

ソフトウェア指向による高性能クラウドネットワーキングへの展望

Toward Software-Centric High-Performance Cloud Networking

川島 龍太
Ryota Kawashima

名古屋工業大学大学院 工学研究科
Graduate School of Enginnering, Nagoya Institute of Technology

1 まえがき

移動通信システムにおけるコアネットワークの5G化が進むなか、はやくも次世代の6G (Beyond 5G) ネットワークシステムの研究開発が始まっている。5G/6G通信では、多様な性能特性を持つネットワークサービスを迅速に構築・展開するため、ネットワークスライシング技術が重要な役割を持つ[1]。これらのサービスは同一の物理ネットワーク基盤上に展開されるが、共有の物理資源を柔軟に分割・管理するには、多種多様なネットワーク機能 (Network Function, NF) のソフトウェア化が欠かせない。実際、現在の通信事業者では一日あたり数千件ものネットワーク更新要求が発生しており、分単位あるいは秒単位での対応が求められるが、ハードウェア機器を中心とした従来のネットワークシステムではこの要求を満足できない。そのため、ネットワーク機能の「ソフトウェア化」および運用管理の「自動化」が必須であり、この実現に向けてクラウドネイティブな性質を持つネットワーク機能 (Cloud Native Network Function, CNF) が注目されている。

ネットワーク機能のソフトウェア化およびCNF化にあたり、マイクロサービスに代表されるアーキテクチャ体系とKubernetesなどの実装フレームワークを駆使して、CNFの開発およびライフサイクル管理を効率化する取り組みが増えている。一般的に、CNFは汎用サーバ上のコンテナアプリケーションとして実現するが、既存研究における評価結果が示すように、専用ハードウェア機器と比較して通信性能が顕著に低いという課題がある[2]。これは汎用サーバにおけるパケットI/O性能がフローあたり40 Mpps程度で頭打ちになる[3]のに加えて、vhost-userに代表される仮想ネットワークI/Oの処理オーバヘッドが顕著なためである。6Gでは最大でテラビット級の性能が必要とされるが、実用的なパケット処理を行うCNFの性能は、現状において（フローあたり）たかだか10 Gbps程度であり、Data Plane Development Kit (DPDK) やeXpress Data Path (XDP)などの高速化フレームワークを使用するだけでは不十分である。一方、プログラマブルASICやFPGAを用いて高速なデータ・プレーンを実現する例も増えているが、秒単位での構成変更や（独立に実装された）ネットワーク機能の多重化という点で課題がある。

そこで本稿では、汎用サーバをベースとしたクラウドネイティブなネットワーク機能を対象として、「既存の」ハードウェア機能を最大限に活用したソフトウェア中心の性能向上手法について検討する。

2 クラウドネットワーキング

現在のクラウドネットワークにおいては、スケール性や耐障害性および簡潔性を高いレベルで満足するために、2階層のLeaf-SpineスイッチからなるClosトポロジが広く採用されている。このようなネットワークにおいては、さまざまなネットワーク機能がエッジ部分に集約されており、サーバ仮想化技術との相性が良い。そのため、ネットワークスライシングの実現にも向いており、Software Defined Networking (SDN) 技術やトンネリング技術を活用してオーバーレイ型の仮想ネットワーク（スライス）を柔軟かつ迅速に構築・運用できる。

NFVノードはクラウドネイティブなネットワークを実現する際の要であり、理想的には汎用サーバおよびその上で動作するコンテナ形式のネットワーク機能の組み合わせである。このようなノード構成はCI/CD技術を活用した開発・運用管理に適しており、KubernetesなどによるCNFコンテナの大規模運用が可能である。

汎用サーバやコンテナを用いた柔軟性の高いシステムは、（専用ハードウェア機器と比較して）性能が顕著に低く、様々な高速化手法の導入が欠かせない。DPDKはパケットI/O処理に特化した代表的な高速化フレームワークであり、CPU（コアおよびキャッシュ機構）やメモリ資源を効率的に管理する。また、割り込み処理やパケットコピー処理、ロックなどの性能低下要因を排除しており、実装面における最適化も進んでいる。しかし、DPDKを導入するだけでは5G/6Gネットワークが求める性能要件を達成できず、システムアーキテクチャ、ソフトウェア-ハードウェア境界、および通信プロトコルを再考し、ソフトウェアによるパケット処理を前提とした体系に進化させる必要がある。

3 パケット処理の高速化における課題

一般に、パケット処理は「I/O処理」と「本処理」に大別されるが、本稿では、パケット処理性能の上限を決定する「I/O処理」に焦点をあてる。

NFVノードにおける通信性能の上限を引き上げるには、基本となるパケットI/O処理性能の向上が欠かせない。図1は、筆者によるパケットI/O処理性能の評価結果であり、評価環境は脚注¹のとおりである。図のグラフは、単純なパケット転送プログラム (Test-pmd) をベアメタル形式で実行した際のスループット（单一UDPフロー）を示しており、最大で約40 Mpps (64Bパッケッ

¹ Intel Core i9-7940X 3.1 GHz, Mellanox ConnectX-6 VPI (200 GbE)

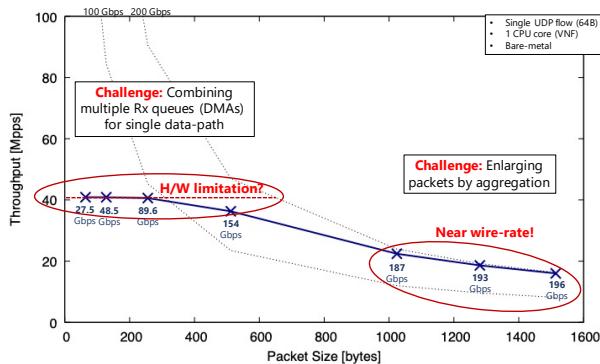


図 1 スループット vs. パケットサイズ (ペアメタル) であった。当該環境における最大理論性能はおよそ 300 Mpps であるため、この性能差は深刻である。

筆者らによるシステム解析の結果、ソフトウェア（デバイスドライバ）とハードウェア（NIC）間の通信を担う DMA (Direct Memory Access) が性能ボトルネックであると判明した [3]。具体的には、データパス（受信キュー）ごとの転送性能がネックであり、これは PCIe の帯域幅ではなく、NIC のチップ性能がその要因である。Receive Side Scaling (RSS) 機能を用いると理論値相当の「総スループット」を達成できる点をふまえると、データパス（受信キュー）ごとの DMA 転送を論理的に多重化する² 仕組みの実現によって、この性能上限（約 40 Mpps）を大幅に向上去ける。また、パケットサイズの増加に伴って実性能と理論性能との差が顕著に縮まる点に着目すると、複数の短パケットを集約する（単一の長パケットとして扱う）手法 [4] をエンド・エンド間にわたって展開する仕組みの実現が期待される。

4 ソフト・ハード動的協調機構

6G 通信の実現にあたって、ソフトウェア技術の向上のみではテラビット級の通信性能は達成困難である。そこで、プログラマブル ASIC などの高性能なハードウェアをクラウドネイティブな構組みの中で活用する仕組みが必要になる。筆者らは、仮想ネットワーク（スライス）が頻繁に展開・再構成されるような、極めて柔軟なネットワークスライシングを対象として、汎用サーバ上のコンテナアプリケーションとして動作するソフトウェア実装の CNF と、プログラマブル ASIC を搭載したホワイトボックス・スイッチによる動的協調アーキテクチャ（図 2）を検討してきた [5]。本アーキテクチャが満足すべき要件は下記のとおりであり、既存エコシステムとの親和性を重視している。

- ネットワーク更新への迅速な対応
- 多様なネットワーク機能の高速化
- スライスユーザによるセキュアなオフロード設定
- 後方互換性の確保
- ハードウェア資源の共有

本アーキテクチャでは、高性能なパケット処理エンジン (ASIC) と TCAM を搭載したホワイトボックス・ス

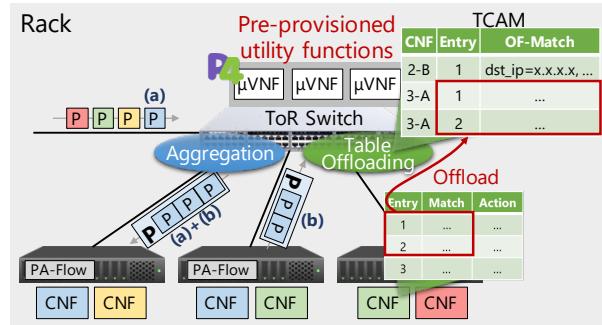


図 2 ソフト・ハード動的協調アーキテクチャ

イッチをトップ・オブ・ラック (ToR) スイッチとして展開し、汎用サーバベースの NFV ノード群における共有資源として扱う。スイッチにはパケット処理に関する様々なユーティリティ機能群 (μ VNF) が展開される。各 CNF における固有の処理（本処理）は CNF 自身が担当し、本処理の前後で行うユーティリティ処理（パケット集約やテーブル参照、ヘッダ更新など）はスイッチにオフロードする (Inbound/Outbound Offloading)。

5 むすび

本稿では、ソフトウェアを中心とした高性能なクラウドネットワークの実現に向けて、汎用サーバベースの NFV ノードにおけるパケット I/O 処理性能の課題と、プログラマブル ASIC を活用したクラウドネイティブなソフト・ハード動的協調アーキテクチャについて述べた。

Acknowledgment

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 182106107) の委託および JSPS 科研費 JP19K11940 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] I. Afolabi et al., "Network Slicing and Software-Defined Networking: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 20, issue 3, pp. 2429–2453, 2018.
- [2] R. Kawashima, "Software Physical/Virtual Rx Queue Mapping toward High-Performance Containerized Networking," IEEE Trans. Netw. Service Manag., vol. 18, no. 1, pp. 687–700, 2021.
- [3] M. Asada, et al., "Roadblocks of I/O Parallelization: Removing H/W Contentions by Static Role Assignment in VNFs," Proc. 9th IEEE CloudNet, Nov. 2020.
- [4] Y. Taguchi et al., "Fast Datapath Processing Based on Hop-by-Hop Packet Aggregation for Service Function Chaining," IEICE Trans. Inf. Syst., vol. E102-D, no. 11, pp. 2184–2194, 2019.
- [5] 福島 広紀 他, "高性能ネットワークスライシングを実現する CNF/WBS 動的協調アーキテクチャ," 信学技報 (NS2020-160), vol. 120, no. 413, pp. 220–225, 2021.

² 単一の受信キューに対して DMA 転送を並列に行う。