

衛星インターネットにおけるTCPコネクション多重化のための代理応答機構

幸田 守弘† 長谷川 剛‡ 村田 正幸‡

† 大阪大学大学院基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
TEL: 06-6850-6616, FAX: 06-6850-6589
E-mail: kouda@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ 大阪大学サイバーメディアセンター
〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-30
TEL: 06-6850-6616, FAX: 06-6850-6589
E-mail: {hasegawa, murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 静止軌道衛星を用いた衛星回線は伝搬遅延時間が非常に大きいため、衛星回線を經由したインターネットアクセスにおいてはTCPコネクションのスループットが大きく低下することが知られている。この問題に対して様々な解決方法が提案されているが、そのほとんどが衛星回線のみでの利用を前提とし、送受信ホストの改変を必要とする。そこで本稿では、送受信ホストの改変を必要としないでこの問題を解決するTCP代理応答機構を提案する。提案方式においては、TCPコネクションを地上回線部分と衛星回線部分に分割するコネクション分割手法、および衛星回線においてSCTP(Stream Control Transport Protocol)を用いて複数のTCPコネクションを多重化するコネクション多重化手法を用いて、衛星回線を用いたデータ転送スループットの低下を防止する。さらに、衛星回線上のSCTPコネクションにおいてTCP Vegasに基づく輻輳制御方式を行うことで、衛星回線容量の効率的な利用を図る。提案方式の有効性は、コンピュータ上のシミュレーションによって確認している。

キーワード 衛星インターネット、静止軌道衛星、TCP (Transmission Control Protocol)、SCTP (Stream Control Transport Protocol)、コネクション分割、コネクション多重化

Proxy Mechanism of Multiplexing TCP Connections over Satellite Internet

Morihiro Kouda† Go Hasegawa‡ Masayuki Murata‡

Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
TEL: +81-6-6850-6616, FAX: +81-6-6850-6589
E-mail: kouda@ics.es.osaka-u.ac.jp

Cybermedia Center, Osaka University
1-30, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan
TEL: +81-6-6850-6616, FAX: +81-6-6850-6589
E-mail: {hasegawa, murata}@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract

In this paper, we propose a novel architecture of a proxy mechanism for multiple TCP connections over the satellite Internet, which is provided by GEO (Geostationary Earth Orbit) satellites. The proposed architecture splits the TCP connection between the sender and receiver hosts into two terrestrial connections and one satellite connection. We then adopt SCTP (Stream Control Transmission Protocol) as a transport-layer protocol to multiplex TCP connections on the satellite link, to effectively use its capacity. We further propose a congestion control mechanism for the satellite SCTP connection, which is based on the congestion control mechanism of TCP Vegas. We evaluate the performance of the proposed mechanism through numerical results of simulation experiments, and confirm that the proposed mechanism can improve the utilization of the satellite link and the fairness among multiplexed TCP connections, when compared with the traditional mechanisms.

Keyword Satellite Internet, GEO (Geostationary Earth Orbit), TCP (Transmission Control Protocol), SCTP (Stream Control Transport Protocol), Connection Splitting, Connection Multiplexing

1 はじめに

近年のインターネットの爆発的な普及にともない、ネットワークトラフィックが増大しており、高速ネットワークに対する要求が大きくなりつつある。それに対し、アクセス回線においては ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や CATV インターネット等が、バックボーン回線では WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術等が導入され、ネットワーク帯域は飛躍的に向上している。しかし、これらの技術を用いたネットワーク回線は、ネットワーク接続を行う箇所へ物理的にケーブルを設置する必要があるため、地域によっては接続が困難な場合がある。そのような地域は都市圏よりも過疎地域に多く存在しており、その結果、提供されるサービスの地域間格差が拡大している。

この問題を解決する一つの方法として、衛星回線を用いたネットワーク接続が近年着目されている。例えば、NASA (National Space Development Agency) では i-Space と呼ばれる衛星利用実験が行われている [1]。この実験では、WINDS (Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite) と呼ばれる静止衛星を利用した高速ネットワークの構築を目的としている。この衛星回線を利用した高速インターネット環境では、ユーザが地上局を設置するだけでインターネット接続が可能になる衛星リソース動的割り当て技術が用いられており、現段階では、より高速化が望まれるインターネットの下り回線に衛星回線を用い、比較的転送情報量の少ない上り回線には既存の地上回線を用いている。

しかし、衛星回線を利用したインターネットアクセスにおいては、そのネットワーク形態が原因で発生するいくつかの問題を抱えている。まず、衛星通信に用いられる衛星回線は無線であるため、大気および電離層の状態、天候等の外的要因によるノイズの影響を受けやすく、データ転送中のビットエラー率が非常に高い。この問題に対しては、FEC (Forward Error Correction) や ARQ (Automatic Repeat reQuest) などのビットエラーを検出・訂正する手法が十分に研究されており、ビットエラーの発生を抑えることができる [2-4]。また、特に静止軌道衛星を用いて構築される衛星インターネット環境では、衛星回線において非常に大きい伝搬遅延が発生するという問題がある。そのため、衛星回線を介したインターネットアクセスにおいて Web アクセスなど代表的なアプリケーションが利用する TCP (Transmission Control Protocol) を用いてデータ転送を行うと、そのスループットが大きく低下することが知られている [5]。これは、衛星回線の大きな伝搬遅延時間が原因で TCP コネクションのウィンドウサイズの増加にかかる時間が大きくなるためである。この問題に対してもさまざまな改善方式が提案されている [6-8] が、衛星回線のみでの利用を前提としているものが多く、また送受信ホストの改変を必要とするため、実装の困難さや、未実装のホストとの間に発生する不公平性が問題となる。

そこで本稿では、上記の問題を解決するための TCP 代理応答機構を提案する。提案方式では、送受信ホスト間の TCP コネクションを 2 本の地上回線上的コネクション、

および 1 本の衛星回線上的コネクションに分割する。これにより、衛星回線上的コネクションの低いスループットが原因で地上回線上的コネクションのスループットが劣化するようなことは避けることができる。また、衛星回線上的コネクションのスループットを改善するために、衛星回線上的複数の TCP コネクションを SCTP (Stream Control Transport Protocol) [9] を用いて 1 本のコネクションに多重化する。これにより、すべての TCP コネクションからのパケットを SCTP コネクションの大きなウィンドウサイズを用いて転送することができるため、スループット劣化を防止することができる。本稿では、TCP コネクション多重化の手法について、SCTP パケットと TCP パケットのヘッダ書き換え・カプセル化方法を含めて詳細に検討している。

さらに本稿では、衛星回線上的 SCTP コネクションにおいて用いる輻輳制御方式の改善を行う。提案する輻輳制御方式は TCP Vegas [10] の輻輳制御方式にもとづくものである。これは、TCP Vegas の輻輳制御方式は利用可能な帯域遅延積の大きさが安定しており、ネットワーク輻輳が発生しないという衛星回線の特長によく適合するためである。また、地上回線上的 TCP コネクションと衛星回線上的 SCTP コネクションの利用可能なネットワーク帯域の違いを吸収するための、送信側地上局におけるパケットバッファリング方式についても議論を行う。

提案方式の性能評価はコンピュータ上のシミュレーション技法を用いて行い、既存方式に比べて衛星回線のスループットが向上し、多重化される TCP コネクションに対して高い公平性を提供できることを示す。

以下、2 章では衛星インターネットの構成とその問題点について説明し、3 章において衛星インターネットの問題点を解決する TCP 代理応答機構を提案する。4 章では、提案方式の性能評価をコンピュータ上のシミュレーションによって行い、その有効性を検証する。最後に 5 章でまとめと今後の課題を述べる。

2 研究の背景

2.1 衛星インターネットとその問題点

地球上空を周回し通信に用いられる衛星には、地上からの高度によって静止軌道 (GEO: Geostationary Earth Orbit) 衛星、中軌道 (MEO: Medium Earth Orbit) 衛星、および低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 衛星の 3 種類に分類される。静止軌道衛星は高度約 36000km に位置するため通信可能範囲が非常に広く、3 つの静止軌道衛星を用いることで地球全域での通信が可能になる。しかし、地上局と衛星間の伝搬遅延時間が約 250~300ms と非常に大きい。一方、低軌道衛星は高度約 500~2000km に位置するため、伝搬遅延時間は静止軌道衛星と比較して非常に小さい。また、低軌道衛星との通信に用いる地上局のアンテナや送信電力を小さくすることができる。しかし、静止軌道衛星に比べて通信可能範囲が非常に狭いため、地球全域での通信を可能にするためには、多くの衛星を用いる必要がある。また低軌道衛星は静止衛星ではなく、その周回周期は約 2 時間と短いため、通信中にハンドオフが頻繁に発生することが考えられる。したがって、低軌道衛星回線を用いて安定した通信サービスを行うため

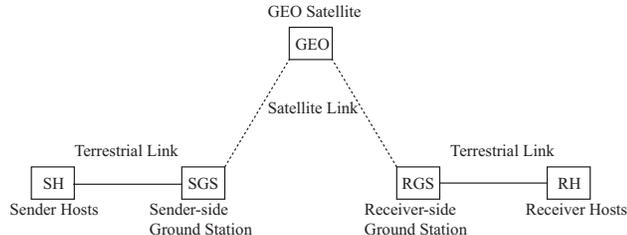


図 1: 衛星インターネット

には、複雑なネットワークを構築する必要がある。また、中軌道衛星は高度約 8000~20000km に位置し、低軌道衛星と静止軌道衛星の中間の特性を持つ。本稿では、現在利用が進められている静止軌道衛星を用いた衛星インターネット環境に着目する。

衛星インターネットは衛星回線を用いてユーザにインターネットアクセス環境を提供するものである。図 1 に本稿で対象とする衛星インターネットのモデルを示す。モデルはデータ転送の送信側となる送信側ホスト (Sender Host)、ユーザ側のホストである受信側ホスト (Receiver Host)、衛星回線と地上回線のゲートウェイとなる送信側/受信側地上局 (Sender/Receiver-side Ground Station)、および衛星回線を提供する静止軌道衛星 (GEO Satellite) から構成される。

衛星インターネット回線を用いて Web アクセスや FTP アクセス等のインターネットアクセスを行う場合、送受信ホスト間に TCP コネクションを設定してデータ転送を行うことが考えられる。前述したように静止軌道衛星を用いた衛星回線は伝搬遅延時間が非常に大きいため、TCP コネクションのラウンドトリップ時間 (RTT: Round Trip Time) が大きくなる。しかし TCP コネクションのスループットはラウンドトリップ時間が大きくなるにつれ大幅に低下することが知られている [5, 11, 12]。これは、TCP が転送の際に用いるウィンドウサイズの増加速度は、ラウンドトリップ時間に比例するため [13]、ラウンドトリップ時間が大きい場合にはウィンドウサイズの増加に長い時間がかかるためである。さらに、衛星回線の容量 (帯域遅延積) は非常に大きいため、衛星回線の帯域を使い切るために必要なウィンドウサイズが大きいことも問題点として挙げることができる。これらの問題は、Web ドキュメント転送のように、転送するデータサイズが小さい場合により顕著になる。

また、TCP コネクションのウィンドウサイズの最大値は通常 64 KByte 等の小さい値に設定されているため、大きな帯域遅延積を持つ衛星ネットワーク帯域を有効に利用できない。TCP コネクションのウィンドウサイズの最大値を大きくする方法として、[14] で規定されている Window Scale Option 機能を用いることが考えられるが、この機能は主に送受信ホストのソケットバッファサイズに対応することを目的としており、TCP コネクションが経由するネットワークの特性を考慮したものではないため、衛星ネットワークの帯域遅延積を有効に利用する手段としては十分でない。

前節で述べた、衛星回線のように大きな伝搬遅延時間を持つネットワークにおける TCP コネクションのスループット低下に対しては、いくつかの解決策がこれまでに提案されている [5, 7, 8, 15, 16]。[15] では、Path MTU Discovery 機能 [13] と Window Scale Option 機能を適用し、それらを組み合わせて利用することが提案されている。また、ウィンドウサイズに応じて受信バッファサイズを動的に変化させることで、前節で述べた Window Scale Option 機能の問題点を解決している。Path MTU Discovery 機能によって TCP のパケットサイズをできるだけ大きくすることにより、パケットヘッダの相対的なオーバーヘッドが小さくなるため、転送効率が向上すると考えられる。さらに、パケット単位で動作する TCP の輻輳制御方式の下でのデータ転送スループットが向上することが期待される。しかし、これらの手法は衛星回線のみで用いられることを前提としているため、本稿で対象としている、図 1 に示す衛星インターネットには直接適用できない。これは、本稿で対象としているネットワークは地上回線と衛星回線が混在しているため、地上回線の MTU (Maximum Transfer Unit) が小さいと、衛星回線の MTU を用いてデータ転送を行うことができないためである。また、接続されているネットワークが衛星回線か通常の地上回線かを送信側ホストで判断することはできないため、適用は困難であるといえる。

また、送受信ホスト間に設定される一本の TCP コネクションを複数本に分割することによって性能劣化を防止する方式が [7, 16] 等で提案されている。[7, 16] では、アクセス回線として無線回線が用いられる無線ネットワークにおいて、TCP コネクションを有線回線部分のコネクションと無線回線部分のコネクションに分割し、それぞれのコネクション上で回線品質に応じた適切な通信制御を行っている。しかし、衛星回線のように非常に大きな伝搬遅延時間を持つネットワークに適用することは考慮されていない。

また [8] では、TCP コネクションが保持している状態変数 (ウィンドウサイズ、ラウンドトリップ時間、再送タイムアウト時間等) を、衛星回線を利用する複数の TCP コネクションで共有する方式を提案している。これにより、複数の TCP コネクションが 1 つのウィンドウサイズを用いることができるため、ウィンドウサイズの増加に時間がかかる点や、コネクション設定直後の Slow Start Phase によるスループット低下を防止することができる。しかし、本稿で対象としているような地上回線と衛星回線の両方を利用する TCP コネクション間で状態変数を共有することは、地上回線におけるネットワーク環境が様々であることを考慮すると現実的ではない。

また、これらの提案方式は、そのほとんどが送受信ホストの変更を必要としている。しかし、ホストの変更を伴う方式を現在のインターネットにおいて適用することは非常に困難である。また、一部のホストに提案方式を適用すると、提案方式を適用していないホストとの不公平性が新たな問題となる。したがって本稿では、送受信ホストの変更を必要とせず、衛星回線での TCP スルー

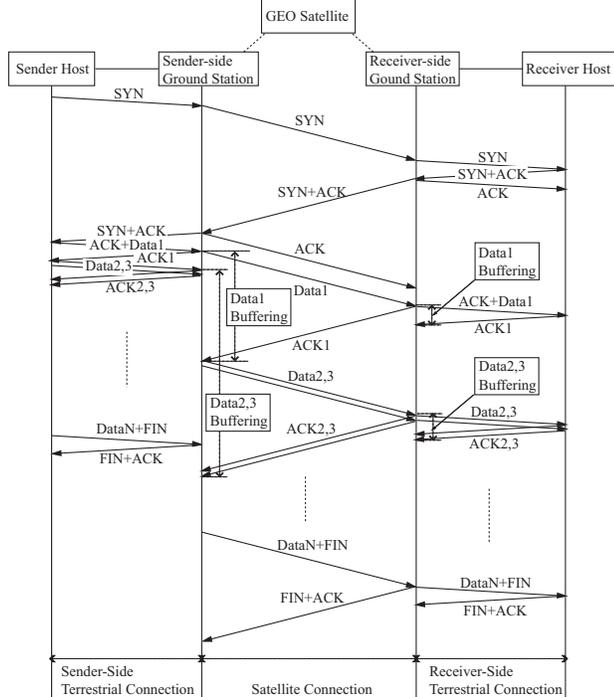


図 2: コネクション分割とタイミングチャート

プットの低下を防止する TCP 代理応答機構を提案する。

3 TCP 代理応答機構

本章では、衛星回線における TCP データ転送時のスループット低下を防止するための、TCP 代理応答機構を提案する。以降では、提案方式を構成するコネクション分割、コネクション多重化、TCP Vegas に基づく輻輳制御方式、および送信側地上局におけるパケットバッファリング機構について順に説明する。

3.1 コネクション分割

前章で指摘したように、衛星回線を介した TCP コネクションを用いてデータ転送を行うと、衛星回線の大きな伝搬遅延時間によって TCP コネクションのラウンドトリップ時間が非常に大きくなるためスループットが低下し、通常、速度の大きい地上回線にもその影響が及び、リンク帯域を有効に利用できない。これを回避するために、提案方式においては、図 2 に示すように、送受信ホスト間の TCP コネクションを、送信側ホストと送信側地上局の送信側地上コネクション (Sender-side Terrestrial Connection)、送受信側地上局間の衛星コネクション (Satellite Connection)、および受信側地上局と受信側ホスト間の受信側地上コネクション (Receiver-side Terrestrial Connection) の 3 つに分割する。

分割された 3 本のコネクションを用いたデータ転送の様子を図 2 に示す。送信側ホスト (Sender Host) から送信側地上コネクションを通じて送出されたパケットは、送信側地上局 (Sender-side Ground Station) に到着した際に衛星コネクションに受け渡される。その際に、送信側地上局は ACK パケットを生成して送信側ホストへ返送する。したがって、送信側ホストは衛星回線の大きな伝搬遅延時間の影響を受けることなく、ACK パケットを

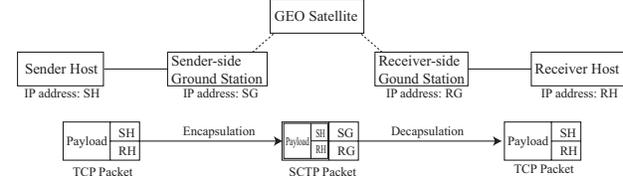


図 3: パケットのカプセル化

短時間で受信することができる。すなわち、分割された 3 本のコネクションはそれぞれの回線容量に応じた速度でデータ転送を行うことができるため、送信側/受信側地上コネクションが衛星回線の低いスループットや大きな伝搬遅延時間の影響を受けることを回避することができる。

この方式においては、データパケットが受信側ホストに到着する前に、送信側地上局が ACK パケットを送信側ホストへ返送するため、通常 TCP によって提供されるデータ通信の信頼性が損なわれることが考えられる。そこで提案方式においては、送信側地上局が受信したデータパケットの受信側地上局 (Receiver-side Ground Station) への送信が終了するまで、すなわち、受信側地上局から送信された ACK パケットを受信するまで保持することによりデータ転送の信頼性を確保する。同様に、受信側地上局は受信したデータパケットを受信側地上コネクションに受け渡すと同時に、送信側地上局へ ACK パケットを返送するため、受信側地上局は受信側ホスト (Receiver Host) へのデータパケットの送信に責任を持ち、受信側ホストから送信される ACK パケットを受信した後に保持しているデータパケットを破棄する。

また、提案方式においては、送受信ホストのプロトコルスタックには改変を加えず、衛星回線においてコネクション分割が行われていることを送受信ホストに気付かせない。そのため、送信側ホストから送信されたデータパケットの送信先アドレスは、コネクション分割を行う送信側/受信側地上局ではなく、通常通りの受信側ホストが設定されている。したがって、上記のコネクション分割を行うためには、送信側/受信側地上局においてパケットの送信先アドレスおよび送信元アドレスを書き換える必要がある。さらに、受信側ホストに送信するデータパケットの送信元アドレスは、送信側ホストである必要がある。そこで提案方式においては、図 3 に示すように、送信側ホストが送信したパケットを送信側地上局でカプセル化することによって、ヘッダ情報を保持したまま受信側地上局へ転送し、受信側地上局において元に戻し、受信側ホストへデータパケットを送信する。

3.2 コネクション多重化

上記のコネクション分割によって、地上回線上のコネクションのスループットが衛星回線上のコネクションのスループットに影響されることは回避することができるが、衛星回線上のコネクションのデータ転送スループットの低下は、衛星回線が持つ大きな伝搬遅延時間が原因であるため避けることができない。そこで提案方式においては、衛星回線上に存在する複数の TCP コネクションを、SCTP (Stream Control Transport Protocol) [9]を用いて一

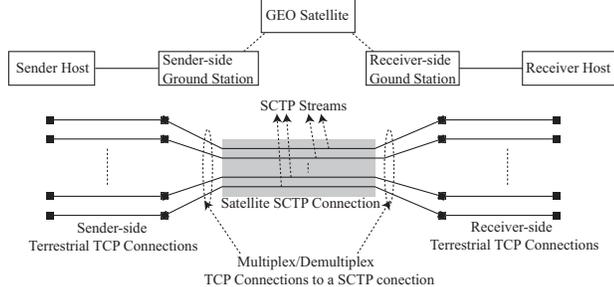


図 4: SFTP によるコネクション多重化

本のコネクションに多重化し、衛星回線上的データ転送を行うことで、データ転送速度の向上を図る。

TCP ではストリームをバイト単位での受け渡し順序と定義しているのに対して、SFTP はでストリームを上位層から渡されたデータ単位での受け渡し順序と定義し、1 つのセッションを用いて複数のストリーム (コネクション) を用いたデータ転送を可能にしている。そのため、SFTP は TCP コネクションの多重化に適していると考えられる。すなわち、図 4 に示すように、衛星回線において 1 本の SFTP コネクションを設定し、そこへ複数の送信側地上コネクションから到着するパケットをそれぞれストリームとして SFTP コネクションに収容することによって、TCP コネクションの多重化を行うことができる。

衛星回線において TCP コネクションを用いてデータ転送を行う場合、新たなデータ転送の度に TCP コネクションが設定されウィンドウサイズが小さくなるため、衛星回線の大きな帯域遅延積を使い切れず、スループットが低下することが考えられる。特に、転送するデータサイズが小さい場合にはその影響が大きくなる。しかし、SFTP によって TCP コネクションを多重化し、一本のコネクションによってデータ転送を行うことにより、多重化されたコネクションが 1 本の SFTP コネクションのウィンドウサイズを共有できるようになる。そのため、一旦 SFTP コネクションのウィンドウサイズが十分大きくなると、その後新たに開始されるデータ転送にともなうパケットも、その大きくなったウィンドウサイズを用いて転送できる。その結果、データ転送速度が向上すると考えられる。

3.3 TCP Vegas に基づく輻輳制御方式

SFTP は輻輳制御方式として、TCP Reno [13] に基づく輻輳制御方式を用いている [9]。これは、インターネットにおける主要なトランスポート層プロトコルである TCP との親和性を考慮しているためである。しかし、衛星回線において 1 本の SFTP コネクションを用いてデータ転送を行う場合、TCP Reno に基づく輻輳制御方式は、以下の原因により適切ではないと考えられる。

- 衛星回線上では基本的にポイント・ポイント間通信を行うため、提案方式においては 1 本の SFTP コネクションが回線を占有する。そのため回線上で輻輳が発生するというようなことはない。したがって、TCP Reno のようにネットワーク輻輳によるパケットロスの発生を前提とした輻輳制御方式は不適切である。

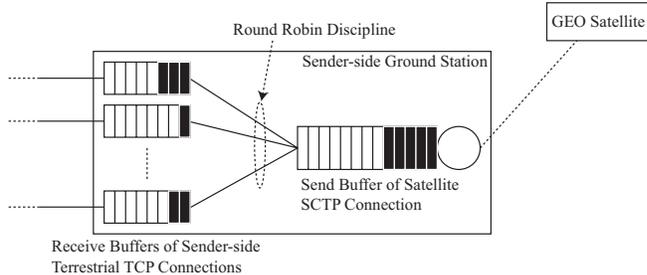


図 5: 送信側地上局におけるパケットバッファリング機構

ある。

- 衛星回線は帯域遅延積が比較的安定し、他のトラフィックによる影響もないため、TCP Reno のようにパケットロスが発生しない間はウィンドウサイズを大きくし続け、安定状態においてもパケットロスを回避できない輻輳制御方式は不適切である。

そこで提案方式においては、衛星回線上的 SFTP コネクションにおける輻輳制御方式として、TCP Vegas [10] に基づく輻輳制御方式を適用する。これは、TCP Vegas の輻輳制御方式は、ネットワーク内に 1 本の TCP コネクションのみが存在する場合には非常に高い性能を示すことが明らかになっているためである [17]。

TCP Vegas は、送信データパケットのラウンドトリップ時間を観測することによってネットワーク帯域を推測し、ウィンドウサイズを増減させることによってパケットロスを避ける。そのため、TCP Vegas の輻輳制御方式が理想的に動作すると、ウィンドウサイズが必要十分である値にほぼ一定に固定され、パケットロスが発生しない。これは、衛星回線のように帯域遅延積が比較的安定しており、輻輳が発生しないネットワークにおいては特に有効であると考えられる。輻輳回避フェーズにおける TCP Vegas の輻輳制御方式を以下に示す。

$$cwnd = \begin{cases} cwnd + 1, & \text{if } diff < \frac{\alpha}{base_rtt} \\ cwnd, & \text{if } \frac{\alpha}{base_rtt} < diff < \frac{\beta}{base_rtt} \\ cwnd - 1, & \text{if } \frac{\beta}{base_rtt} < diff \end{cases}$$

ただし、 $diff = \frac{cwnd}{base_rtt} - \frac{cwnd}{rtt}$

ここで $cwnd$ は送信側の輻輳ウィンドウサイズ、 rtt はラウンドトリップ時間、 $base_rtt$ は最小のラウンドトリップ時間、 α, β は定数である。

さらに提案方式においては、パースト的なパケット送信に対して発生する不必要なパケット廃棄 [18] を防止するために、[19] で提案されている、送信側端末においてパケット送信間隔を大きくする TCP Pacing 機能を用いている。

3.4 送信側地上局におけるパケットバッファリング機構

提案方式は送信側地上局において複数の TCP コネクションを 1 本の SFTP コネクションへ多重化する。その際、送信側地上局に到着するパケットを到着順に SFTP コネクションへ移動させると、地上回線上的 TCP コネクションの環境が異なる場合に、衛星回線における各コネクショ

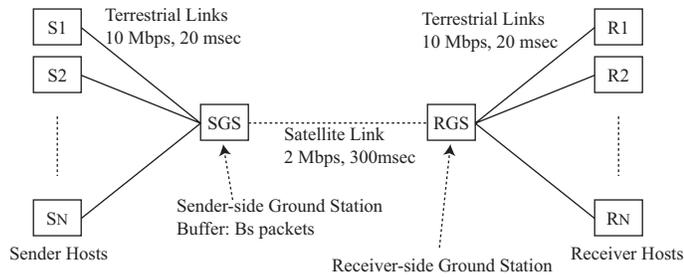


図 6: シミュレーションモデル

ンのスループットに不公平が発生することが考えられる。そこで、図 5 に示すようなラウンドロビン機構を用いて、地上回線上の TCP コネクションの受信バッファから公平にパケットを取得し、衛星回線上の SCTP コネクションの受信バッファへ移動させることで、コネクション間の公平性を向上させる。また、回線速度の差が原因で、SCTP コネクションの送信バッファが一杯になった場合には、ラウンドロビン機構によるパケットの取得を停止し、送信側地上 TCP コネクションの受信バッファにパケットを蓄積する。このことにより、送信側地上局から送信側ホストに送信される ACK パケットによって通知される告知ウィンドウサイズ(受信側バッファの空き容量)が小さくなるため、送信側ホストからのパケット転送速度を抑えることができる。

また、送信側地上 TCP コネクションの受信バッファが一杯になり、ACK パケットによって送信側端末に通知される告知ウィンドウサイズが 0 になった場合は、送信側ホストからのパケット転送が停止する。その後、受信バッファに空きができた際にも、送信側ホストはそれを知ることができないため、送信を再開することができない。しかし、TCP は、このような場合には、persist タイマを用いて定期的にヘッダのみのパケットを受信側 TCP に送信し、ACK パケットを受信することで受信バッファの空き容量を確認する機構を持つ [13]。タイマの初期値は通常 5 秒である。また、受信バッファに空きができた際に送信側地上局において ACK パケットを生成し、送信側ホストに向けて送信するによっても、受信バッファの状態を送信側ホストへ伝えることができる。この方式を用いると、送信側 TCP の persist タイマ機構の有無、および persist タイマの長さに依存しない送信制御を行うことができる。次章におけるシミュレーションにおいては、送信側ホストは送信側地上局の TCP コネクションの受信バッファの空き容量を常に知ることができると仮定している。

4 性能評価

本章では、コンピュータ上のシミュレーションによって提案方式である TCP 代理応答機構の性能評価を行った結果を示し、提案方式の有効性の検証を行う。シミュレーションにはネットワークシミュレータ ns [20] を用いた。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションに用いるネットワークモデルを図 6 に示す。ここでは、 N 台の送信側ホストと受信側ホストが

地上局を経由し、静止軌道衛星回線を用いて接続されており、送信側ホストから受信側ホストへ向けて FTP (File Transfer Protocol) を用いた無限長データの転送を行うことを想定している。送信側/受信側ホストと送信側/受信側地上局間のリンク帯域をそれぞれ 10 Mbps、伝搬遅延時間を 20 msec とする。衛星回線の帯域 BW_s は 2 Mbps あるいは 20 Mbps、伝搬遅延時間を 300 msec とする。転送パケットサイズを $??$ KBytes としているので、地上回線の帯域遅延積は約 25 packets (25 KBytes)、衛星回線の帯域遅延積は 2 Mbps の場合は約 140 packets (140 KBytes)、20 Mbps の場合は約 1400 packets (140 KBytes) となる。また、送信側地上局における衛星回線への出力バッファサイズを B_s packets とする。

シミュレーションにおいては、以下の 4 方式についての比較を行う。

tcp-single 方式 コネクション分割・多重化を行わず、送信側ホスト間に 1 本の TCP コネクションを設定し、データ転送を行う。

tcp-split 方式 コネクション分割を行い、分割された 3 本のコネクション全てにおいて TCP を用いてデータ転送を行う。コネクション多重化は行わない。

sctp-reno 方式 コネクション分割・多重化を行い、衛星回線上の SCTP コネクションにおいては従来の TCP Reno にもとづく輻輳制御方式を用いる。

sctp-vegas 方式 コネクション分割・多重化を行い、衛星回線上の SCTP コネクションにおいては 3.3 節で提案した TCP Vegas にもとづく輻輳制御方式を用いる。

コネクション分割・多重化を行わない場合 (tcp-single 方式)、送信側地上局は単純にパケット転送を行うルータとして動作し、送信側ホストから送出されたパケットは衛星回線への出力バッファに格納された後、衛星回線に送出される。一方、コネクション分割・多重化を行う場合 (sctp-reno および sctp-vegas 方式) においては、送信側地上局に到着したパケットは 3.4 節で示したパケットバッファリング方式に基づいて衛星回線上の SCTP コネクションの送信バッファに格納された後、衛星回線への出力バッファを介して衛星回線に送出される。tcp-split 方式における衛星回線上の TCP コネクション、および sctp-reno、sctp-vegas 方式における衛星回線上の SCTP コネクションの送信/受信バッファは十分大きいものとする。また、tcp-single 方式における受信側ホストの受信バッファ、およびコネクション分割方式における地上 TCP コネクションの受信バッファはすべて 64 KBytes としている。

4.2 シミュレーション結果と考察

図 7 は、衛星回線の帯域 BW_s を 2 Mbps とし、データ送受信を行うホスト数 N を 10 台とした時の、送信側地上局における衛星回線への出力バッファサイズ B_s と衛星回線のスループットの関係を示したグラフである。図から、tcp-single 方式は、出力バッファサイズが小さい場合に衛星回線のスループットが低下していることがわかる。これは、送信側地上局の出力バッファにおいてパケット廃棄が頻繁に発生し、ラウンドトリップ時間の

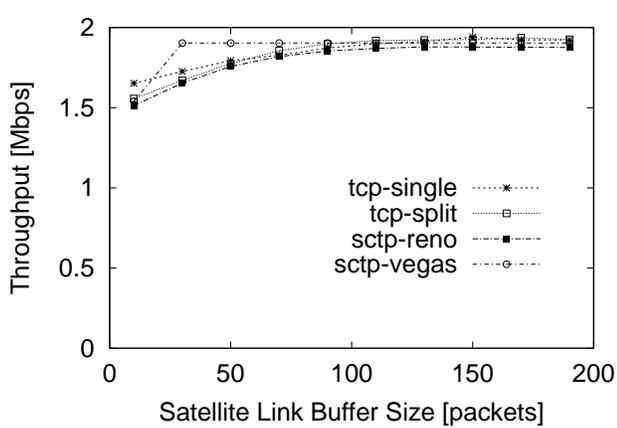


図 7: バッファサイズ B_s と衛星回線のスループットの関係

きな TCP コネクションのスループットが低下するためであると考えられる。また、tcp-split 方式においても出力バッファサイズが小さい場合にスループットが低下している。これは、tcp-split 方式はコネクション分割を行うため、地上回線上的 TCP コネクションのスループットは衛星回線に直接影響を受けないが、パケット廃棄が原因で衛星回線のスループットが大幅に低下するためである。

一方、コネクション分割・多重化を行う sctp-reno および sctp-vegas 方式は、出力バッファサイズが小さい場合に tcp-single、tcp-split 方式に比べて高いスループットを示している。これは、SCTP コネクションの大きなウィンドウサイズを用いて転送を行うことで、パケット廃棄によるスループット低下をある程度防止できるためである。さらに、バッファサイズが非常に小さい場合には、sctp-vegas 方式が sctp-reno 方式を上回るスループットを示している。これは、TCP Vegas にもとづく輻輳制御方式によって、パケット廃棄をほぼ 0 にすることができるためである。

次に、 $N = 10$ 、 $BW_s = 2$ Mbps、 $B_s = 100$ packets とした時の、4 方式の下で各ホストが得るスループットの時間的変化を図 8 に示す。図には、50 台のうち 10 台のホストに関するスループットをプロットしている。図 7 から、 $B_s = 100$ packets の場合は 4 方式とも衛星回線のスループットは高いことがわかる。しかし、図 8 より、tcp-single 方式 (図 8(a)) および tcp-split 方式 (図 8(b)) においては、各コネクションのスループットの時間的ばらつきが大きく、公平性を維持しているとはいえない。これは、これら 2 方式は TCP Reno にもとづく輻輳制御方式を用いており、安定状態においてもパケットロスが避けられず、パケットロスが発生したコネクションのスループットが低下することを回避できないためである。また、図 8(c) から、sctp-reno 方式を用いることで公平性はかなり改善できることがわかる。これは、sctp-reno 方式は 3.4 節において提案した、送信側地上局におけるラウンドロビンアルゴリズムにもとづくパケットバッファリング機構を用いているためである。さらに、sctp-vegas 方式 (図 8(d)) においては、衛星回線においてパケットロスがほとんど発生しないため、コネクション間の公平性

が非常に高いことがわかる。このことから、TCP Vegas にもとづく輻輳制御方式は衛星回線上的 SCTP コネクションにおいては非常に有効であるといえる。

5 おわりに

本稿では、衛星インターネットにおける TCP を用いたデータ転送効率を向上させるための、TCP 代理応答機構の提案を行った。提案方式はコネクション分割・多重化、TCP Vegas にもとづく輻輳制御方式、および送信側地上局におけるパケットバッファリング機構から構成され、地上回線と衛星回線を経由する衛星インターネットアクセス環境に適した制御を行い、地上回線上的コネクションのスループットが、衛星回線上的コネクションのスループットの影響を受けることを回避し、衛星回線のスループットを向上させる。さらに、送受信端末の改変を必要としないため、効率的な導入が可能であると考えられる。

本方式の有効性は、コンピュータ上のシミュレーションによって明らかにした。その結果、提案方式は、送受信端末間で 1 本の TCP コネクションを使う方式、コネクション分割のみを行う従来の方式と比較して、衛星回線のスループット、コネクション間の公平性の面で優れていることを示した。さらに、TCP Vegas にもとづく輻輳制御方式を用いることで、衛星回線の帯域遅延積の大きさ、最大ウィンドウサイズ等に依存せず、提案方式がさらに高い性能を示すことを明らかにした。

今後は、地上回線のリンク帯域や伝搬遅延時間等が異なる端末が存在した場合の公平性や、さらにコネクション数が増加した場合のスループット等の評価を行い、SCTP コネクションへの多重化の方式、輻輳制御機構、およびパケットバッファリング機構のさらなる改善を行う予定である。また、無限長のファイル転送時の平均スループットの評価だけでなく、Web ドキュメントの転送等を想定した有限サイズのデータ転送遅延時間についても評価を行いたい。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」(JSPS-RFTF97R16301)、および通信・放送機構「次世代広帯域ネットワーク利用技術の研究開発プロジェクト」によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] i-Space Application Experiments of National Space Development Agency (NASDA). available from http://www.nasda.go.jp/sat/ispace/index_e.html.
- [2] J. Bolot, S. F. Parisi, and D. Towsley, "Adaptive FEC-based error control for internal telephony," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, pp. 1453–1460, Mar. 1999.
- [3] L. Rizzo and L. Vicisano, "A reliable multicast data distribution protocol based on software FEC techniques," in *Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on the Architecture and Implementation of High Performance Communication Systems (HPCS '97)*, pp. 23–25, June 1997.

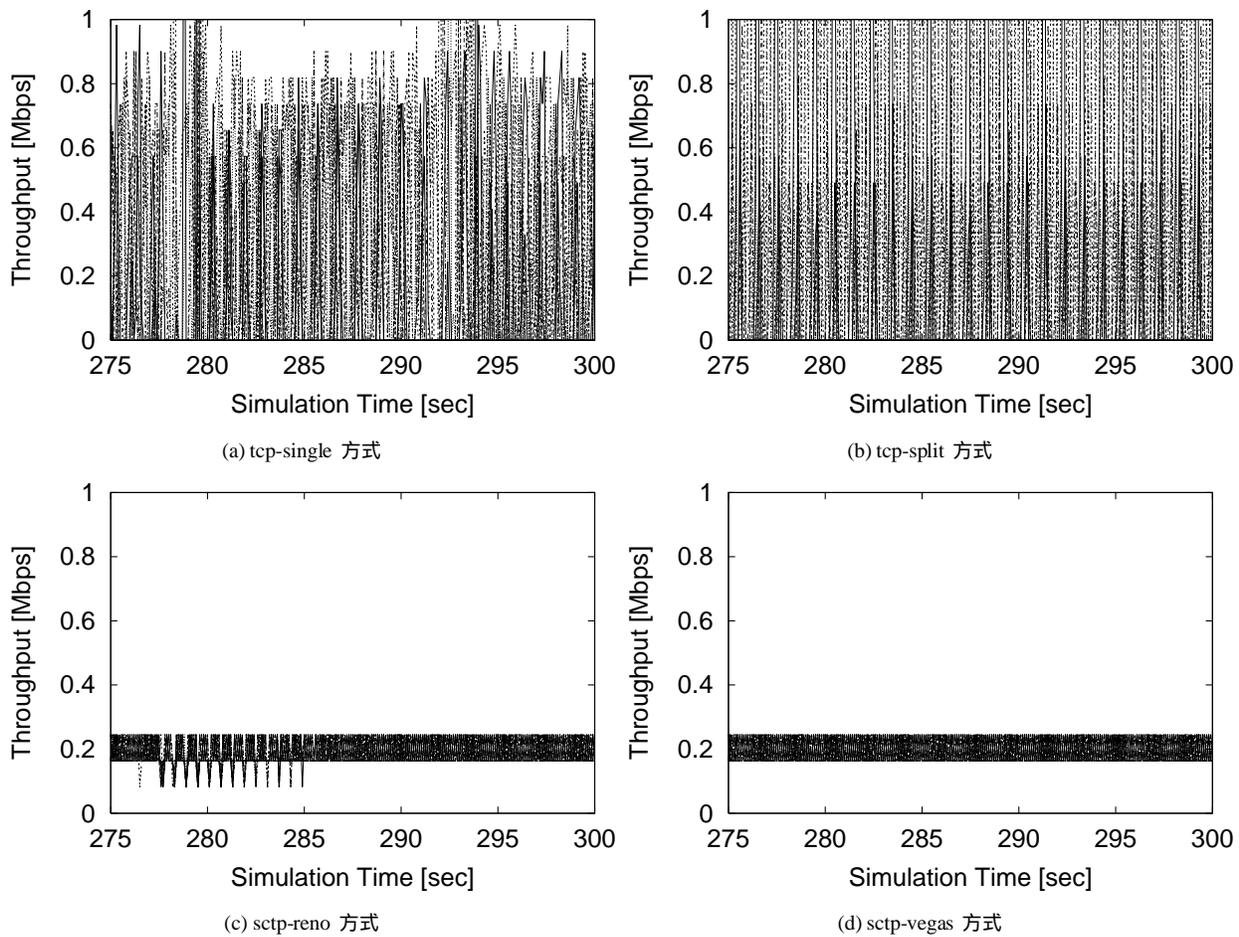


図 8: 各コネクションのスループット変化

- [4] M. H. Ammar and L. Wu, "Improving the throughput of point-to-multipoint ARQ protocols through destination set splitting," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '92*, May 1992.
- [5] M. Allman, C. Hayes, H. Kruse, and S. Ostermann, "TCP performance over satellite links," in *Proceedings of the 5th International Conference on Telecommunication Systems*, Mar. 1997.
- [6] H. Balakrishnan, V. Padmanabhan, S. Seshan, and R. Katz, "A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '96*, pp. 256–269, Aug. 1996.
- [7] A. V. Barkre and B. R. Badrinath, "I-TCP: Indirect TCP for mobile hosts," in *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 136–143, May 1995.
- [8] M. Allman, "Ongoing TCP research related to satellites," *Request for Comments 2760*, Feb. 2000.
- [9] R. Stewart, Q. Xie, K. Morneault, C. Sharp, H. Schwarzbauer, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang, and V. Paxson, "Stream control transmission protocol," *Request for Comments 2960*, Oct. 2000.
- [10] L. S. Brakmo, S. W.O'Malley, and L. L. Peterson, "TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '94*, pp. 24–35, Oct. 1994.
- [11] T. Henderson and R. Katz, "Transport protocols for internet-compatible satellite networks," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 17, pp. 326–344, Feb. 1999.
- [12] L. Wood, G. Pavlou, and B. Evans, "Effects on TCP of routing strategies in satellite constellations," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 172–181, Mar. 2001.
- [13] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1994.
- [14] V. Jacobson, R. Braden, and D. Borman, "TCP extensions for high performance," *Request for Comments 1323*, May 1992.
- [15] M. Allman, D. Glover, and L. Sanchez, "Enhancing TCP over satellite channels using standard mechanisms," *Request for Comments 2488*, Jan. 1999.
- [16] Z. Haas and P. Agrawal, "Mobile-TCP: An asymmetric transport protocol design for mobile systems," in *Proceedings of IEEE ICC '97*, June 1997.
- [17] G. Hasegawa, M. Murata, and H. Miyahara, "Fairness and stability of the congestion control mechanism of TCP," in *Proceedings of IEEE INFOCOM '99*, pp. 1329–1336, Mar. 1999.
- [18] J. C. Hoe, "Improving the start-up behavior of a congestion control scheme of TCP," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 26, pp. 270–280, Oct. 1996.
- [19] A. Aggarwal, S. Savage, and T. Anderson, "Understanding the performance of TCP pacing," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, March 2000.
- [20] "Network simulator - ns (version 2)." available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.