

低軌道衛星通信における TCP 輻輳制御アルゴリズムの性能評価

牛丸 龍之介[†] 野林 大起^{††} 塚本 和也^{†††} 池永 全志^{††}

[†]九州工業大学工学部電気電子工学科 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

^{††}九州工業大学大学院 工学研究院 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

^{†††}九州工業大学大学院 情報工学研究院 情報・通信工学研究系 〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

E-mail: [†]ushimaru.ryunosuke832@mail.kyutech.jp, ^{††}{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp,

^{†††}tsukamoto@csn.kyutech.ac.jp

あらまし 米国 SpaceX 社が提供するサービスである, Starlink は, 地球の低軌道に通信衛星を配置する低軌道衛星通信であり, 広範囲に高速で安定したインターネットアクセスを提供している. 通信インフラが整備されていない遠隔地や地域においても利用可能であり, 農村部や開発途上国での利用が期待されている. しかし, このような低軌道衛星通信システムは, 地上のインターネットと比べて変動が大きい通信環境であることから, 固有の問題も抱えている. 従来のインターネットにおけるエンドツーエンド通信では, TCP により経路中の輻輳状態に応じて適切なレートでデータを送信する. しかし, 低軌道衛星通信システムにおいては低軌道衛星と基地局間の通信を要するため, 輻輳制御アルゴリズムによっては通信性能に影響を与える可能性がある. そこで本研究では, 低軌道衛星通信回線の一つである Starlink の Business と Residential の 2 つの回線を用いて, 異なる輻輳制御アルゴリズムを用いた場合における通信性能を評価する.

キーワード 低軌道衛星通信, TCP 性能評価, 輻輳制御アルゴリズム

Performance Evaluation for the Impact of TCP Congestion Control Algorithms in Low Earth Orbit Satellite Communication

Ryunosuke USHIMARU[†], Daiki NOBAYASHI^{††}, Kazuya TSUKAMOTO^{†††}, and Takeshi IKENAGA^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushushi, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{††} Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushushi, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{†††} Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology

480-4 Kawazu, Iizuka-shi, Fukuoka, 820-8502 Japan

E-mail: [†]ushimaru.ryunosuke832@mail.kyutech.jp, ^{††}{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp,

^{†††}tsukamoto@csn.kyutech.ac.jp

Abstract Starlink, which is provided by the American company SpaceX provides a satellite internet constellation using Low-Earth orbit (LEO) satellite. The Starlink can achieve high-speed and stable internet access over the world. However, such a LEO satellite communication system have various challenges due to large delay variation compared to traditional ground-based internet. In conventional end-to-end communication over the Internet, TCP adjusts the data transmission rate appropriately based on congestion states in the network. However, since LEO satellite communication systems require communication between the satellites and base stations, some congestion control algorithms may affect communication performance. Therefore, this study aims to evaluate the communication performance with different congestion control algorithms using the Starlink.

Key words Low Orbit Satellite Communication, TCP performance evaluation, Congestion control algorithm

1. はじめに

低軌道衛星通信を使用したインターネット技術の実用化が進んでいる。低軌道通信衛星を用いた通信サービスの一つに Starlink があげられる [1]。ユーザーは専用の受信機（衛星ディッシュ）を設置するだけで、世界中どこでもインターネットに接続することが可能になる。またこの受信機は比較的小型で、一般の家庭でも簡単に設置できる設計となっている。この設置の容易さにより、船舶や航空機に設置されるほか、教育、医療、経済活動の促進に貢献すると期待されている。さらに、従来の地上のインフラに依存しないため、未整備地域や災害後の復旧作業においても迅速に通信環境を確保できる点が大きなメリットとしてあげられる。このように、低軌道衛星通信は、高速かつ低遅延の通信を世界中どこでも提供可能である。Starlink における通信の特性として、15 秒間隔で周期的にスループットが低下する現象が確認されており [2]、従来のインターネットとは特徴が異なるため、TCP における輻輳制御アルゴリズムの有効性も従来とは異なる可能性がある。世界中の研究者が Starlink の性能評価を実施しているが、低軌道衛星と地上局間の特徴を考慮した上での輻輳制御アルゴリズムの性能についてはまだ十分に明らかになっていない。

そこで本研究では、低軌道衛星通信回線の特性を調査し、様々な輻輳制御アルゴリズムを用いた場合における通信性能を評価する。利用する輻輳制御アルゴリズムとして、2024 年時点で多くのオペレーティングシステムに採用されている CUBIC [3] [4]、Google によって開発され普及が始まっている BBR [5]、データ転送向け TCP である Data Center TCP (DCTCP) [6]、遅延ベースの Vegas [7]、そしてパケットロスと遅延を基にハイブリッド制御する YeAH [8] を採用する。本実験では、個人向け回線である Starlink Residential と、法人向け回線である Starlink Business を用いて各輻輳制御アルゴリズムの性能を評価する。

以下、2 節では低軌道通信衛星について、3 節では関連研究について、4 節では実験環境について述べ、5 節では実機実験に基づき結果をまとめ、性能評価をおこなう。最後に、6 節でまとめを述べる。

2. 低軌道衛星通信システム

低軌道通信衛星システム [9] は、地球の表面から約 550 km から 2000 km の低軌道に配置された衛星を利用し、全地球規模での通信サービスを提供する技術である。このシステムは、従来の高度、約 36000 km を周回する静止衛星が提供するサービスと比較して、多くの利点を有している。Starlink は、SpaceX 社によって開発された低軌道通信衛星ネットワークであり、5000 機以上の小型衛星を用いて地球全域に高速インターネット接続を提供することを目的としている。これらの衛星は、地球を低軌道で周回しており、複数の衛星が連携して地上のユーザーにサービスを提供する。Starlink の衛星は、相互にレーザーリンクを用いて通信を行い、地上のゲートウェイステーションを介してインターネットと接続される。この高度なネットワーク設計により、従来の衛星通信システムでは達成が困難だった、高帯

域幅と低遅延の通信が可能になっている。Starlink の最大の特徴は通信の遅延が非常に低いことである。通常、地球と静止衛星間の通信遅延は 500 ms から 1000 ms 以上に及ぶが、Starlink では 20 ms から 40 ms という低遅延を実現している。これは、衛星が地球に非常に近い低軌道にあるため、信号が往復する距離が短く、遅延が少なくなるためである。この低遅延は、オンラインゲームやビデオ会議といったリアルタイム性が求められるアプリケーションの使用体験を大きく向上させる。また、Starlink は 100 Mb/s から 300 Mb/s という高帯域幅を提供し、これにより高解像度のビデオストリーミングや大容量のデータダウンロードがスムーズに行える。Starlink には 2 つの回線が準備されており、Residential と Business がある。Business のアンテナ、ルーター、およびケーブルは、Residential よりも優れており、厳しい天候条件にも耐えられるように設計されている。

3. 関連研究

本節では、現在利用可能な低軌道通信衛星サービスである Starlink の通信品質評価に関する既存の研究について述べる。

3.1 Starlink の通信品質評価

Starlink の通信品質評価に関する研究は、これまで複数実施例が報告されている。例えば、接続の空間的・時間的特性に加え、地理的変動性を評価する研究 [10]、や、従来の通信衛星との比較を行う研究 [11]、エンドユーザの観点から Starlink のパフォーマンスを包括的に評価する研究 [12] などがある。また、ping を用いて、RTT を計測することにより、Starlink の平均遅延時間を求める研究などもある。Starlink のサービスは、25~100 Mb/s のダウンロード速度、5~10 Mb/s のアップロード速度 25~50 ms の遅延を提供する。しかしユーザーが実際に経験する平均ダウンロード速度は約 66 Mb/s、アップロード速度は約 8 Mb/s、遅延は約 62 ms である。このパフォーマンスは、Viasat や HughesNet などの他の衛星プロバイダーよりも優れているが、ケーブルや光ファイバのオプションと比較すると見劣りする。

3.2 Starlink 通信における周期性

文献 [13]、[14] では、スループットの標準偏差が著しく低くなる時の、スロットの幅（一定期間で区切られた区間）の最大値は 15 秒であるということから、UDP スループット変動は、15 秒周期を持つのではないかと考えられている。また UDP スループットの周期性は、15 秒ごとに Starlink の通信制御が働き、通信リンクの特性が変化していることが示唆されている。このことから、本研究では、計測周期を 15 秒とすることで、スループット変動の有無が測定に影響を及ぼさないように、調整することとする。

4. 評価手法

本節では、実験環境及び、計測方法について述べる。

4.1 実験環境

本実験では、Starlink の Business 回線と Residential 回線を使用して、通信品質評価を行う。構築した実験環境を図 1 に示す。また Starlink から研究室内までの接続構成に関しては、図 2 に



図 1: 評価環境の構成図



図 3: Starlink アンテナの設置環境 (手前 Business 用アンテナ, 奥 Residential 用アンテナ)

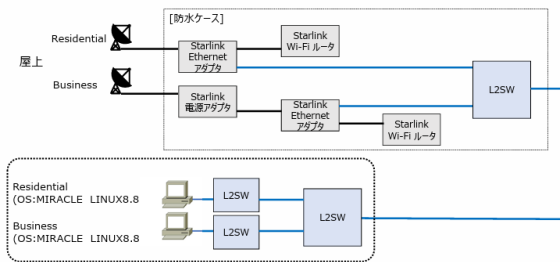


図 2: 接続構成図

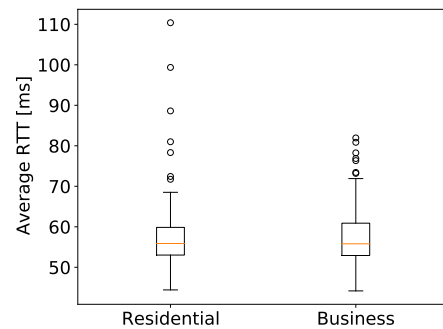


図 4: 平均遅延時間

示す。本研究では Starlink の Business と Residential, それぞれのアンテナを九州工業大学戸畑キャンパスの内の建物屋上に設置した。図 3 にアンテナの設置風景を示す。サーバは Intel Core i5, Business 回線のクライアントは Intel Core i7, Residential 回線のクライアントは Intel N100 の CPU を搭載し, メモリは全て 16.0 GB 以上のメモリを搭載した PC を使用した。サーバ, クライアント共に OS は Miracle Linux の version 8.6 を使用し, Linux カーネルのバージョンは 6.7.0 を使用した。Client はルータと有線接続し Starlink アンテナを経由し, 送受信する。また, サーバおよびクライアントの TSO (TCP Segmentation Offload), GSO (Generic Segmentation Offload), GRO (Generic receive offload) の設定は OFF にした。通信計測 PC は, 直接 UTP ケーブルで Starlink ルータと有線接続し, Starlink アンテナを経由してパケットを送受信する。

4.2 計測方法

実験では, iperf3 を用いてパケット送信を行い, tshark を用いてパケットごとの情報を, pcap ファイルでキャプチャする。先行研究により, Starlink 通信は 15 秒間隔でスループットが大きく変化するため, iperf3 を用いた計測は, 変動を考慮して行う。一つの輻輳制御アルゴリズムあたり, 15 秒間の計測を毎時行い, BBR, CUBIC, DCTCP, Vegas, YeAH の順に計測を行う。また, 競合を考慮するために, Business 回線のデータ測定を, 毎時 00 分より, Residential 回線のデータ測定を毎時 05 分より計測する。通信方向はアップリンク方向とダウンリンク方向の両方を行う。また遅延による影響を調べるため, 計測一分前に nping を用いて RTT の計測を行う。一秒に一回, 計 50

回の nping をクライアントからサーバーに送信し, RTT の平均値を算出する。本実験では 2024 年 2 月 1 日 0 時からから 2024 年 2 月 3 日 12 時までの, 計 61 回の計測を実施する。

初めに, 遅延時間を評価をする。次に, 異なる輻輳制御アルゴリズムによるスループット性能の比較, および箱ひげ図による比較, 最後に輻輳制御別再送率の比較を行い評価する。

5. 輻輳制御アルゴリズムの違いによる Starlink 通信の品質及び分析

本節では, 実機実験を用いた実験結果と考察について述べる。

5.1 遅延時間評価

図 4 に遅延時間の結果を示す。RTT の平均値は, Business 回線, Residential 回線ともに 50ms~60ms であることが確認できる。50 ms の遅延は, 多くの一般的なインターネットアプリケーション (ウェブブラウジング, メール, ソーシャルメディアなど) において, ユーザーにとって許容できるレベルの低遅延と言える。50 ms の遅延が主要な制約となるのは, 特に高度なリアルタイム要件を持つアプリケーションやシステム (高速トレーディング, リモート医療手術, 遠隔操縦など) の場合である。これらの用途では, より低い遅延が求められる。また図 4 より, Business 回線よりも, Residential 回線の方が RTT にばらつきがあることが確認できる。ここから法人向けの Business 回線の方が, 遅延時間という観点で性能が優れていることが考えられる。

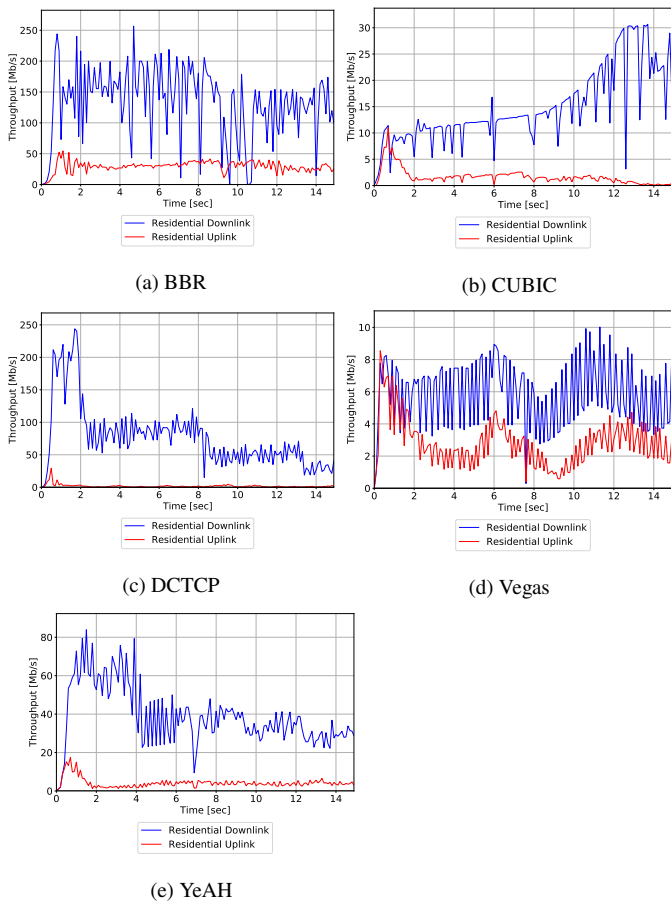


図 5: スループット性能 Residential

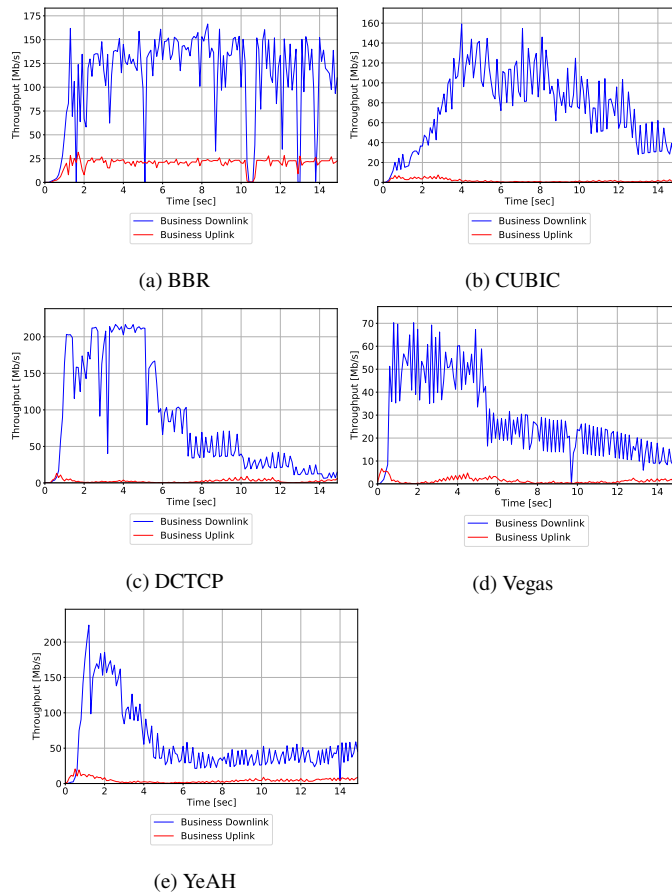


図 6: スループット性能 Business

5.2 スループット特性の時間変化

図 5 に Starlink Residential, 図 6 に Starlink Business における各輻輳制御アルゴリズムのスループットを示す。スループットは tshark でキャプチャしたデータから、0.1 秒ごとに算出した。ここから基本的に Residential 回線よりも、Business 回線の方が、スループットが高くなることが確認できる。BBR に関しては、計測開始時から計測終了時まで、比較的高い値を示していることが分かる。Vegas に関しては、最大スループット値でさえも 70 Mbps と、他の輻輳制御アルゴリズムの最大値と比較して、非常に低い値を示していることが分かる。DCTCP や YeAH においては、ダウンリンクの値だけをみると、最大スループット値は BBR の値を大きく上回っていることが確認できた。

5.3 平均スループット特性

図 7, 図 8 に各リンク別の平均スループット特性を示す。これらの計測結果は、15 秒間の測定の実平均値を求め、61 回分の計測を箱ひげ図にしたものである。これらの結果から輻輳制御アルゴリズム別のスループット値及び、分散を比較することが可能である。計測の結果、図 7b, 図 8b から、BBR を用いたときの Residential 回線, Business 回線のダウンリンクは 120 Mb/s である。これらは、一般的に Starlink に期待されるダウンロードの値である、100 Mb/s から 200 Mb/s を達成していることが確認できる。また輻輳制御アルゴリズム YeAH に関して、分散こそ高いものの、スループットの平均値は、BBR に次ぐ値を示していることが分かる。図 6e の性能を見ても分かるように、計

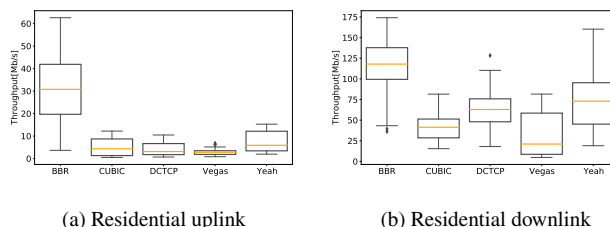


図 7: Residential 回線によるスループット

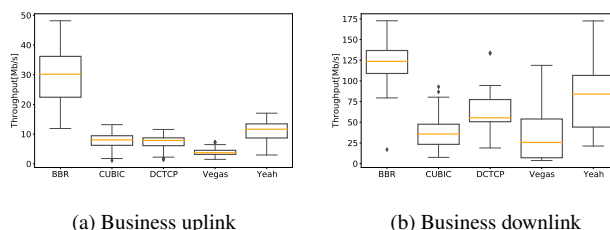


図 8: Business 回線によるスループット

測開始時に非常に高いスループットを得られることが分かる。Yeah アルゴリズムは、ネットワークの混雑状況をリアルタイムで監視し、それに応じて送信ウィンドウのサイズを動的に調整する。パケットロスや RTT の変動を使用して、ネットワークの混雑を予想するため、特に RTT の値が小さい Business 回線で、高い数値を出していることが分かる。

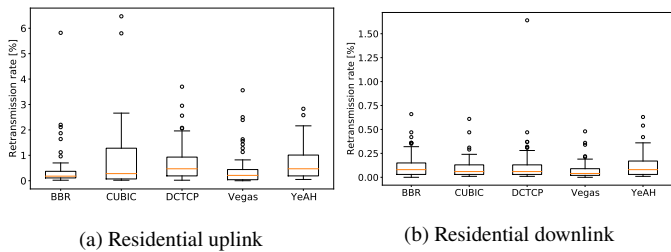


図 9: Residential 回線：輻輳制御別再送率

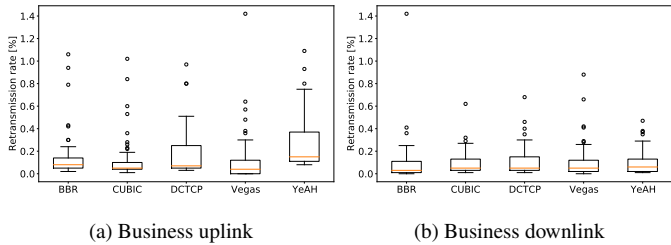


図 10: Business 回線：輻輳制御別再送率

5.4 輻輳制御別再送率

図 9, 図 10 に輻輳制御別の再送率を示す。これらの再送率は、tshark を使用してキャプチャしたパケット情報から、各計測ごとに「retransmission」のフラグが付いたパケットだけを抽出し、全体のパケット数に対する比率を算出したものである。計 61 回の計測結果を箱ひげ図として示した。結果から、Residential 回線、Business 回線ともにダウンリンクにおける再送率は非常に低いことが分かる。また分散に関しては輻輳制御アルゴリズムの違いによる変化が見られるものの、平均値に関して大きな差はないことが分かった。Residential のアップリンクの結果図 9a から分かるように、パケット再送率が高い場合、遅延やスループットに影響を及ぼすことが明らかになった。

6. まとめ

本研究では、インターネットのトランスポート層における輻輳制御の効率性を深く探究するために、BBR, CUBIC, DCTCP, Vegas, YeAH の 5 つの主要な TCP 輻輳制御アルゴリズムを対象とした実験を行った。特に、これらのアルゴリズムが低軌道衛星通信回線を使用する際のパフォーマンスにどのように影響するかを評価した。低軌道衛星通信は、その高速通信能力と低遅延特性により、遠隔地でのインターネットアクセスや災害時の通信復旧など、多くの応用が期待されている。このような背景の下、スループットと遅延時間という二つの主要なパフォーマンス指標に焦点を当て、各輻輳制御アルゴリズムの有効性を比較検討を行った。実験結果から、BBR アルゴリズムが特に低軌道衛星通信回線で使用した場合において、スループットの最大化及び遅延の最小化という点で優れた性能を発揮することが明らかになった。BBR は、ネットワークの帯域幅と往復時間を積極的に推定し、これらの推定値に基づいて送信速度を調整することで、輻輳を引き起こさずに可能な限り多くのデータを送信するよう設計されている。このアプローチは、特に衛

星リンクのような高遅延ネットワークにおいて、非常に効果的であるだけでなく、低軌道通信衛星回線のような遅延環境でも有効であることが明らかとなった。一方で、YeAH のようなハイブリッド型輻輳制御アルゴリズムも、特定の条件下では非常に良好なパフォーマンスを示した。YeAH は、ネットワークの状態に応じて動的に輻輳ウィンドウを調整することで、スループットを最大化しつつ、遅延を抑制する。これにより、不安定な衛星通信環境においても、信頼性の高いデータ転送が可能となる。これらの結果を踏まえ、今後は、長期的な計測を行い、様々な輻輳制御アルゴリズムの性能を詳細に分析する。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 21H03430, および JP23K18467 による成果を含む。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] “Starlink,” [Online], Available from: <https://www.starlink.com/>.
- [2] Rodrigo Blazquez-Garcia, Diego Cristallini, Martin Ummerhofer, Viktor Seidel, Jorg Heckenbach, Daniel O’ Hagan, “Experimental comparison of Starlink and OneWeb signals for passive radar,” 2023 IEEE Radar Conference, May 2023.
- [3] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, “CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant,” ACM SIGOPS oper. syst. rev., vol. 42, no. 5, pp. 64–74, July 2008.
- [4] Injong Rhee, and Lisong Xu “CUBIC: A New TCP-Friendly High-Speed TCP Variant.” In Proc. Workshop on Protocols for Fast Long Distance Networks, 2005,
- [5] Neal Cardwell, Yuchung Cheng, C Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, and Van Jacobson, “BBR: Congestion-Based Congestion Control: Measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time,” Queue, 14 (5) : 20-53, 2016,
- [6] Mohammad Alizadeh, Albert Greenberg, David A. Maltz †, Jitendra Padhye, Parveen Patel, Balaji Prabhakar, Sudipta Sengupta, Murari Sridharan ” Data Center TCP (DCTCP)” SIGCOMM ’10: Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference August 2010 pp. 63–74
- [7] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, “TCP Vegas: End to End Congestion Avoidance on a Global Internet,” IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol.13, No.8, pp.1465-1480, October 1995.
- [8] Andrea Baiocchi, Angelo P. Castellani and Francesco Vacirca “YeAH-TCP: Yet Another Highspeed TCP”
- [9] S. Ma, Y. C. Chou, H. Zhao, L. Chen, X. Ma, and J. Liu, “Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users,” arXiv preprint arXiv:2212. 13697.
- [10] Mohamed M. Kassem, Aravindh Raman, Diego Perino, Nishanth Sasstry, “A Browser-side View of Starlink Connectivity,” Proc. of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, pp.151-158, October 2022.
- [11] François Michel, Martino Trevisan, Danilo Giordano, and Olivier Bonaventure, “A first look at starlink performance,” In Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference 2022, pp.130–136.
- [12] Sami Ma, Yi Ching Chou, Haoyuan Zhao, Long Chen, Xiaoqiang Ma, Jiangchuan Liu, “Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users.” , IEEE INFOCOM 2023, pp. 1-12.
- [13] 鈴木彩音, 金井謙治, 中尾彰宏, “富士山におけるローカル 5G との接続に向けた低軌道衛星通信の通信品質評価”, 信学技報, vol. 123, no.148, IN2023-26, pp. 52-57, 2023 年 8 月.
- [14] 鈴木 彩音, 金井 謙治, 中尾 彰宏 「低軌道衛星コンステレーションにおける TCP 通信品質解析と評価」, 信学技報, NS-2023-66, 2023 年 9 月