氏　　名	CAO LE THANH MAN（カオ レ タン マン）
博士の専攻分野の名称	博　士（情報科学）
学 位 記 番 号	第　２１３１４　号
学位授与年月日	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当 情報科学研究科情報ネットワーク学専攻
学 位 論 文 名	Inline network measurement: TCP built-in techniques for inferring end-to-end bandwidth （インラインネットワーク計測：TCP を用いたエンド間パスの帯域に関する研究）
論文審査委員	（主査） 教　授　村田　正幸 （副査） 教　授　村上　孝三　　教　授　今瀬　　眞　　教　授　東野　輝夫 教　授　中野　博隆

論 文 内 容 の 要 旨

End-to-end bandwidth is a metric that demonstrates how fast data is transmitted over a path connecting two separated end hosts of a network. The bandwidth information is particularly important in adaptive control and optimal resource provision of many emerging network technologies：content delivery networks, storage area networks, peer-to-peer networks, overlay networks, multicasting, and grid networks. End-to-end bandwidth is also deployed in network management such as bandwidth prediction, network topology design, enforcement of service level agreement, and detecting distributed intrusion/attacks or isolating fault locations. In addition, end-to-end bandwidth is important for developing adaptive control for network protocols such as routing, congestion/rate control and adaptive multimedia error concealment.

Because of the importance of bandwidth information, methodologies for monitoring bandwidth have attracted a great deal of attention. Network operators normally collect traffic information from routers to infer the bandwidth. For the majority of users, who do not have access authority to the inside of networks, monitoring bandwidth at the end hosts is the only alternative. Bandwidth measurement tools at the end hosts can be divided into two groups：active and passive. Passive measurement tools can collect traffic information at some end hosts for measurements without creating or modifying any traffic on the network, but this approach requires a relatively long time for data collection and bandwidth estimation. Active tools actively exchange probe traffic between two end hosts to perform the bandwidth measurement, and appear more accurate and sensitive to changes in bandwidth. However, their common weakness is causing an additional load on the network due to probe traffic.

This thesis presents a novel approach to end-to-end bandwidth measurement. We propose an active

measurement method that does not add probe traffic to the network : inline measurement, with the concept of plugging a measurement mechanism into an active Transmission Control Protocol (TCP) connection. TCP is currently the most popular transport protocol of the Internet. During data transmission, the TCP sender continuously sends data packets to the TCP receiver, which replies to the data packets with ACK (acknowledgement) packets. Using this mechanism, the proposed measurement approach periodically adjusts the transmission interval of some data packets, and we then examine the arrival-intervals of the corresponding ACK packets to infer the end-to-end bandwidth of the network path connecting TCP sender and TCP receiver. Thus, data transmitted in TCP connection is utilized for active measurement, rather than injecting probe traffic into the network.

We first introduce a new version of TCP, called Inline measurement TCP (ImTCP). ImTCP can transmit data as any other previous TCP version, and can also measure the unused bandwidth (called available bandwidth) of the path that the TCP connection is passing through. We introduce a measurement algorithm suitable for inline network measurement and that generates periodic measurement results at short intervals. The key idea in rapid measurement is to limit the bandwidth measurement range using statistical information from previous measurement results. When the ImTCP sender transmits data packets, it first stores a group of up to several packets in a queue and subsequently forwards them at the transmission rate determined by the measurement algorithm. Then, considering the arrival intervals of the ACK packets, the ImTCP sender performs the bandwidth calculation. The simulation experiments show that ImTCP can yield measurement results within 20% of the actual. We also present two examples in which ImTCP uses measured bandwidth information to optimize link utilization or improve the transmission performance of TCP itself.

We then consider inline measurement of the maximum bandwidth (called the physical bandwidth or capacity) of an end-to-end network path. We develop a new capacity measurement function and combine it with ImTCP in order to enable simultaneous measurement of both capacity and available bandwidth in ImTCP. The capacity measurement algorithm is a new packet-pair-based measurement technique that utilizes the estimated available bandwidth values for capacity calculation. This new algorithm promises faster measurement than current packet-pair-based measurement algorithms for various situations and works well for high-load networks, in which current algorithms do not work properly. Simulation results indicate that the capacity measurement algorithm can deliver results with small errors when the network load is as high as 93% of capacity. Moreover, the new algorithm provides a confidence interval for the measurement results.

We also perform measurement tasks for 1 Gbps or higher networks. In such high-speed networks, current bandwidth measurement algorithms that utilize packet transmission/arrival intervals are faced with two main problems. First, network measurement for large bandwidth requires short packet transmission intervals, which causes a heavy load on the CPU. Second, network interface cards for high-speed networks usually employ Interrupt Coalescence, which rearranges the inter-arrival times of packets and causes bursty transmission of packets. We introduce a new inline measurement method that overcomes these two problems. Measurement algorithms for both the available bandwidth and the capacity are proposed. Rather than adjusting packet transmission intervals, we adjust the number of packets involved in a packet burst and utilize the inter-intervals of the bursts of the corresponding ACK packets for bandwidth measurement. Simulation results show that the proposed method can measure bandwidth in the network path of at least 1 Gbps or faster. When measuring a 5-Gbps network path, 94% of the available bandwidth measurement results delivered by the proposed method have relative errors smaller than 20%. The measurement frequency is also approximately 60

times higher than that of an existing high speed network measurement tool. We also show an implementation result in a laboratory network environment to validate the proposed method.

The increasing demand for end-to-end bandwidth monitoring has led to extensive development and deployment of several measurement tools. TCP with built-in measurement technique is an effective way of overcoming the limitations of the two current measurement approaches. Moreover, by using the mechanism of TCP, inline measurement can work even better than stand-alone tools in some network scenarios, such as heavily loaded networks and high-speed networks. Until recently, TCP traffic has accounted for a large proportion of current Internet traffic. Therefore, we expect that we can monitor end-to-end bandwidth with the proposed approach at several locations, in real-time, with high accuracy, while having no effect on the network.

The future holds several challenging tasks. First, that is the improvement of TCP performance using the bandwidth information inferred by inline network measurements. Second, as streaming protocols, such as the Real Time Streaming Protocol, are emerging, inline measurement techniques for these protocols are also of interest.

論文審査の結果の要旨

ネットワークパスの帯域に関する情報は、インターネットにおける経路選択や輻輳制御を始め、数多くの領域において適応型制御を実現するために用いられる。既存の帯域計測手法は能動的または受動的計測技術に基づいている。能動的計測技術は高い計測精度を実現することができるが、ネットワークに余計な計測負荷を掛ける問題点がある。一方、計測用トラヒックを用いない受動的計測技術は、計測精度が低いという欠点がある。そこで、学位申請者は、データ転送とネットワーク計測を同時に行う、インラインネットワーク計測技術を提案している。提案技術により、従来の能動的計測および受動的計測技術の双方の欠点を克服し、かつ利点を活かしたネットワーク計測が可能となる。

最初に、学位申請者はデータ転送と同時に TCP コネクションが通過するネットワークパスの利用可能帯域を計測することができる ImTCP という新しい TCP のバージョンを提案している。ImTCP の送信側端末は、データパケットを送信する際にパケットの送信間隔を独自の計測アルゴリズムに基づいて設定し、それらのパケットに対応する ACK パケットが送信側に到着する間隔を観測することによって、利用可能帯域の推測を行う。シミュレーション結果により、ImTCP は TCP が従来持つデータ転送性能を低下させることなく、かつ外部トラヒックに対して影響を与えることなく、数 RTT に 1 回という高い頻度で相対誤差 20%以下の計測結果を導出することができることを明らかにしている。

次に、エンドホスト間のネットワークパスの物理帯域を、利用可能帯域と同時に計測する手法の提案を行っている。従来の物理帯域計測において用いられているパケットペア手法は、ネットワークに与える負荷が高く、パケットペア間にクロストラヒックが混入するような環境においては計測精度が著しく低下する。そこで学位申請者は、前項において提案した計測手法によって得られる利用可能帯域の情報を用いて、パケットペア間に混入するクロストラヒック量を推測するという新しい手法を提案している。シミュレーション結果により、本手法はクロストラヒックが帯域の 90%以上を占めるようなネットワーク負荷が高い環境においても正しい計測結果を導出できることを示している。

さらに学位申請者は、高速ネットワークにおける帯域計測手法を提案している。一般に、高速ネットワーク計測のためには非常に短いパケット間隔を必要とする。また、ネットワークインタフェースの割り込み調整機構（IC）がパケットの到着間隔を変化させ、トラヒックのバースト性を助長する。これらの理由により、従来の帯域計測手法は高速ネットワークにおける計測を行うことができない。学位申請者は上記の問題を解決した ICIM という新しいインライン計測手法を提案している。ICIM は IC によって発生する TCP パケットのバーストを利用し、パケットのバーストを大きなパケットと見なすという独自の発想により、広帯域ネットワーク環境においても帯域を計測することがで

きる。シミュレーションの結果により、ICIM が数ギガビットのネットワーク帯域を計測可能であり、既存の高速ネットワーク向けの計測手法に比べて、計測頻度が約 60 倍優れているという性質を明らかにしている。

以上のように、本論文はネットワーク計測の分野にインラインネットワーク計測という新たな概念を導入し、さまざまな環境における帯域計測技術を提案しており、その新規性、有効性はきわめて高いと考えられる。よって、博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。