

低軌道衛星通信を使用した端末間における 異なる輻輳制御アルゴリズムの性能評価

貝田 弘人[†] 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 電気電子工学研究系 〒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: †kaida.hiroto487@mail.kyutech.jp, ††{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp, †††tsukamoto@csn.kyutech.ac.jp

あらまし 低軌道衛星通信サービスは、高軌道衛星通信などに比べて大幅に高速かつ低遅延のデータ通信を提供し、設置の容易さから災害時の利用等が期待されている。特に災害等の非常時には、使用する経路が全て地上回線の場合、地上通信網が破壊され通信が出来なくなる可能性があるが、衛星通信は地上の基地局が破損しない限り影響がないため、異なる拠点間の端末同士が通信で利用できる可能性がある。低軌道衛星通信サービスの性能は一拠点内に設置されたアンテナに対するアップリンク及びダウンリンクの性能について評価されているが、送信者と受信者の双方が低軌道衛星通信サービスを用いた場合の評価は実施されていない。そこで本稿では、低軌道衛星通信サービスの一つである Starlink を用いて、エンドツーエンド端末が異なる拠点間で低軌道衛星通信を利用する環境を想定し性能評価を実施するとともに、利用する輻輳制御アルゴリズムが与える影響を調査する。

キーワード 低軌道衛星通信, Starlink, 端末間通信, 性能評価, 輻輳制御

Performance Evaluation of Terminal-to-Terminal Communication with Different Congestion Control Algorithm for Different Low Earth Orbit Satellite Communication Networks

Hiroto KAIDA[†], 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: †kaida.hiroto487@mail.kyutech.jp, ††{nova,ike}@ecs.kyutech.ac.jp, †††tsukamoto@csn.kyutech.ac.jp

Abstract A satellite internet constellation using Low-Earth orbit satellite (SIC-LEO) can provide high-speed and low-latency data communications than high orbit satellite communications and other services, so they are expected to be used in a variety of situations, including in the case of disasters. In particular, the destruction of ground-based infrastructure during disasters such as earthquakes makes it difficult to use the Internet throughout the region. On the other hand, SIC-LEO can provide Internet connectivity to users as long as power is provided. Therefore, SIC-LEO has the potential to provide connectivity between terminals between different locations. The performance of the Starlink, one of the SIC-LEO services, has been evaluated in terms of uplink and downlink performance for antennas installed in a single site, but the evaluation has not been clarified when both the sender and receiver use the Starlink. In this paper, we evaluate the performance of Starlink, a low earth orbit satellite communication service, assuming an environment in which end-to-end terminals use low earth orbit satellite communication between different locations, and investigate the impact of the congestion control algorithm used.

Key words Low Earth Orbit Satellite Communication, Starlink, terminal-to-terminal communication, performance evaluation, congestion control

1. はじめに

人工衛星は数十年にわたり通信分野で重要な役割を果たしており、その軌道の高さによって低軌道 (Low Earth Orbit, LEO) や静止軌道 (Geo-Stationary Orbit, GEO) に分類される。高度 36,000 km の軌道に位置する従来の静止軌道衛星は、1 機の衛星のみで広範囲をカバーできる利点があるが、地表からの距離が遠いため通信遅延が大きくなるという問題がある。一方、LEO を用いた通信システムは、その近接性により信号の伝送時間を短縮し、通信遅延を大幅に低減することが可能である。しかし、LEO は通信のカバー範囲が狭くなることから、多数の通信衛星の配備が必要となる。LEO を用いた通信サービスの例として、米国 SpaceX 社が提供する Starlink [1] が挙げられる。Starlink は、数千機の LEO 衛星を使用し、従来の衛星通信サービスと比べて高速かつ低遅延のデータ通信を実現している。日本でも 2023 年 7 月よりサービスが開始され、2024 年 1 月時点では、5200 機以上の衛星が運用されており、50 - 200 Mbps のダウンロード速度と 25 - 50 ms の遅延が報告されている [1]。

Starlink の設置は容易であり、災害時に特に重要な役割を果たす。設置に関しては、空が開けた場所であり、電源を確保できれば一人でもアンテナの持ち運びが可能のため、場合に応じた移動も可能である。災害時には、使用する経路が全て地上回線の場合、地上通信網が台風や地震などの災害で破壊され、通信ができなくなる可能性がある。しかし、衛星通信は地上の基地局が破損しない限り地上災害に影響がないため、途切れることなく通信を継続できる。また、通信インフラが整備されていない地域でも直接衛星を利用した通信が可能である。

Starlink の通信品質に関する研究は主に欧米での評価 [2][3] に基づいており、一拠点内に設置されたアンテナを使用したアップリンク及びダウンリンクの性能について評価 [4] されているが、送信者と受信者の双方が低軌道衛星通信サービスを用いた場合の評価は実施されていない。そこで、本稿では、低軌道衛星通信サービスの一つである Starlink を用いて、異なる拠点を想定した端末間通信の性能評価を国内において実施するとともに、利用する輻輳制御アルゴリズムが与える影響を調査する。

以下 2 節では、関連研究について述べ、3 節では、本研究の実験環境について述べる。4 節では、Starlink 端末間通信の性能評価および実験結果についての考察を述べる。最後に 5 節でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

低軌道衛星を用いた通信サービスは、他の軌道上に位置する衛星と比較して、低遅延と高スループットを提供可能であることが確認されている [2]。これにより、静止軌道衛星などでは困難であった遅延に敏感なサービスの利用が可能となった。しかし、ネットワークの利用率が低い場合であっても中程度のパケット損失が発生すると指摘されている [4]。一方で、静止軌道 (Geo-Stationary Orbit, GEO) 衛星ネットワークは、パフォーマンス向上プロキシ (Performance Enhancing Proxy, PEP) を適用可能な場合には高いスループットを達成する。しかし、PEP が

適用できない状況では、パス容量への収束が遅く、デフォルトのバッファサイズによって定常状態のスループットが制限されることがある。Starlink などの LEO 通信サービスは、高スループットと低遅延を実現しており、PEP に依存していない。しかしながら、Starlink を OpenVPN と CUBIC [5] と組み合わせた場合、性能は著しく低下することが報告されている [6]。

Starlink の性能評価は特に欧米地域で積極的に行なわれている。例えば、米国と英国を比較した研究では、米国における遅延が英国の 2.3 倍に達し、スループットが平均して 2.6 倍低いことが観測された。加えて、サンプルのうち 12% 以上で 5% のパケット損失が発生し、最大で 50% の損失が記録された例もある [2]。さらに、地上通信との比較では、遅延が高く、不安定性が指摘されており、インターネットの基地局から距離が遠い場所 (標高の高い山や海岸線など) では、通信品質が低下することが示されている [3]。また、有線ネットワークと比較して、LEO 衛星ネットワークでは TCP のパフォーマンスが低下する傾向にある。損失ベースの輻輳制御アルゴリズムでは、高い遅延を許容する代わりに最高のスループットを達成する。一方で、遅延ベースの方式は最短の遅延は実現できるが、スループットは低く不安定となる。BBR [7] は LEO 環境に適応可能であり、良好なスループットと遅延のバランスを提供する [8]。また、高性能無線ハードウェアを使用し、Starlink 信号を解析した研究によれば、周波数割り当てとビーム切り替えが約 15.5 秒間隔で行なわれ、衛星の高度が高い場合には高い平均受信電力が観測されることがわかっている [9]。しかし、日本における研究は限られており、地域や気候の違いによる通信性能の国内評価には課題が残る。

日本国内における Starlink の評価研究も行なわれており、iperf3 [10] を用いてスループットの計測を行い、その結果、15 秒ごとに周期的なスループットの低下が観測されている [11][12]。この現象は Starlink 独自の通信品質の周期的な変動特性を示しており、これにより通信の変動が始まるタイミングで往復時間が増大することが報告されている [13]。

以下のように、多くの研究者によって低軌道衛星通信性能の評価研究は活発に行なわれているが、現在の欧米および日本における性能評価は、単一拠点内に設置されたアンテナに対する Starlink のアップリンク及びダウンリンクの性能に焦点を当てている。しかし、災害支援や技術の進展を考慮すると、Starlink 端末間での直接通信によるネットワーク接続が期待される。このため、拠点間で Starlink を用いた通信が行なわれる可能性があり、端末間通信の性能評価が必要となる。本研究では、日本国内での Starlink 端末間通信の性能を評価することを目的とする。

3. 実験環境と評価項目

本節では、異なる拠点の端末がそれぞれ衛星通信回線を使用する場合における、端末間通信の性能を評価、分析する。

3.1 実験ネットワーク環境

本実験では、Starlink の Residential (個人向け) 回線と Business (法人向け) 回線を使用して、端末間の通信性能の評価および分析を行う。Business は専用の高性能アンテナを使用するため、通



図1 Starlink アンテナの学内屋上設置図

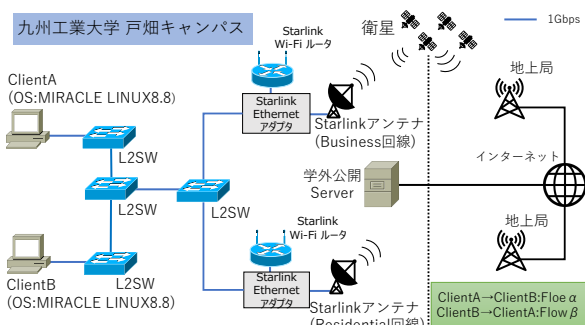


図2 評価環境の接続構成図

信速度が速く、通信帯域が個人向けプランの Residential よりも優先されるため、個人向けよりも高速かつ安定した通信が可能である。実験は九州工業大学戸畑キャンパスで実施し、Starlink アンテナを図1に示す様に、周囲に遮蔽物となる建物や設置物が無い学内屋上に設置した。次に、実験環境を図2に示すように、ClientA と ClientB は、Starlink Ethernet アダプタに有線接続され、Residential および Business の Starlink アンテナを通じてパケット送信を行う。送信されたパケットは、まず衛星を経由して地上局に送られ、インターネットを通じて学外公開サーバに届けられる。このサーバは、受け取ったパケットを同様の経路で別のクライアント PC に送り出す。

図2に示す様に、Business, Residential 回線におけるアンテナと各 Client は物理的に同一の回線を使用している箇所があるが、Virtual Local Area Network (VLAN) の設定により、レイヤ 2 レベルでの分離が行なわれており、これにより共有回線は2つの Starlink 通信を同時に扱えることが可能となっている。さらに、有線ネットワーク部分に関しては、全て 1000Base-T 規格を採用しており、1 Gb/s のデータ転送速度を実現していることから、2機の Starlink による通信を収容可能である。

通信方向に関して本実験では、ClientA (Business 回線) から ClientB (Residential 回線) への通信を Flow α 、逆方向の通信を Flow β と定義する。

3.2 端末間通信の接続構成

本実験で使用される2台の ClientPC は、Starlink Wi-Fi ルータによって設定されたプライベート IP アドレスが割り当てられているため、インターネットを介した直接通信ができない。そこで、Client 間の通信を実現するため、Virtual Private Network (VPN) を利用した。本研究では、オープンソースで提供されている VPN ソフトウェアの SoftEtherVPN [14] を用いて PC 間

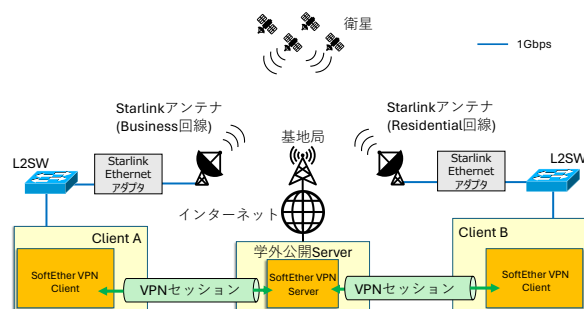


図3 VPN 環境の接続構成図

の VPN 接続を行う [15]。

VPN 環境の接続構成図を図3に示す。2台の ClientPC を、VPN クライアントとして設定し、学外公開サーバを VPN サーバとして利用する。VPN サーバは各ユーザに固有のユーザ名とパスワードを割り当て、これらの認証情報を用いてクライアントがサーバへ接続する。接続が確立されると、サーバはクライアントに IP アドレスを割り当て、これにより ClientPC 間で相互通信が可能となる。この設定により、同じ場所にある2台の ClientPC を異なる拠点間の通信として実現できる。

3.3 実験項目

本研究では、Starlink を利用した端末間通信の性能評価を行うにあたり、まず始めに学外公開サーバとの間で ClientA および ClientB のアップリンクとダウンリンクの性能を Residential 回線、Business 回線の両方で評価した。この実験では、iperf3 を使用してパケット送信を行い、受信側で tshark [16] を用いてパケットキャプチャを実施する。輻輳制御アルゴリズムとして、CUBIC TCP および TCP BBR を採用する。この評価は 2024 年 2 月 2 日に行い、2 時間に 1 回計測し、合計 12 回実施した。

次に、Starlink 端末間通信における輻輳制御アルゴリズムの最大セグメントサイズ (Maximum Segment Size, MSS) の影響を検証した。この評価は 2024 年 1 月 21 から 1 月 22 日までの 2 日間で行い、2 時間に 1 回計測を行い、合計 24 回実施された。また、Starlink 端末間通信の 1 日の遅延時間を評価するため、朝 (8 時から 11 時)、昼 (14 時から 17 時)、夜 (20 時から 23 時) の各時間帯で nping [17] を用いて 1 秒間隔で、RTT (Round-Trip Time) の計測を行った。この評価は、2024 年 2 月 3 日に実施したが、天候の変化が大きな雨の日であった。

その後、最適な MSS 値を用いて、TCP BBR と CUBIC TCP の通信スループットの評価を行った。この評価は 2024 年 1 月 23 日から 1 月 27 日までの 5 日間で行い、1 時間に 1 回計測し、合計 120 回の実験を実施した。

最後に、Starlink 端末間通信におけるリアルタイムアプリケーション (音声や動画通信など) のネットワーク性能を調査するために、UDP 通信のスループット性能を iperf3 で測定した。これは 2024 年 1 月 25 日から 1 月 26 日までの 2 日間で行い、1 時間に 1 回の合計 48 回実施した。

関連研究によれば、Starlink 通信は 15 秒ごとにスループットが段階的に変動することが知られているため [12][13]、iperf3 での測定周期は 15 秒間隔とし、この周期的な変動を考慮して測

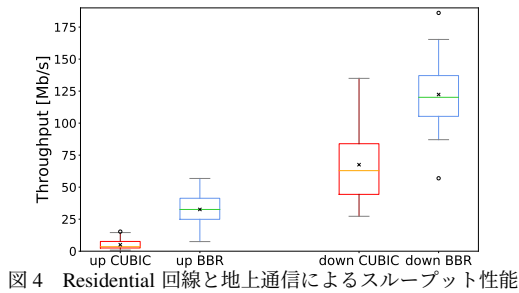


図4 Residential 回線と地上通信によるスループット性能

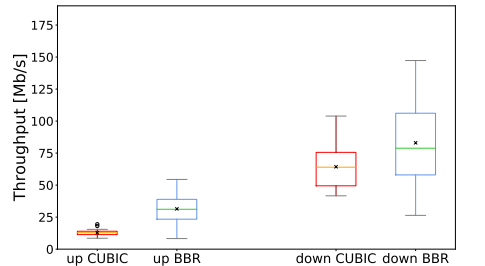


図5 Business 回線と地上通信によるスループット性能

定を行った。

4. Starlink 端末間通信の性能評価及び考察

本節では、実験の結果とその考察についてまとめる。

4.1 Starlink 端末とサーバ間の通信性能評価

Starlink 端末間通信の性能評価に先立ち、ClientA と学外公開サーバ間、および ClientB と学外公開サーバ間の通信スループット性能を測定する。結果を図4, 5に示す。図中の「up」とは Starlink 端末から学外公開サーバへの通信 (uplink) を、「down」はその逆方向の通信 (downlink) を指す。図4, 5より、Residential 回線では、CUBIC TCP のアップリンクは約 5 Mb/s なのに対して、TCP BBR は約 32 Mb/s で、約 6.4 倍の性能を示した。Business 回線では、CUBIC TCP のアップリンクは約 12 Mb/s なのに対して、TCP BBR は約 32 Mb/s で、約 2.6 倍の性能を示した。また、ダウンリンクでは、Residential 回線の CUBIC TCP は約 67 Mb/s であり、TCP BBR は約 122 Mb/s と約 1.8 倍であった。一方で、Business 回線の CUBIC TCP は約 64 Mb/s であり、TCP BBR は約 83 Mb/s と約 1.3 倍であった。Residential および Business 回線の両方でダウンリンクのスループットがアップリンクよりも高く、両回線ともに、TCP BBR が CUBIC TCP よりも高いスループットを示した。この理由として、輻輳制御アルゴリズムの動作原理の違いが考えられる。これに関しては4.3節と一緒にまとめて考察を行う。この結果を踏まえて、次の実験では Starlink 端末間通信を行い、スループットに生じる変化を検証する。

4.2 異なる MSS によるスループット性能評価

iperf3 を使用して、CUBIC TCP 及び TCP BBR の MSS を変更し、それぞれのスループットを算出した。Flow α (ClientA から ClientB への通信) の通信における CUBIC TCP と TCP BBR の結果を図6と図7に示す。さらに、Flow β (ClientB から ClientA

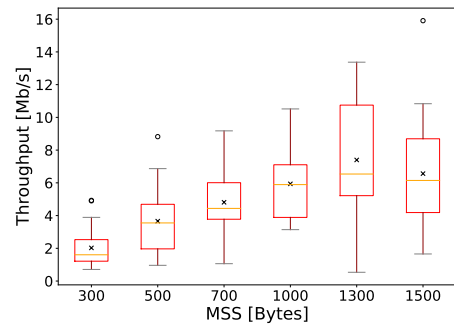


図6 Flow α , CUBIC TCP の MSS 別のスループット性能

への通信) の通信における CUBIC TCP 及び TCP BBR の結果を図8, 図9に示す。

図6-9より、通信方向に関わらず、両方の輻輳制御アルゴリズムにおいて、MSS が 1300 Byte の場合が最もスループット性能が高いことが分かる。MSS の値が大きくなるにつれてスループットは改善されるが、1500 Byte で性能が低下する傾向が見られる。しかし、Flow α の通信における BBR の結果にはこの傾向が当てはまらず、これはデータのサンプル数が少ないことや BBR のスループット変動が大きく、データ通信が不安定であることが示唆される。

イーサネットのフレームサイズが 1500 Byte であり、これには TCP/IP ヘッダも含まれる。TCP/IP ヘッダのサイズは通常どちらも 40 Byte であり、オプションを含めると 60 Byte となるため、残りのフレームサイズが TCP ペイロード (データ) に利用できる。MSS が小さい場合、1つのイーサネットフレームに詰め込めるデータ量は少なくなり、同じ量のデータを送信するためにより多くのパケットが必要になる。これは、各パケットに対するヘッダのオーバーヘッドが増加することを意味する。一方で、MSS が大きい場合はイーサネットフレームサイズを超え、フラグメンテーションが必要になり、追加のオーバーヘッドを生じさせる。

さらに、本実験の環境では、VPN 接続によってデータは暗号化され、追加のヘッダがペイロードに追加される。この追加のヘッダサイズは使用される暗号化方式や、トンネリングプロトコルおよび VPN 接続の特定の設定で変化する。また、SoftEther VPN プロトコルのヘッダの正確なサイズは公開されていない。IPsec ヘッダの場合、50 - 70 Byte、OpenVPN では 41 から 45 Byte である。SoftEtherVPN プロトコルは効率的な通信を目指して設計されているため、他のプロトコルと同様か、それより小さい程度のヘッダであると考えられる。そのため、MSS は環境に応じて 1300 Byte 前後に設定することがデータ転送を最も効率的に行うための適切な値であると結論づけられる。

続いて、Starlink 端末間通信の1日の遅延時間変動を評価した。遅延時間は朝 (8時から11時)、昼 (14時から17時)、夜 (20時から23時) の各時間帯に測定し、遅延時間変動を図10に示す。また、遅延時間の特性を図11に示す。

遅延時間の変動は少なく、全体として安定しており、各時間帯の Round-Trip Time (RTT) の平均値は 230 ミリ秒であること

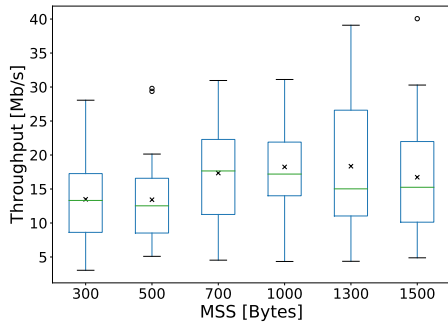


図7 Flow α , TCP BBR の MSS 別のスループット性能

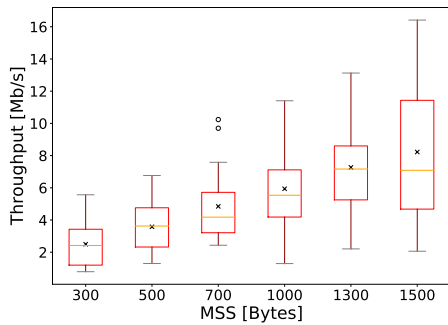


図8 Flow β , CUBIC TCP の MSS 別のスループット性能

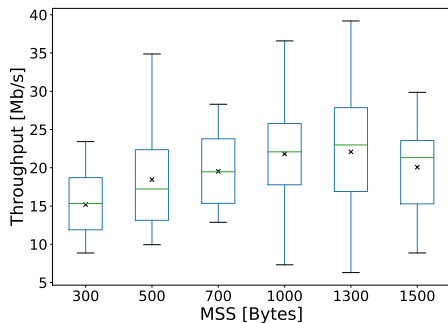


図9 Flow β , TCP BBR の MSS 別のスループット性能

が観察された。特に夜（20時から23時）の時間帯では、最小RTT値が2ms、最大が1000msとなった。これは、ユーザの活動によりネットワークの混雑や、天気（雨や雲）が通信に影響を与えた可能性が考えられる。また、パケットロス率についても時間帯による影響が確認され、朝の時間帯（8時から11時）では0.31%、昼の時間帯（14時から17時）では0.24%、夜の時間帯（20時から23時）では0.32%となった。

この結果から、Starlink 端末間通信は全体的に安定しており、信頼性が高いことが示されるが、小さな天候の変化が、遅延時間やパケットロスに影響を及ぼす可能性があることが明らかとなった。

4.3 CUBIC 及び BBR 輻輳制御によるスループット性能評価

先述した結果に基づき、MSS のサイズを 1300 Byte に設定し、TCP CUBIC および TCP BBR の両方でスループットの計測を行った。その結果は図 12 に示す。

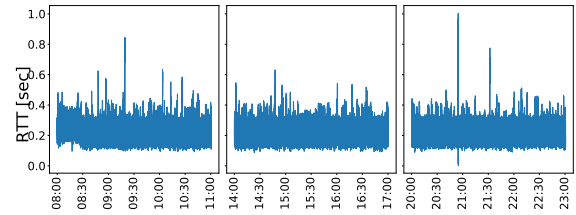


図10 Starlink 端末間通信の1日の遅延時間変動

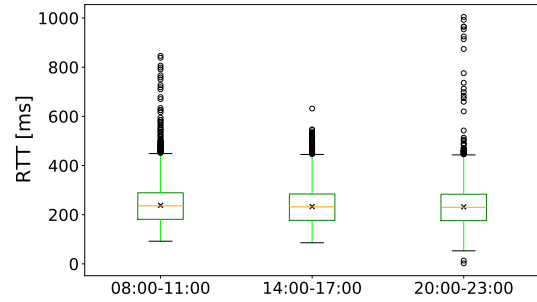


図11 Starlink 端末間通信の1日の遅延時間特性

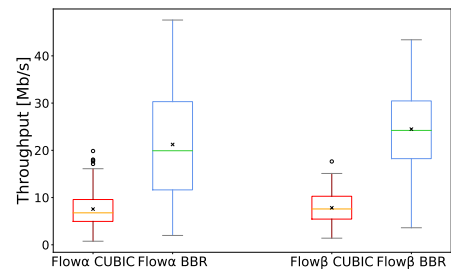


図12 Starlink 端末間通信のTCPスループット性能

図 12 より、Starlink 端末間通信において、TCP BBR は TCP CUBIC に比べて著しく高いスループット性能を提供することが明らかとなった。CUBIC は、広帯域幅・低遅延のネットワークにおいて性能がよくなるとされており、BBR はネットワークの帯域と RTT より、送信速度を調整する。今回のような動的なネットワークでは、BBR のほうが実際のネットワーク状況を正確に反映し、帯域幅の変動に迅速に対応できるため、CUBIC に比べて優れたパフォーマンスを発揮できる。また、通信方向に関しては、Flow β （ClientB から ClientA への通信）の方がわずかに性能が高いものの、両方向の性能差はそれほど大きくないことが示された。

また、先述した結果より、Starlink 端末間通信のスループット性能は、片方のみが Starlink 端末である場合の uplink スループットと同程度である。これは、両方の端末が Starlink を使用する場合、uplink がボトルネックになることを示唆する。したがって、Starlink 端末間で通信を行う場合、Starlink の主要な利点の一つであるダウンロード性能は享受できない可能性がある。

4.4 UDP 通信の性能評価

iperf3 を用いて、UDP 通信のスループット性能を評価した。UDP 通信の帯域幅を 10 Mbps, 20 Mbps に指定し、それぞれの

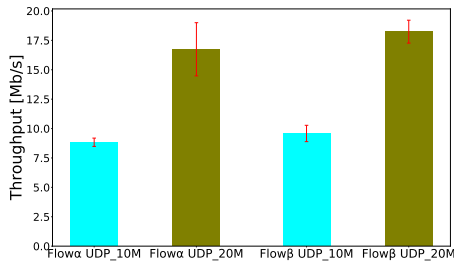


図 13 Starlink 端末間通信の UDP スループット性能

条件下でのスループットを算出した。結果を図 13 に示す。

図 13 より、指定された帯域幅にほぼ等しいスループット性能が得られたことが明らかとなった。この結果は、Starlink 端末間通信が設定された帯域幅に応じて効率的にデータを転送できることを示す。

さらに、一般的なアプリケーションが推奨する帯域幅を参考にして、Starlink 端末間通信の適合性を評価した。以下に、アプリケーションの推奨帯域幅の例を示す。

- メールやアプリ：1 Mbps
- Web サイトの閲覧：10Mbps
- Zoom：3.8 Mbps～3.0 Mbps（上り/下り）[18]
※グループビデオ通話で 1080p HD ビデオの場合
- Youtube(4K 視聴)：20 Mbps [19]

上記の推奨帯域幅と比較して、Starlink 端末間通信は Zoom の高解像度ビデオ通話や Youtube の 4K 視聴などのアプリケーションに対して十分な性能を提供することができると結論づけられる。これは、Starlink 端末間通信が現代のインターネット使用シナリオに適合する高いスループット性能を有することを示唆している。

5. ま と め

本稿では、Starlink の Residential 回線と Business 回線を使用し、CUBIC および BBR の二つの輻輳制御アルゴリズムを用いて Starlink 端末間の通信性能を評価した。スループット性能に関する評価では、Starlink 端末間の性能は主に Starlink の uplink の帯域幅の範囲内で観測され、BBR が CUBIC に比べて高いスループット性能を提供することが明らかとなった。また、本実験では、VPN 接続を活用して Starlink 端末間の通信を実現した。データ通信時に MSS を 1300 Byte 程度に設定することで、スループット性能が良くなる。また、遅延時間の変動に関しては、国際電気通信連合 (International Telecommunication Union, ITU) が定めた各通信業者のパケットロス率の上限は 0.1 であり、これに比べてパケットロス率は高く、平均遅延時間も長くなることが観測された。Starlink 端末間の通信に関して、一般的なアプリケーションの使用には問題ないものの、使用する帯域幅が大きくなると通信性能が不安定になる傾向がある。

今回の実験では、短期間での計測結果であることから、長期にわたる詳細な通信性能の評価が必要である。また、Starlink 回線を複数人で共有する場合の通信性能の変動に関する調査も今後の重要な課題となる。

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, <https://www.starlink.com/>.
- [2] Mohamed M. Kassem, Aravindh Raman, Diego Perino, Nishanth Sastry, “A Browser-side View of Starlink Connectivity,” Proc. of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, pp. 151–158, Oct. 2022.
- [3] 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, Aug. 2023.
- [4] Francois Michel, Martino Trevisan, Danilo Giordano, Olivier Bonaventure, “A First Look at Starlink Performance,” Proc. of the 22nd ACM Internet Measurement Conference, pp. 130–136, Oct. 2022.
- [5] Rasool Al-Saadi, Grenville Armitage, Jason But, Philip Branch, “A Survey of Delay-Based and Hybrid TCP Congestion Control Algorithms,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, pp. 3609–3638, Mar. 2019.
- [6] Jörg Deutschmann, Saeid Jahandar, Kai-Steffen Hielscher, Kai-Steffen Hielscher, “Internet via Satellite: GEO vs. LEO, OpenVPN vs. Wireguard, and CUBIC vs. BBR,” Proc. of the 1st ACM MobiCom Workshop on Satellite Networking and Computing, pp. 19–24, Oct. 2023.
- [7] Neal Cardwell, Yuchung Cheng, C. Stephen Gunn, Soheil Hassas Yeganeh, Van Jacobson, “BBR: Congestion-Based Congestion Control: Measuring bottleneck bandwidth and round-trip propagation time,” Queue, Volume 14, Issue 5, pp. 20–53, 2016.
- [8] George C.G. Barbosa, Sirapop Theeranantachai, Beichuan Zhang, Lixia Zhang, “A Comparative Evaluation of TCP Congestion Control Schemes over Low-Earth-Orbit (LEO) Satellite Networks,” Proc. of the 18th Asian Internet Engineering Conference, pp. 105–112, Dec. 2023.
- [9] Rodrigo Blazquez-Garcia, Diego Cristallini, Martin Ummenhofer, Viktor Seidel, Jorg Heckenbach, Daniel O’ Hagan, “Experimental comparison of Starlink and OneWeb signals for passive radar”, 2023 IEEE Radar Conference, May 2023.
- [10] “esnet/iperf: iperf3: A TCP, UDP, and SCTP network bandwidth measurement tool,” [Online], Available from: <https://github.com/esnet/iperf>.
- [11] Johan Garcia, Simon Sundberg, Giuseppe Caso, Anna Brunstrom, “Multi-Timescale Evaluation of Starlink Throughput,” Proc. of the 1st ACM Workshop on LEO Networking and Communication, pp. 31–36, Oct. 2023.
- [12] 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, NS2023-26, 2023 年 8 月.
- [13] 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, NS2023-66, 2023 年 9 月.
- [14] SoftEther VPN プロジェクト, [Online], Available from: <https://ja.softether.org/>.
- [15] 登大遊, 新城 靖, 佐藤 聡, 「SoftEther VPN Server: マルチプロトコル対応のクロスプラットフォームなオープンソース VPN サーバ」, JSSST, コンピュータソフトウェア, Vol 32, No 4, pp. 4–30, Nov. 2015.
- [16] Tshark, [Online], Available from: <https://tshark.dev/capture/>.
- [17] Nping, [Online], Available from: <https://nmap.org/nping/>.
- [18] Zoom, [Online], Available from: https://support.zoom.com/hc/ja/article?id=zm_kb&sysparm_article=KB0060761.
- [19] Youtube ヘルプ, [Online], Available from: <https://support.google.com/youtube/answer/78358?hl=ja>.