大規模イベントではライブ配信サービスを通じてイベントの様子を配信することも多くなってきた. 今後は 4K などより高解像度での配信サービスが開始されることも想定されることから, ネットワーク全体だけではなく, このような局所的かつ一時的なトラフィックも増加し続けると考えられる. また, 自然災害発生時においても, 2016 年の熊本地震では, 自

衛隊の復興拠点周辺のモバイルトラフィックが増加したことが報告されている[2].

これまで, ネットワークトラフィックの増加に対応するために数多くの研究や開発がなされてきた. しかしながら, 多くの手法ではネットワーク全体のトラフィックの増加に着目しており, 大規模イベント開催時や自然災害発生時に発生する局所的かつ一時的なトラフィックの増加にはあまりフォーカスが当ててこられなかった. そのため, 局所的かつ一時的なトラフィックの増加には, 移動体通信事業者の移動基地局車の派遣によって対応しているのが現状である. しかしながら, イベント開催時や自然災害発生時におけるトラフィックの増加に対して, 移動基地局車を派遣する等の対応が常にとれるわけではないので, 利用可能な機器を組み合わせることにより, 一時的なトラフィックの増加に対処できる方法が必要となる.

ここで, スマートフォンをはじめとするスマートデバイスは全世界で普及しており, 今後も普及が進んでいくと予測されている[3]. 多くのスマートデバイスは 3GPP[4]によって仕様が検討されている LTE や LTE-Advanced に対応しており, 高速な通信が可能である. この高速通信に対応したスマートデバイスの普及によって, 誰もが高速通信を可能とする環境が整いつつある. また, 次世代の通信規格で

[†] 岩手県立大学 ソフトウェア情報学研究科
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

ある 5G では屋外移動環境での 10Gbps 伝送実験が成功しており、さらなる通信速度の向上が期待されている[5].

このような背景から、一時的かつ局所的なトラフィックの増加に対して、高速通信が可能なスマートデバイスを活用することは有効であると考えられる。また、多くのスマートデバイスには標準でテザリング機能が組み込まれており、このテザリング機能によって、スマートデバイスのネットワーク資源を他の機器でも使用することは可能である。しかしながら、1 台のスマートデバイスで処理することができるトラフィック量には限界がある。例えば、イベントの複数地点の様子をストリーミング配信する場合、高品質で同時に配信することは困難であることが想定される。もし、必要に応じてネットワーク資源を集約することが可能となれば、品質を保ったまま複数地点のストリーミング配信が可能になると考えられる。

また、ネットワーク資源を提供するスマートデバイスの管理は 1 台の機器で集中管理できることが望ましい。例えば、必要なネットワーク資源が多い場合、ネットワーク資源を提供するスマートデバイスの台数も増加する。これらの管理を個々のスマートデバイス自身で実行する場合、スマートデバイスを追加するたびにそれぞれの機器でネットワーク構成の変更作業をする必要がある。1 台の機器でスマートデバイスを集中管理することによって、容易にネットワーク構成を変更することが可能となる。

さらに、スマートデバイスのネットワーク資源を集約するネットワークシステムを構築する機器は、容易に準備可能である必要がある。準備することが難しい機器で構成される場合、移動基地局車と同じようにイベント開催者や自治体で準備することが困難になってしまう。このため、イベント開催者や自治体でも容易に手に入れることができる機器でネットワークシステムを構築する必要がある。

以上を踏まえ、提案するネットワークシステムの要件を次の通りまとめる。

要件 1 : 複数台のスマートデバイスのネットワーク資源を集約し、利用可能帯域を増加させること。

要件 2 : ネットワーク資源を提供するスマートデバイスの管理が 1 台の機器で集中管理できること。

要件 3 : イベント開催者や自治体でも容易に準備できる機器によってシステムが構築できること。

これらの要件を満たすためには、汎用機器によって容易にスマートデバイスのネットワーク資源を集約する機能が必要である。そこで、本論文では、周辺端末連携機能の実装と評価について述べる。

以下、2 章では関連研究について述べる。3 章では提案するシステムの概要や構成、4 章では提案手法について述べる。5 章ではプロトタイプシステムの実装について述べ、6 章ではその有効性を評価し、7 章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

ここで、この章ではネットワーク資源の集約の実現に対して関連する研究について述べる。

文献[6]は複数のインターネットアクセス網を動的に切り替えることによって、いかなる状況においても通信可能とする Never Die Network (NDN) と呼ばれるネットワークシステムを提案している。しかし、NDN では通信衛星や 3G, FTTH などの複数のインターネットアクセス網を備えているにもかかわらず、ネットワーク資源を集約することはできない。断絶や輻輳が発生していないインターネットアクセス網が複数存在しても、それらが同時に使用されることは考えられていない。

文献[7]は並列 TCP ストリームを異なるパスに割り当てることで GridFTP のデータ転送パフォーマンスを向上するネットワークシステムを提案している。しかしこのシステムでは転送前から存在する経路の中で転送に使われるパスを決定する。動的に資源を追加し、パスの数を動的に変化させることは考慮していない。文献[8]はイントラドメインネットワークのスケラブルなルーティングとリソース管理モデルを提案している。しかしながらこの提案システムにおいても、事前に確立されているパスのみを考慮している。

このように複数のパスを動的に切り替えることによって輻輳や断絶を回避する研究や、複数のパスを集約することによって転送パフォーマンスを向上させる研究が行われているものの、利用可能帯域を広げるために、スマートデバイスのネットワーク資源を適応するためには新しいシステムが必要であると考えられる。

3. システム概要

関連研究をふまえ、この章では提案システムの概要について述べる。要件 1 に対しては、スマートデバイスを動的に認識し、トラフィックをスマートデバイスへ分散させる機能として周辺端末連携機能を実現させる。そのために、スマートデバイスが自身のネットワーク資源や端末情報をシステムに通知するための仕組みと、通知されたネットワーク資源や端末情報を管理する仕組みが必要となる。また、トラフィックをどのスマートデバイスで転送するかを決定するアルゴリズムも必要となる。これらの仕組みとアルゴリズムを実現した上で、要件 2 に対しては 1 台の機器でネットワークを制御する仕組みを、要件 3 に対しては汎用機器によってネットワークシステムを構築可能とする仕組みを実現する。

提案するネットワークシステムを実現するために、本論文では Software Defined Networking (SDN) を適用した。SDN はソフトウェアによってネットワークの設定や構成を動的に制御することができるネットワーク技術である。

SDNの1番の特徴は既存のネットワークをデータ転送するデータプレーンと制御するコントロールプレーンに分割した点である。これによって複数のネットワーク機器を集中的かつ容易に制御することが可能になった。構築したプロトタイプシステムではSDNを実現するため、Open Networking Foundation [9]によって標準化されているOpenFlowプロトコルを使用した。

3.1 システム構成

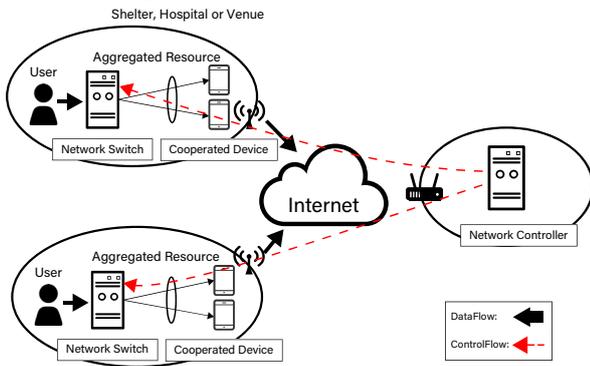


図1: システム概要図

図1は提案システムの概要図を示している。提案システムはネットワークコントローラ、ネットワークスイッチ、周辺端末の3つによって構成されている。

(1) ネットワークコントローラ

ネットワークコントローラはネットワークを通じて常にネットワークスイッチと周辺端末と接続し、ネットワークスイッチと周辺端末を制御するものである。ネットワークコントローラは接続されている周辺端末の管理やルーティングの決定をする。

(2) ネットワークスイッチ

ネットワークスイッチは局所的かつ一時的なトラフィックの増加が想定される避難所や病院、イベント開催地などに設置され、インターネットゲートウェイとして動作する。ネットワークスイッチはネットワークコントローラが決定したルールに従ってパケットを転送する。

(3) 周辺端末

周辺端末は自身のネットワーク資源を提供するスマートデバイスである。周辺端末はネットワークスイッチに接続され、パスとして動作する。ユーザが送出したパケットはネットワークスイッチを通じて周辺端末に転送される。周辺端末は転送されてきたパケットを送出する。

3.2 システムアーキテクチャ

図2は提案システムのシステムアーキテクチャを示している。

ネットワークコントローラのシステムアーキテクチャはCooperative Device Manager, Routing Controller, System Message Handler および SDN によって構成されている。

Cooperative Device Managerはネットワークスイッチに接続されている周辺端末を管理する。Routing Controllerはパケットの経路を制御するもので、Cooperative Device Managerと連携し、パケットを転送する周辺端末を決定する。System Message Handlerはネットワークスイッチや周辺端末を制御するためのシステムメッセージを制御する。SDNはSystem Message Handlerとともに、OpenFlowプロトコルを扱う。

ネットワークスイッチのシステムアーキテクチャはSwitch Information Manager, Forwarding Controller, System Message Handler および SDN によって構成されている。Switch Information Managerはネットワークスイッチに接続されている周辺端末の情報を管理する。管理されている情報はネットワークコントローラのCooperative Device Managerに送信される。Forwarding ControllerはネットワークコントローラのRouting Controllerが決定したルールに従ってパケットを転送する。

周辺端末のシステムアーキテクチャはApplication, Forwarding Controller, Connection Controller および System Message Handler によって構成されている。Applicationは周辺端末全体を管理する。周辺端末のForwarding Controllerはネットワークスイッチから転送されたパケットを転送する。Connection ControllerはネットワークスイッチのSwitch Information Managerと連携し、ネットワークスイッチと周辺端末間の接続をやり取りする。

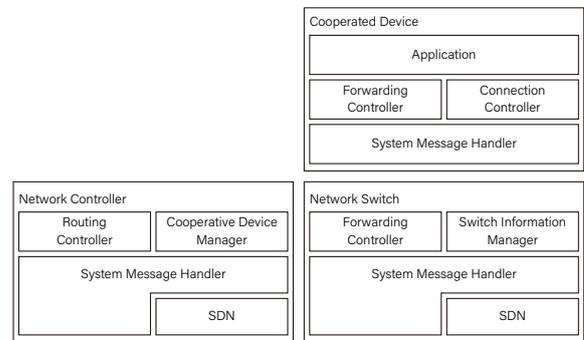


図2: システムアーキテクチャ

4. 周辺端末選択アルゴリズム

図3は提案システムの概要を示している。提案システムにおける周辺端末連携機能は以下の手順で実行される。

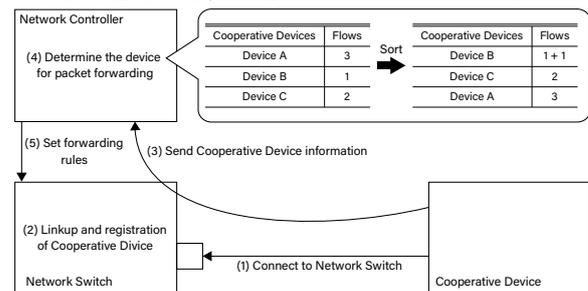


図3: 提案システムとアルゴリズムの概要図

- (1) 周辺端末がネットワークスイッチに接続される。
- (2) ネットワークスイッチは周辺端末をリンクアップし、パスとして登録する。これによってネットワークスイッチと周辺端末間の接続が確立する。
- (3) 周辺端末の情報がネットワークスイッチを通じてネットワークコントローラに送信される。この時送信される情報は、周辺端末のネットワークスイッチと接続されている側の MAC アドレスとポート番号である。
- (4) ネットワークコントローラはパケット転送に使用する周辺端末の決定を行う。この決定は後述する新規 Flow が検知された時に実行される。
- (5) 上記(4)で決定された転送ルールがネットワークコントローラからネットワークスイッチに通知される。ネットワークスイッチはネットワークコントローラから通知された転送ルールに従ってパケットを転送する。

ここからはどのようにパケット転送に使用される周辺端末が決定されるのかについて述べる。提案システムは周辺端末が所有しているネットワーク資源を集約するものである。図 1 で示しているように、提案システムはネットワークスイッチを通じてユーザからのストリームを各周辺端末へ分散させることで、ネットワーク資源を集約している。よって、この周辺端末選択アルゴリズムで考慮されるストリームはネットワークスイッチを通じて WAN 側に転送されるものである。

一方、ネットワークスイッチを通じて通信を行うユーザは複数おり、またユーザは同時に複数の通信を行うことが想定される。複数のユーザの複数のストリームをそれぞれの周辺端末に分散させるため、提案システムでは送信元 MAC アドレスと送信元プロトコル番号を使用してストリームを判別する。そこで、提案システムにおける Flow を以下のように定める。

- 送信元 MAC アドレスと送信元プロトコル番号を 1 つの組にする
- 上記の組においていずれか一方でも違う組

上記で述べた Flow で新規のものを検知した時、周辺端末選択アルゴリズムが実行される。ここからは周辺端末選択アルゴリズムについて述べる。周辺端末選択アルゴリズムは以下に示す手順で実行される。

- (1) ネットワークコントローラはネットワークスイッチに接続されている周辺端末の情報を取得する。取得した情報をもとに周辺端末を使用している Flow の本数のリストを作成する。
- (2) 新規の Flow を検知した時、上記(1)で作成した Flow の本数のリストを昇順ソートする。その結果 Flow の本数が 1 番少ない周辺端末をパケット転送に使用する端末に決定する。Flow の本数が同一のものがある場合は、ネットワークスイッチに接続された順でソ-

ートし、1 番古いものが選択される。

- (3) 選択された周辺端末の Flow の本数を 1 増加させ、リストを保存する。

5. プロトタイプシステム

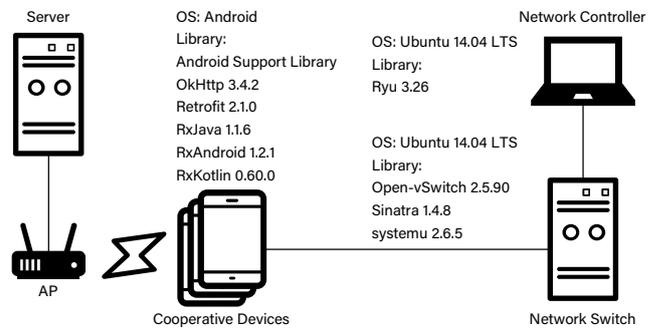


図 4: プロトタイプシステム

提案システムの有効性を評価するため、汎用機器を用いたプロトタイプシステムを実装した。この章からはプロトタイプシステムについて述べる。

図 4 で示している通り、ネットワークコントローラとネットワークスイッチは汎用端末、周辺端末は Android 端末を使用した。ネットワークコントローラには SDN Framework である Ryu[10]をインストールし、1 台の機器でネットワークスイッチと周辺端末を制御する。ネットワークスイッチにはソフトウェアスイッチとして Open-vSwitch[11]を使用した。また、systemu によって、周辺端末が接続された際、リンクアップと Open-vSwitch への登録を動的に実行する。さらに、OkHttp, Retrofit, Rx, Sinatra などのライブラリを使用し、周辺端末の情報がネットワークスイッチを通じてネットワークコントローラへ通知される RESTful アプリケーションを実装した。このアプリケーションによって周辺端末の MAC アドレスなどの情報をネットワークコントローラへ送信し、受け取った情報をもとにネットワークコントローラがシステムを制御する。

周辺端末とネットワークスイッチ間は Android USB テザリング機能によってリンクが確立されている。Android のテザリングには WiFi によるテザリング、Bluetooth によるテザリング、USB によるテザリングの 3 種類がある。WiFi テザリングは AP と接続しながらテザリングが出来ない点や、電池消費が激しいという特徴がある。Bluetooth テザリングは電池消費が少ないものの、スループットが小さい (約 3Mbps)。USB テザリングは給電しながら使用することができ、スループットも確保できることから 3 種類の中で 1 番適当であると考えられる。

汎用端末の NIC はすべて 1000Base-T で構築されており、WLAN については IEEE 802.11g を使用して構築した。以下よりこのプロトタイプシステムを使用した性能評価実験について述べる。

6. 評価実験

プロトタイプシステムを実装した汎用機器を用いて、実験用ネットワークシステムを構築し、評価実験を行った。

図5は評価実験のためのネットワーク構成図である。

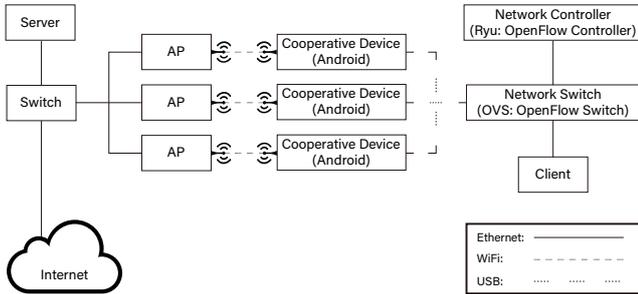


図5: ネットワーク構成図

評価実験では周辺端末台数とスループットの関係を示すため、周辺端末を増加させたとき、また減少させたときのスループットがどのように変化するかを測定した。まず、周辺端末を増加した場合について述べる。実験ではストリーム A, B, C の3本のストリームを送出し、周辺端末の台数は1台から3台へ増加させた。また、周辺端末を増加するにつれて AP も増加させた。実験で用いたパラメータの値を以下の表1に示す。

表1: 端末増加実験パラメータ

Parameter	Value
Number of devices	1~3
Number of streams	3
Bitrate	10Mbps
Protocol	UDP
Tool	iperf
Number of test	3
Measurement time	180s

評価シナリオは以下の通りである。

- (1) ストリーム A を送出。
- (2) ストリーム A 送出 15 秒後にストリーム B を送出。
- (3) ストリーム A 送出 30 秒後にストリーム C を送出。

表2: 評価実験結果

Number of Cooperative Devices	Used bandwidth	Standard deviation
1	24.2 Mbps	0.84
2	28.5 Mbps	0.51
3	30.0 Mbps	0.16

表2はストリームCが送信されてからの平均使用帯域と標準偏差をそれぞれ示している。表2より、提案システムは周辺端末のネットワーク資源の集約を実行することによって、データ転送パフォーマンスが改善している。周辺端末が2台の場合、周辺端末が1台の時と比べて18パーセント使用帯域が増加した。加えて、周辺端末が3台の場合、周辺端末が1台の時と比べて24パーセント使用帯域が増加した。さらに周辺端末が3台の場合の平均使用帯域は30Mbpsであり、これは送出したすべてのトラフィック量と等しい。これらの結果より、提案システムはいくつかの周辺端末のネットワーク資源を集約することによって、1台の周辺端末では扱えないトラフィックを扱うことを可能にする。また、周辺端末の台数が増加するにつ

れて、標準偏差も小さくなっていくことから、リアルタイム通信においても効果があることを示している。

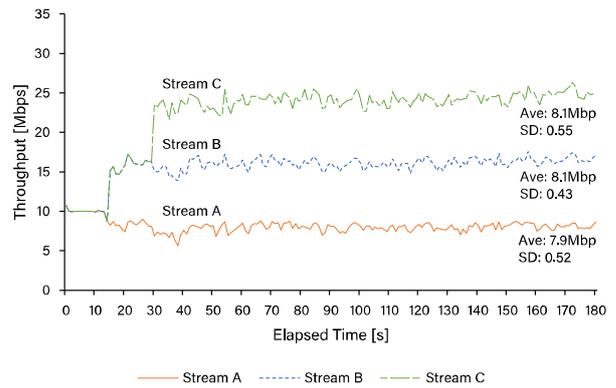


図6: 周辺端末が1台の時の各ストリームの使用帯域

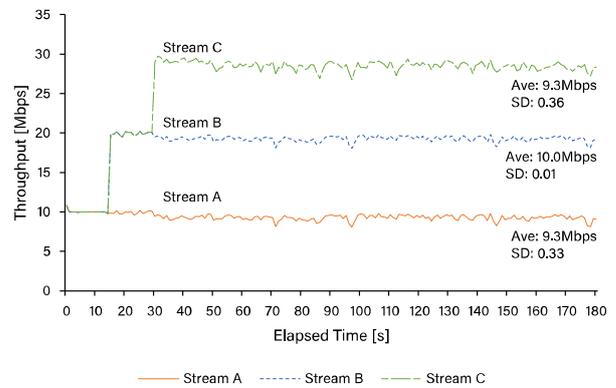


図7: 周辺端末が2台の時の各ストリームの使用帯域

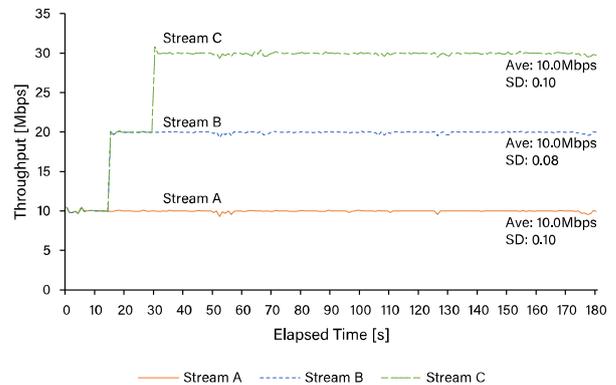


図8: 周辺端末が3台の時の各ストリームの使用帯域

図6, 7, 8は各ストリームの平均スループットを積み上げグラフで示しており、また、ストリームC送出後からの各ストリームの平均スループットと標準偏差を示している。

図6では、1台の周辺端末では扱えないネットワーク資源が求められていることから、トラフィックを扱いきれていないことが示されている。図7では、周辺端末の台数が増えたことによって、周辺端末が1台の時と比べてうまくトラフィックが扱えていることを示している。しかしながら、2本のストリームが流れている周辺端末ではすべてのトラフィックを扱いきれていない。図8では、

周辺端末の台数が3台になったことですべてのトラフィックが扱いきれていることが示されている。特に、図8ではそれぞれのストリームが安定していることが分かる。

ここからは、端末を切断したときの実験について述べる。この実験では2本のストリームを送出し、途中で周辺端末を切断する。実験で用いたパラメータを表3に示す。

表3: 端末切断実験パラメータ

Parameter	Value
Number of devices	1-2
Number of streams	2
Bitrate	10Mbps
Protocol	UDP
Tool	iperf
Number of test	3
Measurement time	60s

端末切断時の評価シナリオは2台の周辺端末が接続されている状態でストリームAとBの2本を送出する。送出30秒後に周辺端末を1台切断する。各ストリームの平均使用帯域の積み上げグラフを以下に示す。

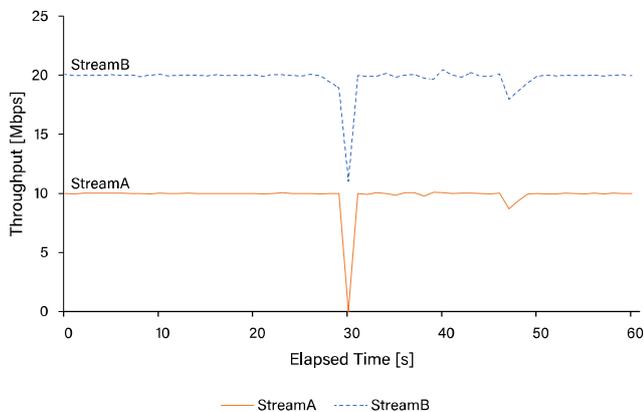


図9: 周辺端末を2台から1台にした時の使用帯域

図9で示されている通り、ストリームを送出している周辺端末が切断された場合、一時的にスループットが低下する。これは、パケットの転送に使われる周辺端末が切り替えられた際、送信元IPアドレスも変化してしまうことから、iperfが切断状態になることが理由として考えられる。しかし、このように一時的に切断状態になってしまうものの、すぐにスループットが回復することから、周辺端末の切断を動的に検出し、パケットの転送ができることが分かる。提案システムでは送信元MACアドレスと送信元プロトコル番号によってFlowを管理しているため、周辺端末の切断によってIPアドレスが変化しても対応可能なことが分かる。

7. まとめと今後の課題

本稿では利用可能帯域を増加させる周辺端末連携機能を提案した。提案システムはスマートデバイスのネットワーク資源を動的に集約することを可能にする。これによって、局所的かつ一時的なトラフィックの増加に対応できる。さらに、評価のための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は1台のコントローラによってネッ

トワークスイッチと周辺端末が集中制御される。これによって、ネットワーク資源の集約が柔軟に可能となった。また、プロトタイプシステムは汎用機器によって構成されているため、自治体やイベント開催者でも容易に準備可能であると考えられる。プロトタイプシステムを用いた評価実験では周辺端末の台数が増加するにつれ、利用可能帯域が増加することを示した。また、スループットのばらつきが小さくなることからストリーミングサービスのようなリアルタイム通信にも有効であることを示した。また、周辺端末が切断されたとしても、提案システムが接続されている周辺端末でルーティングの切り替えを動的に実行することも示した。

しかしながら、今回の評価実験では周辺端末の台数が3台と非常に小さい規模の実験にとどまっている。今後は周辺端末台数を増やしたより大きい規模での実験が必要である。また、周辺端末の接続と切断が同時に行われる場合を考慮したより動的な環境での実験も行っていく。さらに、より効果的にネットワーク資源の集約を可能とするために、アルゴリズムを改良していく。

参考文献

- [1] 総務省: 我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果 (平成27年5月分) (オンライン), 入手先 <http://www.soumu.go.jp/main_content/000378950.pdf> (参照 2017-05-08).
- [2] KDDI: 熊本地震における通信ネットワークへの影響と対応について (オンライン), 入手先 <<http://www.kiai.gr.jp/jigyuu/h28/PDF/1220p7.pdf>> (参照 2017-05-08).
- [3] Cisco: Cisco Visual Networking Index : 全世界のモバイル データ トラフィックの予測、2014 ~ 2019 年アップデート (オンライン), 入手先 <http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/pdf/white_paper_c11-520862.pdf> (参照 2017-05-08).
- [4] 3GPP, <<http://www.3gpp.org/>> (参照 2017-05-08).
- [5] 須山聡, 沈紀暉, 小田恭弘: 超高速移動通信の実現に向けた10Gbps 屋外無線伝送実験 (オンライン), 入手先 <https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol21_4/vol21_4_022jp.pdf> (参照 2017-05-08).
- [6] Goshi Sato, Koji Hashimoto, Noriki Uchida, Yoshitaka Shibata: Network Link Selection Method for Disaster Oriented Mobile Network Based on OpenFlow Framework, Proc of Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), 2013 Seventh International Conference, pp.326 - 330 (2013).
- [7] Che Huang, Chawanat Nakasan, Kohei Ichikawa: A Multipath Controller for Accelerating GridFTP Transfer over SDN, IEEE 11th International Conference on e-Science, pp.439-447 (2015).
- [8] M. Rasih Celenlioglu, H. Ali Mantar: An SDN Based Intra-Domain Routing and Resource Management Model, 2015 IEEE International Conference on Cloud Engineering, pp.347-352 (2015).
- [9] Open Networking Foundation, <<https://www.opennetworking.org/>> (参照 2017-05-08).
- [10] Ryu SDN Framework, <<https://osrg.github.io/ryu/>>, (参照 2017-05-08).
- [11] Open vSwitch, <<http://openvswitch.org/>>, (参照 2017-05-08).