

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11253

研究課題名（和文）組織内ネットワーク消費電力削減のためのSDNスイッチ間通信速度切替方式の開発

研究課題名（英文）Development of Adaptive Link Rate Switching between SDN Switches in Organization Networks to Reduce Power Consumption

研究代表者

木村 成伴（KIMURA, Shigetomo）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：20272180

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大学などの組織が、所属する拠点間を接続し、かつ外部ネットワークと接続するために所有する、SDN (Software Defined Network) スイッチで構築されたネットワークの消費電力削減方式を開発した。通信実験により、キャンパスネットワークを仮定したトラフィックパターンに当てはめた24時間分の合計消費電力が、消費電力削減対策を適用しない場合と比較して12.39%削減されることなどを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネットワーク機器の省電力化とネットワーク性能の向上はトレードオフの関係にあり、通信機器の消費電力を削減すると、通信速度の低下や遅延の増加といったネットワーク性能の低下を招くことになる。本研究で開発した方式によって、組織内ネットワークの消費電力を削減するものであり、マルチパスを利用して、消費電力を過剰に増やすことなく、最大通信速度を段階的に増減する手段を提供することから、その学術的意義や社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This research has developed an adaptive link rate switching method to reduce power consumption of a network that is constructed by SDN (Software Defined Network) switches and belongs to an organization such as a university to connect between organization's departments and also between a department and an external network. A communication experiment showed that the total power consumption applied by some 24-hour traffic pattern assumed as a campus network's one is reduced by 12.39% compared to the normal network without any adaptive link rate switching methods.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：省電力化 通信速度切替方式 組織内ネットワーク SDN

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、インターネットトラフィックが急増し、ネットワークにおける通信速度向上への要求が高まっている。その一方で、ネットワーク通信機器の消費電力の削減も重要な課題になっている。ネットワーク機器の省電力化とネットワーク性能の向上はトレードオフの関係にあり、通信機器の消費電力を削減すると、通信速度の低下や遅延の増加といったネットワーク性能の低下を招くことになる。以上を踏まえて、本研究の研究者は、2010年から2012年にかけて、家庭や小規模オフィスのネットワークを対象に、宛先 IP アドレスに応じて Gigabit Ethernet の通信速度を切り替える方式を提案した。また、2016年に、クライアントが Gigabit Ethernet と無線 LAN といった複数のネットワークインタフェースを持つことを前提に、宛先 IP アドレスに応じて、使用するリンクを切り替える方式を提案した。これにより、クライアント自身やクライアントが

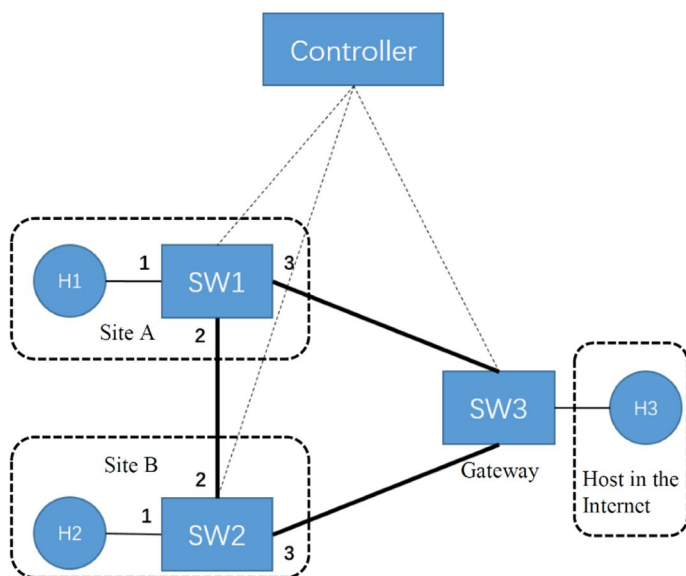


図1 対象とする組織内ネットワーク

接続するネットワークの省電力化を達成しつつ、リンクの切り替えはほとんど生じないことを示したが、より規模の大きなネットワークの省電力化が求められていた。そこで、2017年から、図1に示す組織内ネットワークの消費電力を削減する方式を提案した。このネットワークはSDN (Software Defined Network) スイッチ(SW)で構築され、大学などの組織が、所属する拠点(Site)間を接続し、かつゲートウェイを経由して、Siteと外部ネットワークを接続するために所有するものである。各スイッチは、コントローラと接続しており、リンクの最大通信速度などの設定を集中管理できることを仮定している。

2. 研究の目的

図1のネットワークにおいて、研究代表者らは、文献[1]において、以下の方式を提案していた。まず、消費電力を削減するため、初期状態ではスイッチ間リンクをスリープ状態にするか、できない場合は最大通信速度を低帯域(例えば、100Mbps)にしておく。拠点の1つに接続するクライアント(例えば、H1)が外部ネットワークのサーバ(H3)と100Mbpsで通信するとき、図2(a)のように最短経路のリンクを低帯域として通信する。このとき、MPTCPを用いて、複数のサブフロー(図では50Mbpsのサブフロー2本)で接続するものとする。クライアントが増えると、図2(c)のようにスイッチ間のリンクを高帯域(1Gbps)にして必要な帯域を提供するが、クライアントが2台の場合、必要な帯域は合計200Mbpsなのに、1Gbpsを提供するのは無駄である。そこで、図2(b)のように、最短経路の他、他のスイッチをバイパスする経路をいずれも低帯域で接続し、2つのパスにそれぞれのサブフローを分散することで、200Mbpsである中間の最大通信速度を提供することができる。これにより、リンクを高帯域にするよりも消費電力が削減できることを、Linuxを搭載したPCで構成したOpenFlowスイッチを用いた評価実験で確認している。

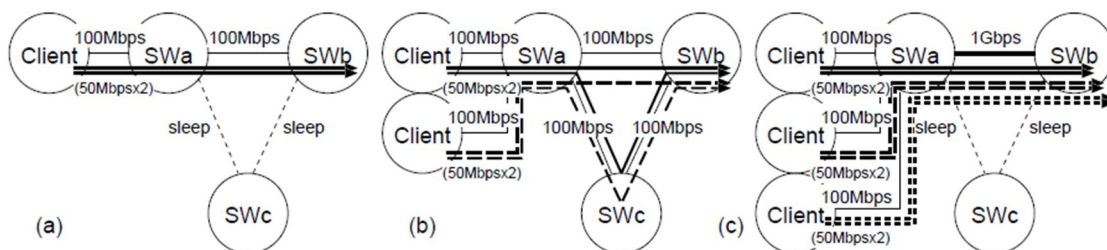


図2 マルチパスによる中間の最大通信速度の実現

以上を踏まえて、研究計画では、以下の2つを研究の目的とした。

(1) 専用 OpenFlow スイッチによる通信実験

実際の組織内ネットワークを構築する場合、専用のハードウェアを用いた OpenFlow スイッチを用いることが想定される。申請研究では、専用 OpenFlow スイッチによるネットワークを構築し、この上に通信速度切替方式を実装する。そして、通信実験により消費電力の削減

の効果が同様にあることを示す。

- (2) 複数の拠点と同時に通信した場合の通信速度切替方式の開発
文献[1]の方式は、図 1 の H1 と H2 が同時に H3 と通信すると、中間帯域で使用するパイパスが互いに影響し合う。例えば、図 2(b)において、SWa と SWc の間のリンク、及び SWc と SWb の間のリンクは SWa に接続した 2 台のクライアントからパイパスとして使われているので、SWc に接続したクライアントが外部ネットワークと通信すると、パイパスは影響を受けることになる。この問題を改善するため、通信速度切替方式を複数の拠点が同時に通信した場合に対応できるように文献[1]の方式を拡張する。

3. 研究の方法

- (1) 専用 OpenFlow スイッチを用いて、文献[1]の方式を実装する。これを用いた通信実験を行い、消費電力を考慮せずに常に高帯域で通信した場合、中間帯域は用いずに、通信量が増えたら低帯域から高帯域に切り替える場合と比較して、ネットワークの消費電力がどの程度削減できるか確認する。なお、ネットワーク機器の低価格化に伴い、10Gb Ethernet が普及し始めており、10Gb Ethernet によって、通信実験を行うことも期待された。
- (2) 複数の拠点が外部ネットワークと同時に通信したときでも対応できる拡張方式を実装する。そして、(1)と同様に通信実験を行い、ネットワークの消費電力がどの程度削減できるか確認する。なお、文献[1]の方式は、1つの通信で複数の経路を利用するため、MPTCP の使用を前提しているが、既存のアプリケーションが使用している TCP や UDP でも利用できるようにすることも期待された。

4. 研究成果

- (1) 専用 OpenFlow スイッチにより、10Gb Ethernet を用いて、低帯域を 1Gbps、高帯域を 10Gbps とした実験結果は文献[2]で発表しており、消費電力が削減できることを示している。
- (2) (2)の研究成果として、以下の3つが挙げられる。
文献[1]の方式を TCP や UDP でも利用できるように拡張した方式を文献[3]で発表しており、消費電力が削減できることを示している。この方式では、OpenFlow バージョン 1.3 以降に導入されたメータテーブルを用いて、予め指定した帯域以上を使用したフローを複数のパスに分割することで、文献[1]の方式を MPTCP 以外の任意のプロトコルで利用できるようにしたものである。但し、この拡張に必要な機能はオプション（搭載が必須ではない）であり、この機能を搭載した専用 OpenFlow スイッチが販売されていなかったことから、これ以降、専用 OpenFlow スイッチによる実験は断念している。
次に、文献[3]の方式を拡張し、複数の拠点が外部ネットワークと同時に通信したときでも対応できる方式を文献[4]で発表しており、同様に消費電力が削減できることを示している。しかし、この方式では、拠点間で通信ができないという課題があった。例えば、図 1 の H1 の拠点 (Site A) に組織内で共有するデータベースなどのサーバを接続し、他の拠点 (Site B) にある H2 がこのサーバと通信するなどの利用は考えられるが、この通信が中間帯域で利用するパイパスに影響を及ぼす可能性がある。
そこで、第 2 章で示した研究計画の範囲外であるが、文献[4]の方式を拡張し、拠点間で通信をしても対応できるようにした方式を文献[5]で発表している。但し、本方式の実装はまだ完了していない。そこで文献[5]では、文献[4]の通信実験で想定したトラフィックを送った場合の消費電力を見積もり、文献[5]の方式を用いなかった場合と比較して、消費電力が削減できる見通しがあることを示している。

参考文献

- [1] 西口雅人, 木村成伴, 省電力化のための MPTCP による SDN を用いたスイッチ間帯域切替方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 60, No. 2, pp. 591-607, 2019.
- [2] 木村亮介, 木村成伴, 省電力化のための MPTCP による SDN を用いたスイッチ間帯域切り替え方式の高速ネットワークでの検証, 信学技報, Vol. 119, No. 367, pp. 71-76, 2020.
- [3] Shingo Uchida and Shigetomo Kimura, Adaptive Link Rate Switching Based on Traffic Splitting Method for Power Saving, Proceedings of 2020 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), pp. 67-73, 2020. (Best Paper Award 受賞)
- [4] Zhang Chao and Shigetomo Kimura, ALR Switching and Routing Strategy for Multiple Sites Based on Traffic Splitting Method for Power Saving, Proceedings of 2022 Tenth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), pp.33-39, 2022.
- [5] 井田学, 木村成伴, 省電力化のためのトラフィック分割方式に基づくサイト間通信を考慮したスイッチ間帯域切り替え方式, 信学技報, Vol. 122, No. 407, pp. 163-168, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 井田学, 木村成伴	4. 巻 122
2. 論文標題 省電力化のためのトラフィック分割方式に基づくサイト間通信を考慮したスイッチ間帯域切り替え方式	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 163-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Chao, Kimura Shigetomo	4. 巻 1
2. 論文標題 ALR Switching and Routing Strategy for Multiple Sites Based on Traffic Splitting Method for Power Saving	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 Tenth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)	6. 最初と最後の頁 33-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW57323.2022.00063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Uchida Shingo, Kimura Shigetomo	4. 巻 1
2. 論文標題 Adaptive Link Rate Switching Based on Traffic Splitting Method for Power Saving	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW)	6. 最初と最後の頁 67-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CANDARW51189.2020.00025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 木村亮介, 木村成伴	4. 巻 119
2. 論文標題 省電力化のためのMPTCPIによるSDNを用いたスイッチ間帯域切り替え方式の高速ネットワークでの検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 77-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 内田真吾, 木村成伴	4. 巻 119
2. 論文標題 メータテーブルによるトラフィック分割方式を用いた省電力化のためのスイッチ間帯域切り替え方式の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 71-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Zhang Chao and Kimura Shigetomo
2. 発表標題 ALR Switching and Routing Strategy for Multiple Sites Based on Traffic Splitting Method for Power Saving
3. 学会等名 ASON'22 (15th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井田学, 木村成伴
2. 発表標題 省電力化のためのトラフィック分割方式に基づくサイト間通信を考慮したスイッチ間帯域切り替え方式
3. 学会等名 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会 (IN)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhang Chao and Kimura Shigetomo
2. 発表標題 ALR Switching and Routing Strategy for Multiple Sites Based on Traffic Splitting Method for Power Saving
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (NS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Uchida and Shigetomo Kimura
2. 発表標題 Adaptive Link Rate Switching Based on Traffic Splitting Method for Power Saving
3. 学会等名 ASON'20 (13th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村亮介, 木村成伴
2. 発表標題 省電力化のためのMPTCPによるSDNを用いたスイッチ間帯域切り替え方式の高速ネットワークでの検証
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田真吾, 木村成伴
2. 発表標題 メータテーブルによるトラフィック分割方式を用いた省電力化のためのスイッチ間帯域切り替え方式の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村亮介, 木村成伴
2. 発表標題 省電力化のためのMPTCPによるSDNを用いたスイッチ間帯域切り替え方式の実ネットワークでの検証
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

国際ワークショップ ASON'20 にて内田真吾氏が Best Paper Award を受賞
<https://www.cs.tsukuba.ac.jp/topic20.html>
<https://is-candar.org/candar20/awards>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木村 亮介 (Kimura Ryosuke)		
研究協力者	内田 真吾 (Uchida Shingo)		
研究協力者	張 超 (Zhang Chao)		
研究協力者	井田 学 (Ida Manabu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------