

PEP を用いる衛星 IP ネットワークにおけるバースト的な トラヒックの特性とその緩和方式

鹿間 敏弘*

Bursty Traffic by a PEP in an IP Network Using a Satellite Link and Its Mitigation Scheme

Toshihiro Shikama

This paper investigates a TCP proxy, called a PEP, which splits a TCP connection to employ a specially tailored TCP connection over a satellite link. This paper describes how large size data is forwarded inside the PEP when a packet loss occurs on the satellite link. It also identifies a problem that the output traffic from the PEP becomes bursty due to the large size forward data. To mitigate bursts of packets by the PEP this paper proposes a scheme that the PEP performs a shaping function which places a gap between two consecutive segments sent by the PEP. Simulation results using ns-2 show that bursty packets are issued by the conventional PEP and the shaping function suppresses them effectively.

Keywords: PEP, satellite communication, TCP proxies, TCP spoofing, bursty traffic, traffic shaping

1. まえがき

衛星通信を利用するネットワークは、光ファイバによる通信インフラ整備が十分ではない開発途上国において重要な通信手段となっている。また、我が国のように光ファイバや移動通信ネットワークインフラが十分発展した国々においても、東日本大震災のような大規模災害時における非常通信手段として衛星通信への期待は大きい。光ファイバによる地上ネットワークの高速・広帯域化に伴い、衛星通信においても広帯域化への期待が高まっており、通信衛星の広帯域化に向けた研究開発が推進されている[1]。

現在、NGN に代表されるようにネットワークの IP 化が急速に進んでおり、流れるトラヒックの大部分は IP パケットによる通信で占められている。また、このような IP パケットによるデータ通信ではトランスポートプロトコルとして TCP が広く用いられている。衛星通信を利用すると、通常の TCP をそのまま使って通信すると十分な性能が得られない課題がある[2]。静止衛星を経由して電波が通信先に届くのに大きな遅延時間が存在し、TCP がデータを送信してそれに対応する確認応答を受信するまでに約 0.5 秒を要する。通信衛星の帯域を十分活用するためには、この 0.5 秒間に確認応答を受けずにデータの先送りを継続して行う必要がある。このように、確認応答を受けずに送信できるデータ量をウィンドウサイズと呼ぶ。通常のパソコンなどの最大ウィンドウ

* 電気電子情報工学科

サイズは 64 KB～256 KB 程度で、衛星通信の帯域が数十 Mb/s 以上の広帯域になると、衛星の通信帯域を有効に活用できなくなる。解決方法として端末の TCP を衛星通信に最適化されたものに変更することが考えられるが、ユーザが使用するパソコンなどの端末のソフトウェアを変更しなければならない。変更しない方法として、パソコンからの TCP をネットワーク内で終端し、衛星回線では別の TCP を用いる TCP プロキシが一般に用いられおり [3]、通信衛星自体が TCP プロキシの機能を持つ方式も検討されている [4]。また、衛星通信に限らず携帯電話で用いられる WCDMA 方式のネットワークにおいても TCP プロキシは有効であることが報告されている [5]。本論文では、このような TCP プロキシを PEP (Performance Enhancing Proxy) と呼ぶ。PEP を用いると、端末の TCP はデータを送信すると PEP から直ちに確認応答が返ってくるので、小さなウィンドウサイズで十分なスループットを達成でき、また衛星回線を使用する PEP 間の通信では衛星通信用に最適化された大きなウィンドウサイズを有する TCP を用いることができる。PEP を用いることにより、パソコンなど既存端末の TCP を変更することなく衛星通信を利用して高速通信が可能となる。

以下、本論文では 2 章で PEP によるバースト的なトラヒックの問題について説明する。3 章で PEP についての関連研究について述べ、4 章でバースト性を軽減する方式を提案する。5 章では ns-2 によるネットワークシミュレーションモデルについて説明し、6 章にシミュレーション結果と考察を述べる。最後に 7 章で本論文をまとめる。

2. PEP によるバースト的なトラヒックの問題

PEP を用いる方式では、衛星回線で伝送誤りが発生した場合、バースト的なトラヒックが発生する問題がある。PEP を用いた方式における誤り回復シーケンスの例を図 1 に示す。送信端末と受信端末は地上回線を介して PEP に接続され、それぞれの端末からの TCP コネクションは PEP で終端される。PEP 間では衛星通信に適した TCP コネクションを用い、PEP は地上回線の TCP コネクションと衛星回線の TCP コネクションの間で中継を行う。この中継において、PEP は一方の TCP コネクションで受信したセグメントを元のデータに戻した後、他方の TCP コネクションでこのデータの送信を行う。衛星回線で伝送誤りによりパケットの喪失が発生すると、TCP の再送による誤り回復を行なわれる。ここで PEP の TCP 受信処理では、喪失したセグメント以降のセグメントを受信するとデータの再組み立て（リアセンブル処理）を行うために、図 1 に示すように受信セグメントのデータを受信バッファに保留する。再送されたセグメントが受信されると、リアセンブルされたデータ（中継データ）が有線区間の TCP に対して送信要求される。中継データの大きさは最大で無線区間 TCP のウィンドウサイズ程度となるため、有線区間ではバースト的にパケットが出力される可能性がある。

図 1 のシーケンスでは重複 ACK による高速再送が行われるが、地上の有線区間において再送が行われるまでの間に中継データを受信しない無送信期間が存在することが分かる。TCP では送信しない期間が RTO (Retransmission Time Out) 値を超えて継続すると、次の転送をスロースタートから開始するよう定められている [2]。高速再送は一般に有線区間の RTO 値よりも短い期間で

再送が終了し、この無通信期間によりスロースタートが発生する可能性は小さいと考えられ、サイズの大きな中継データがそのままバースト的に出力されるものと予想される。本論文では、この PEP が出力するトラヒックのバースト性に着目し影響を評価するとともにこれを軽減する方式を提案する。また提案方式を ns-2 によるシミュレーションにより評価する。

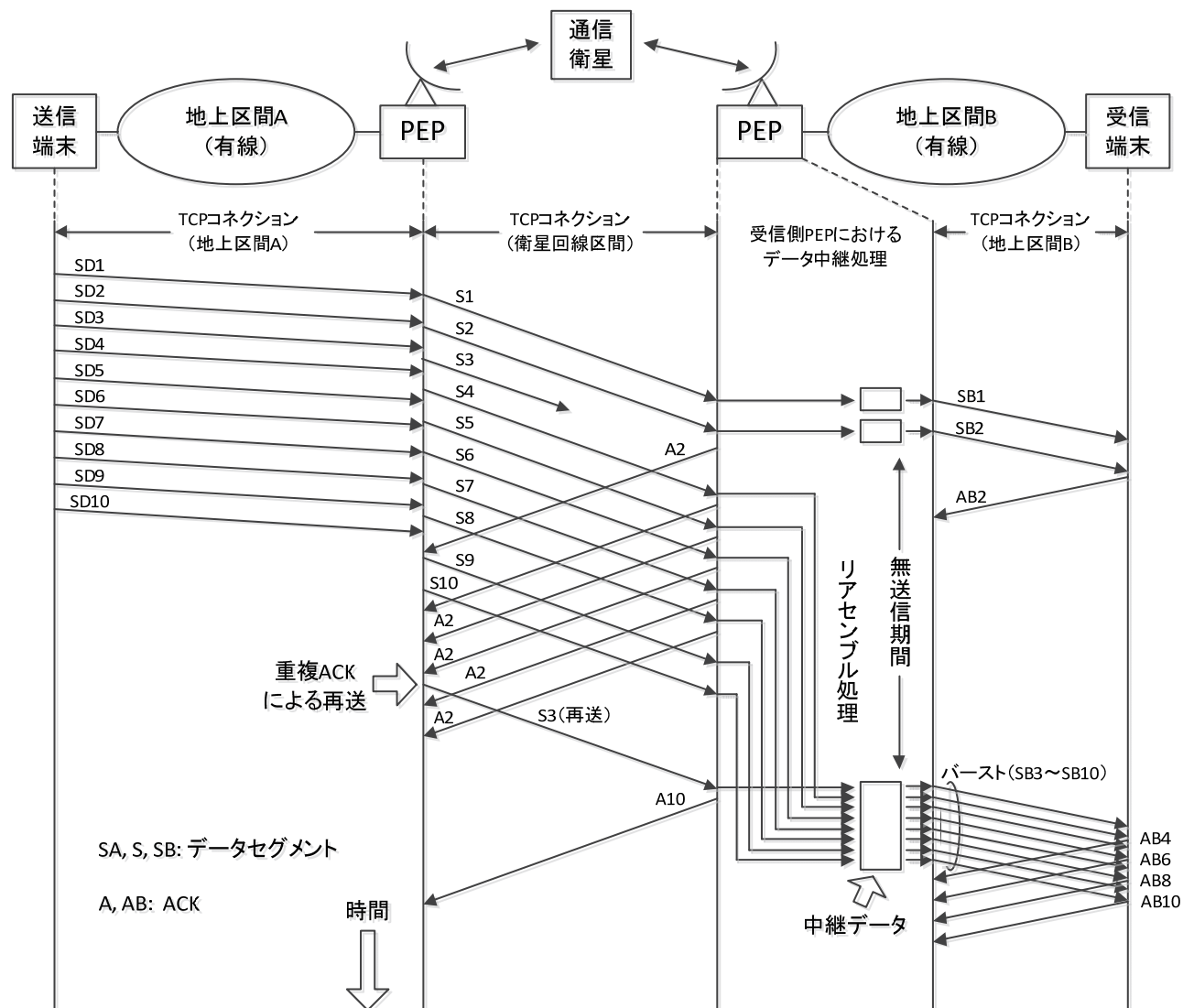


図 1 PEP を用いた方式における誤り回復シーケンス

3. 関連研究

衛星回線のように伝送誤りが発生する環境で TCP が十分な性能を達成できない問題については、TCP 自体を改良する方式が研究されており、代表的なものとして TCP Westwood [6] が提案されている。TCP Westwood の送信側は受信側からの ACK の間隔により、TCP コネクションの定常的な使用可能帯域を連続的に監視する。セグメントの喪失が検出された場合、送信側においてその時点での送出速度を算出する。この送出速度が推定した使用可能帯域より大きければ、輻輳によりセグメントの喪失が発生したと判断し通常の TCP と同じ動作を行う。そうでない場合は、伝送誤りによりセグメントの喪失が発生したと判断し、輻輳制御を行わない。また輻輳制御を行う場合、従来の高速回復 (fast recovery) ではスロースタートの閾値を単純にそれまでの半分とする

が、Westwood では使用可能帯域に整合した値を設定する。TCP Westwood の使用可能帯域の推定は、ACK の圧縮による逆方向のトラヒックが存在する場合にはうまく動作しない問題があり、これを改善するため TCP Westwood+ [7]が提案されている。

PEP に関しては RFC3135 において、PEP のタイプや PEP を用いる場合に TCP のエンドツーエンドの原則が守られない問題を中心に PEP による影響が詳細にまとめられている[8]。PEP の ACK 処理に関して、複数の ACK がバースト的に伝送され、これにより TCP のデータセグメントがバースト的に連続送信される場合があること、このようなバーストの発生を抑えるために、PEP が ACK の間に適当な間隔を設ける方式が述べられている[9]。しかし、RFC3135 は本論文が対象とする PEP のリアセンブル処理による出力トラヒックのバースト性の問題については記述していない。PEP の一方式として、PEP が TCP コネクションを終端せず、宛先に代わって送信元に早期 ACK を返す方式がある。この方式で PEP 内バッファの待ちパケット数が閾値以下の場合は早期 ACK を返し、超えた場合はエンドツーエンドで ACK を返す方式が提案されている[10]。この方式は早期 ACK したデータセグメントの喪失に備えてそのコピーを PEP がバッファに保留せねばならず、バッファ管理や再送する場合の処理が複雑化する問題、および最適な閾値の決定が難しい問題がある。

また、TCP におけるバースト的なトラヒックについては、上りと下りの帯域が非対称な場合に発生する問題が研究されているがエラー！参照元が見つかりません。、これも本論文が対象とするバーストとは異なる。TCP をエンドツーエンドで用いる場合のトラヒックのバースト性について、文献[12]においてマイクロバーストとマクロバーストとして整理されているが、これらは本論文が対象とする PEP が出力するバーストは異なる原因によるものである。また、TCP のバースト的な出力による影響を軽減するために TCP の出力においてピーク速度を抑えるシェーピングを行う方式が提案されている[13][14]。しかし、複数 TCP コネクションが存在する場合、コネクションごとにシェーピングを行うことは難しい。またシェーピングに必要なバッファ量を見積もることが難しく、バッファ溢れによるパケット損失が発生する可能性がある。

4. バースト性の影響を軽減する方式

4.1. 提案方式

本論文では PEP が出力するトラヒックのバースト性の問題に関して、図 2 に示すように PEP 内で中継を行うアプリケーションで、中継先 TCP への送信要求においてシェーピングを行い、ピーク速度を抑える方式を提案する。この方式は以下の利点がある。

- 1) TCP コネクションごとにピーク速度を抑えることができる。
- 2) シェーピングにより、ある TCP コネクションにおいて PEP が受信するトラヒックより送信トラヒックが大きくなった場合、受信側の TCP コネクションにフロー制御を行うことが可能で、バッファ溢れを防ぐとともにシェーピングに要するバッファ量を少なくできる。

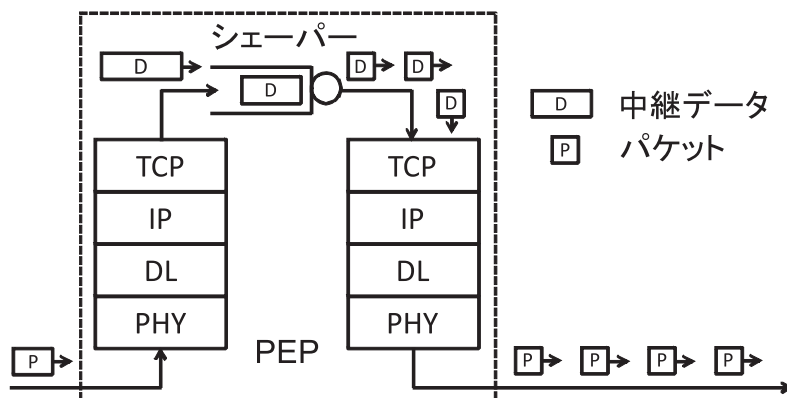


図 2 PEP における送信要求のシェーピング

4.2. バースト的な出力が発生する条件とシェーピングの有効性

TCP はウィンドウ制御および送信データのバッファリングを行っており、TCP のアプリケーションによる送信要求でピーク速度を抑えても、実際に送信されるセグメントのピーク速度が抑えられるとは限らない。しかし、TCP の再送とリアセンブリに伴うバースト的な中継データの発生に対しては、以下のような理由で TCP の入力側でシェーピングを行う方式は有効と考えられる。

通常、TCP が定常状態で動作している場合、ACK クロッキング[15][16]が働く。図 3 の(a)はこの場合を示している。TCP は送信ウィンドウサイズ分を送信すると、送達確認待ちとなり、これ以上送信要求が発生してもセグメントを送信しない。新規セグメントの送信は受信側からの新規送達確認が到着した時のみ行われ、TCP の入力側トラヒックの影響を受けない。すなわち、大量データの送信要求が行われても、送信ウィンドウが送達確認待ちセグメントで占められている状態では、バースト的にセグメントが生成送信されることはない。

バースト的なセグメントが発生する場合を図 3 の(b)に示す。送信ウィンドウが大きく空いている状態で大量データの送信要求が発生すると、多数のセグメントが一気に出力される。PEP のリアセンブル処理によるバースト的な中継データ発生では、図 1 からわかるように、発生直前に無線区間の RTT 時間以上の中継データを受信しない時間が存在する。この間に有線区間の TCP において大量の送達確認が行われ、中継データ発生直前には送達確認待ちのセグメントがほとんどない状態になる。この時点でサイズの大きな中継データの送信要求が行われると、バースト的にセグメントが出力される結果となる。これから、サイズの大きな中継データを送信側 TCP の MSS (Maximum Segment Size) 以下に分割し、間隔を空けて各セグメントを送信要求するシェーピングを行えば、TCP が一時に複数セグメントを生成送信するバースト的な出力を回避出来ると考えられる。

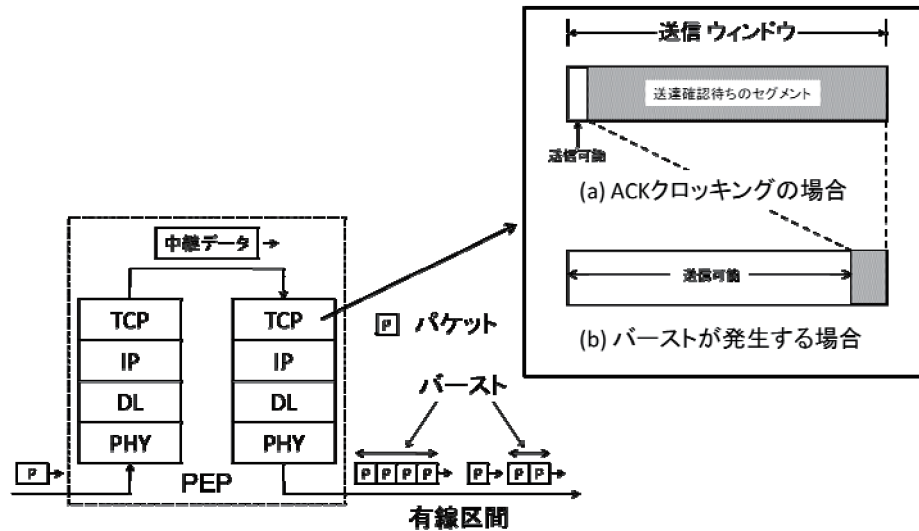


図 3 バースト的なパケット出力が発生する条件

4.3. シェーピングにおけるピーク速度

中継データを MSS 以下に分割し間隔を空けて送信する場合、送信間隔の値が問題となる。これはデータのピーク速度を幾らにすれば良いかということである。本報告では TCP のコネクションごとにシェーピングを行うが、そのピーク速度は簡単のため衛星回線の帯域速度とした。これは発生する可能性のある最大の速度である。送信先のスループットを測定して、ピーク速度をこれに適合させる方式も考えられるが、今後の課題である。

5. シミュレーションモデル

ネットワークシミュレータ ns-2 [17]を用いて、提案方式を含む以下の 3 方式を比較評価した。

- 方式 A: 提案方式（PEP でシェーピングを行う）
- 方式 B: 従来方式（PEP でシェーピングを行わない）
- 方式 C: PEP を用いず TCP をエンドツーエンドで使用する方式

図 4、図 5 および図 6 はこれら 3 方式のシミュレーションモデルを示している。ノード n0 からノード n1 を LAN による地上通信区間、ノード n1 からノード n2 までを衛星通信区間、ノード n2 からノード n3 までを有線のバックボーンネットワーク区間、ノード n3 からノード n4 を有線のアクセス区間と想定している。図 4 と図 5 では PEP を用いるが、この場合ノード n1 とノード n2 がこの PEP の機能を有するものとしている。ノード n0 がサーバ、ノード n4 はユーザのパソコンなどの端末に相当し、サーバからユーザのパソコンに大量のデータがダウンロードされるものとしている。図 4 と図 5 の PEP を用いる場合、TCP コネクションはノード n0 からノード n1、ノード n1 からノード n2、ノード n2 からノード n4 の間に設定される。図 6 の PEP を用いない場合、TCP コネクションはノード n0 からノード n4 の間に設定される。衛星回線では伝送誤りによるパケット損失が発生するものとし、シミュレーションではパケット損失率 P_L によりランダムにパケット損失を発生させている。このモデルでは、高速のバックボーンネットワークがノード n3 により低速のアクセスネットワークに接続され、衛星回線での伝送誤りによりノード n4 の PEP で発生するバースト的なトラヒックが、ノード n3 でバッファリングされる構成となっている。以

後の説明で、ノード n2 からノード n4 までを有線区間と呼ぶ。

表 1 にシミュレーション条件を示す。衛星回線と有線区間で TCP のバージョンはどちらも Westwood を用いた。ノード n1 とノード n2 が PEP の機能を行うが、使用した ns-2 では TCP を終端する TCP/Sink に受信データを出力する機能がなかったのをこれを追加した。図 4 および図 5 ではこれを TCP Sink+として示している。また、衛星回線の帯域を 6 Mbit/s、バックボーンネットワークの帯域を 100 Mbit/s とした。宛先ノード n4 は 10 Mbit/s または 3 Mbit/s のボトルネック速度で PEP 機能を行うノード n3 に接続されるものとした。この速度の差によりノード n3 内にパケットの待ち行列が生じる。ここで、ノード n3 のバッファ量を 43 パケット (64KB) と制限し、これを超えて到着したパケットは廃棄されるものとした。このノード n3 でバッファ溢れにより発生するパケット損失を有線区間のパケット損失と呼ぶ。

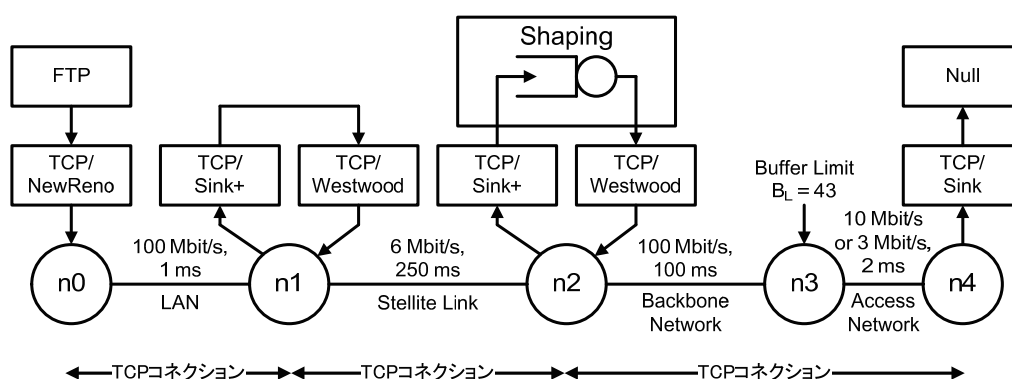


図 4 方式 A：提案方式（PEP でシェーピングを行う）

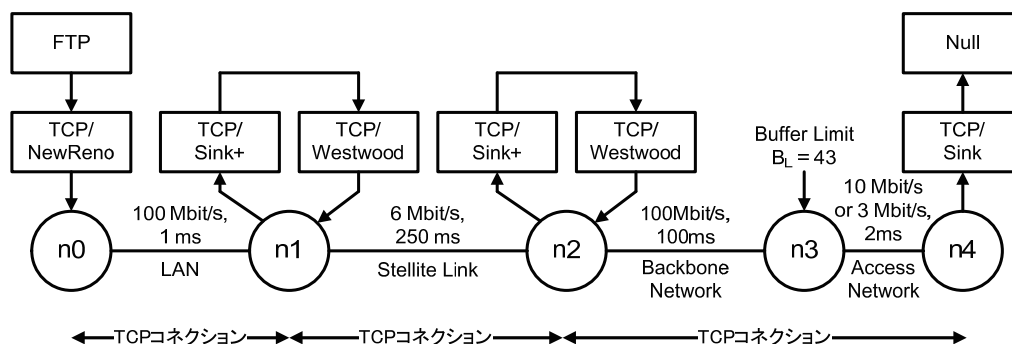


図 5 方式 B：従来方式（PEP でシェーピングを行わない）

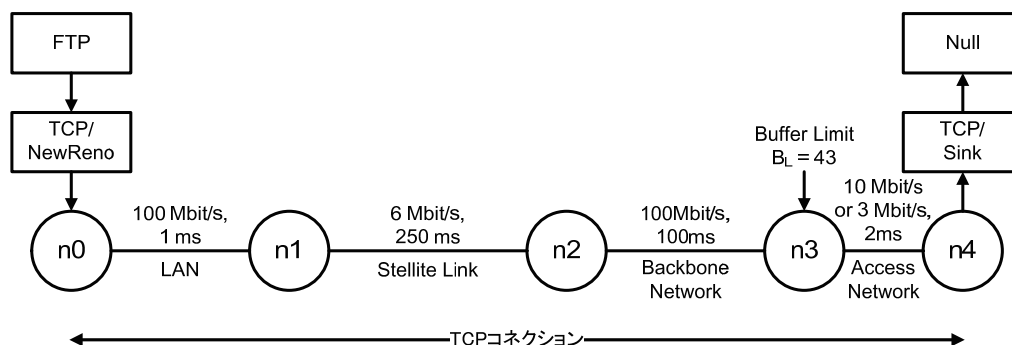


図 6 方式 C：PEP を用いない方式（TCP をエンドツーエンドで使用する）

表 1 シミュレーション条件

衛星回線の帯域	6 Mbit/s
衛星回線の往復伝搬遅延時間	250 ms
端末から PEP までの TCP のウィンドウサイズ	64 KB
パケットの伝送誤りの発生	ランダム
パケット損失率： P_L	0.0001, 0.0002, ..., 0.05, 0.1
衛星回線での TCP のバージョン	Westwood
有線区間での TCP のバージョン	Westwood
衛星回線での TCP のウィンドウサイズ	384 KB
有線区間での TCP のウィンドウサイズ	192 KB
有線区間の遅延時間	100 ms
エンドツーエンドの場合の TCP のウィンドウサイズ	512 KB
TCP のコネクション数	1
バックボーンネットワークの通信帯域	100 Mbit/s
ノード n3 とノード n4 間のインターフェース速度： B_W	10 Mbit/s, 3Mbit/s
ノード n3 のバッファ数： B_L	43 (64 Kb)
ノード n2 におけるシェーピング速度	6 Mbit/s
シミュレーション時間	1000 sec
シミュレーションの試行回数	10

方式 A では有線区間への TCP の送信においてシェーピングを行うが、シェーピング速度は衛星回線の速度と同じ 6 Mbit/s とした。ノード n3 でパケットが廃棄されるのに伴い、ノード n2 から n4 の区間の TCP のスループットが衛星回線区間の TCP のスループットより小さくなり PEP の送信側にデータが滞留する可能性がある。このため、二つの TCP コネクション間でのフロー制御をシミュレートする必要がある。残念ながら、ns-2 の告知ウィンドウは受信側からの ACK により通知される値で動的に変化するメカニズムが実装されていない。このため、PEP の中継バッファを定期的に監視し、ある値を超えた場合は無線区間 TCP の送信ウィンドウの値を 1 に低下させることにより擬似的にフロー制御をシミュレートした。

6. シミュレーション結果と考察

6.1. 中継データ長分布とバースト長分布の関係

中継データは PEP 内の衛星回線側 TCP が受信したデータで、これが有線区間の TCP に送信要求される。シミュレーションでは、この中継データが実際に PEP からバーストとして出力されているかを観測し、確認した。図 7 と図 8 は PEP でシェーピングを行わない場合の中継データ長分布とバースト長分布を示しており、図 7 ではパケット損失率 P_L が 0.00002、図 8 ではパケット損失率 P_L が 0.0001 である。縦長の細い棒が中継データ長の分布、黒丸がバースト長の分布を示している。

バースト長分布は有線区間の回線に連続して送信されるパケット数（バースト長）の分布である。中継データ長は TCP がバイト単位のスリームサービスであるためバイト単位となるが、図ではこれを MSS の大きさ（1.5KB）で規格化し、パケット数相当に変換して両者を比較できるようにしている。シェーピングを行わない場合、中継データ長の分布もバースト長の分布もかなり大きな値をとることが分かる。これはリアセンブリング処理による長さの大きな中継データがほ

ばそのまま連続したパケットとして送信されているによるものである。中継データ長の分布とバースト長の分布は一致していないが、これは TCP のウィンドウサイズが衛星回線は 384 KB、有線区間は 192 KB と異なるためである。中継データ長は最大で 260 程度の値まで分布しているが、これは 384KB を MSS の大きさに割った値となっている。同様に連続して送信されるパケット数も最大で 130 程度の値まで分布しているが、これも 192 KB を MSS の大きさである 1.5 KB で割った値となっており、最大中継データ長や最大バースト長が TCP のウィンドウサイズにより決まることを示している。また、パケット損失率 P_L が 0.00002 の場合と 0.0001 の場合を比較すると、バーストの発生頻度はパケット損失率 P_L が大きい 0.0001 の場合の方が大きい、長さが 260 程度の最大バーストの発生頻度は減少している。これから、パケット損失率 P_L が小さい場合の方が長さの大きなバーストが発生し易く、バースト性の影響が大きくなることが予想される。パケット損失率 P_L が大きくなると長さの大きなバーストの発生頻度が減少する原因は、衛星回線で TCP の再送頻度が大きくなると、輻輳制御が行われ平均的にウィンドウサイズが小さくなるためと考えられる。

図 9 と図 10 は PEP でシェーピングを行った場合の中継データ長分布とバースト長分布を示しており、図 9 ではパケット損失率 P_L が 0.0002、図 10 ではパケット損失率 P_L が 0.00001 である。シェーピングを行うことにより、中継データ長の分布にかかわらず、バースト長は 1 または 2 の大きさとなっており、シェーピングの効果が現れていることが分かる。バースト長が 2 となる場合は、遅延 ACK により 2 セグメントが送達確認された場合、2 セグメントが連続して送信されたものと考えられる。

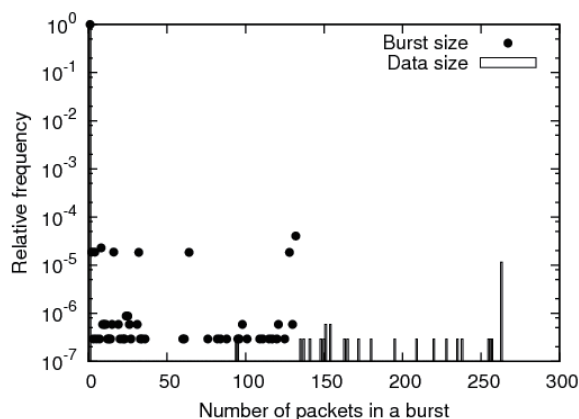


図 7 シェーピングを行わない場合の中継データ長の分布とバースト長の分布、 $P_L = 0.00002$

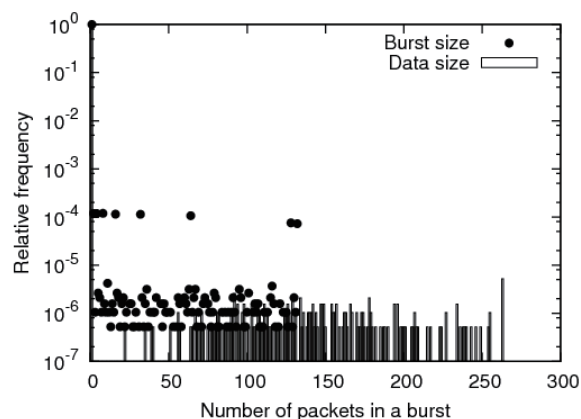


図 8 シェーピングを行わない場合の中継データ長の分布とバースト長の分布、 $P_L = 0.0001$

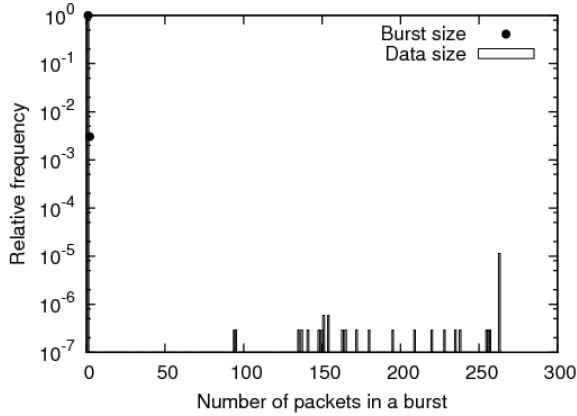


図 9 シェーピングを行う場合の中継データ長の分布とバースト長の分布、 $P_L = 0.00002$

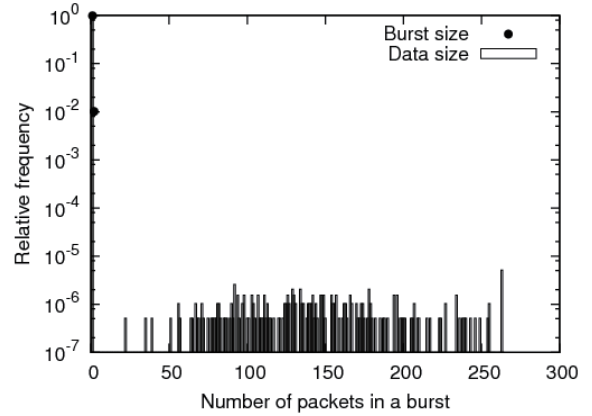


図 10 シェーピングを行う場合の中継データ長の分布とバースト長の分布、 $P_L = 0.0001$

6.2. ボトルネック帯域が 10 Mbit/s の場合のスループット特性

図 11 は衛星回線での伝送誤りによるパケット損失率とスループットの関係を示している。ここで、有線区間を構成するアクセスネットワークの帯域は 10 Mbit/s で、衛星回線の帯域より大きい値としている。衛星回線でのパケット損失率が増加するとスループットが低下するが、方式 A と B のスループットが常に方式 C よりそれよりも大きく、PEP の効果が分かる。ただし、この場合、方式 A と方式 B でスループットに差は見られない。図 12 は図 11 と同じ条件における衛星回線での伝送誤りによるパケット損失率と有線区間でのパケット損失率の関係を示している。方式 B では有線区間において 10^{-5} から 10^{-4} 程度のパケット損失が見られるが、方式 A ではパケット損失はほとんど見られない。これはシェーピングによりバッファ溢れが抑えられている効果と考えられる。方式 C は PEP によるバースト的なトラヒックが発生しないので、有線区間でのパケット損失は全く見られない。方式 B において、有線区間でパケット損失が発生しているにもかかわらず、スループットが方式 A と変わらない原因は、次のように考えられる。有線区間でパケット損失により有線区間での TCP のスループットは低下するが、それでも衛星回線における TCP のスループットより大きく、全体のスループットは衛星回線のスループットにより決まる。

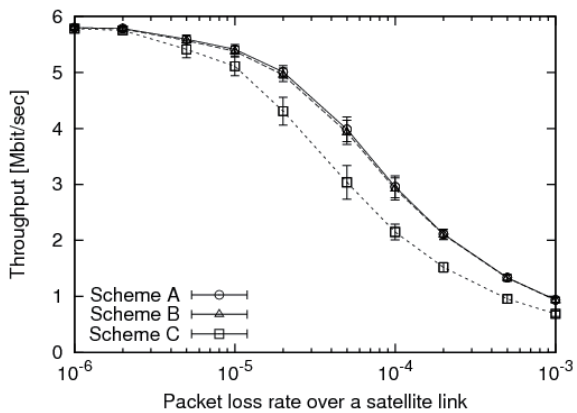


図 11 衛星回線でのパケット損失率とスループットの関係、 $B_w = 10$ Mbit/s

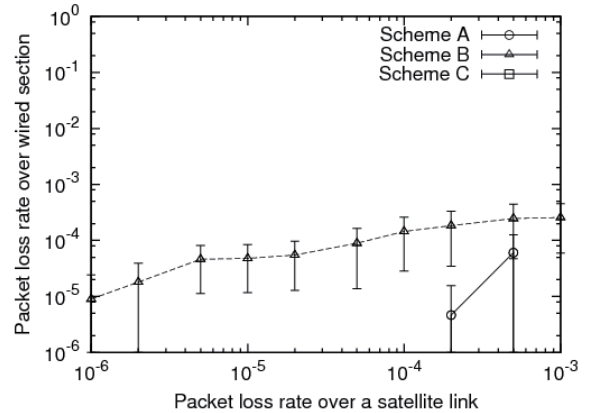


図 12 衛星回線でのパケット損失率と有線区間でのパケット損失率、 $B_w = 10$ Mbit/s

6.3. ボトルネック帯域が 3 Mbit/s の場合のスループット特性

図 13 は、有線区間を構成するアクセスネットワークの帯域を 3 Mbit/s とした場合の衛星回線での伝送誤りによるパケット損失率とスループットの関係を示している。方式 A と方式 B の性能はほぼ同じであるが、方式 C より優れている。図 14 は図 13 と同じ条件における衛星回線での伝送誤りによるパケット損失率と有線区間でのパケット損失率の関係を示している。この条件では、ボトルネック帯域の大きさが衛星回線の帯域より小さいため、方式 C を含むすべての方式においてパケット損失が発生している。方式 A と方式 B を比較すると、衛星回線でのパケット損失率が大きくなると方式 B では有線区間のパケット損失率が增大するが、方式 A では増加が少なく、有線区間のパケット損失率は方式 B より小さい。これはシェーピングの効果によるものである。

以上から、提案したシェーピングは全体のスループットの改善には効果が見られなかったが、有線区間におけるパケット損失の改善には効果が有ると言える。バックボーンネットワークとアクセスネットワークを結ぶノードには衛星回線以外のトラフィックが通過し、PEP によるバースト的なトラフィックは他のトラフィックにパケット損失や遅延時間の変動などの影響を与える可能性がある。提案したシェーピングは、このような悪影響を緩和する効果があると言える。

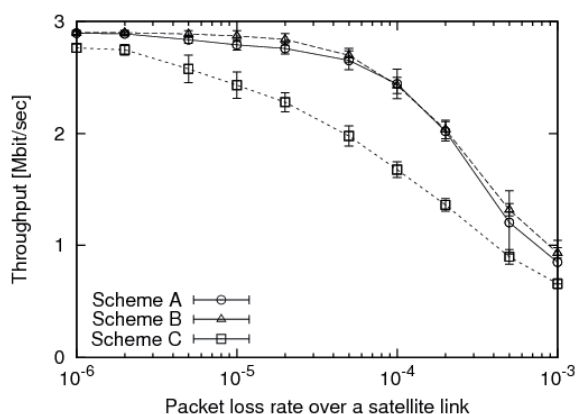


図 13 衛星回線でのパケット損失率とスループットの関係、 $B_w = 3 \text{ Mbit/s}$

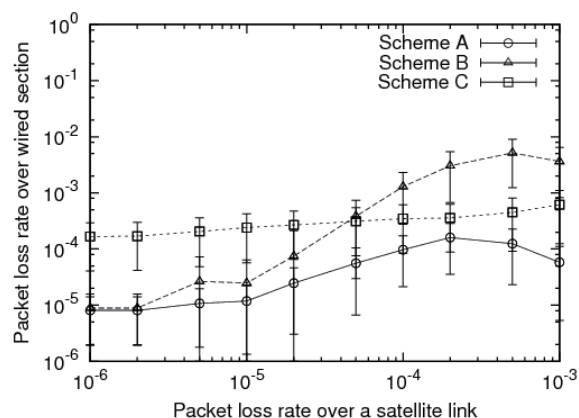


図 14 衛星回線でのパケット損失率と有線区間でのパケット損失率、 $B_w = 3 \text{ Mbit/s}$

7. まとめ

衛星通信で広く用いられる TCP コネクション分割方式において、伝送誤りがある条件では TCP コネクションを中継する PEP で大きな中継データ長が発生すること、これにより PEP が出力するトラフィックのバースト的となってバッファ制限のあるノードで中継する際にバッファ溢れによりパケットの損失が発生し、TCP の性能が低下することを述べた。またこの問題を軽減する方式として PEP のアプリケーションで TCP に対する送信要求のシェーピングを行う方式を提案し、ネットワークシミュレータ ns-2 によるシミュレーションにより有効性を示した。今回のシミュレーションではシェーピング速度を衛星回線の速度と等しく設定したが、有線区間のボトルネック帯域を推定してシェーピングを行うことが望ましく、今後の課題である。

謝辞

本研究は、福井工業大学特別研究費の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 門脇直人, 鈴木龍太郎, 高橋卓, 吉村直子, 中尾正博, 若菜弘充, “「きずな」(WINDS)によるブロードバンド衛星通信実験,” 信学論 B, vol. J94-B, no.3, pp.325-332, March 2011.
- [2] M. Allman, S. Dawkins, D. Glover, J. Griner, D. Tran, T. Henderson, J. Heidemann, J. Touch, H. Kruse, S. Ostermann, K. Scott, and J. Semke, “Ongoing TCP Research Related to Satellites,” IETF, RFC2760, Feb. 2000.
- [3] HUGHES, <http://www.hughes.com/Pages/Default.aspx>.
- [4] M. Luglio, M. Y. Sanadidi, M. Gerla, and J. Stepank, “On-Board Satellite Split TCP Proxy,” IEEE JSAIC, Vol. 22(2), pp.362-370, Feb. 2004.
- [5] M. Meyer, J. Sachs, and M. Holzke, “Performance Evaluation of a TCP Proxy in WCDMA Networks,” IEEE Wireless Communications, vol. 10(5), pp.70-79, Oct. 2003.
- [6] C. Casett, M. Gerla, S. Mascolo, M. Y. Sanadidi, and R. Wang, “TCP Westwood: Bandwidth Estimation for Enhanced Transport over Wireless Links,” ACM MOBICOM 2001, pp.287-297, July 2001.
- [7] L. A. Grieco and S. Mascolo, “Performance Evaluation and Comparison of Westwood+, New Reno and Vegas TCP Congestion Control,” ACM Computer Communications Review, Vol. 34(2), pp.25-38, April 2004.
- [8] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, and Z. Shelby, “Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations,” RFC3135, June 2001.
- [9] M. Allman, V. Paxson, and W. Tevens, “TCP Congestion Control,” RFC 2581, April 1999.
- [10] 和泉芳規, 長田繁幸, 横平徳美, “PEPによるTCPの性能改善 ～ 早期ACKパケットの返送タイミングがスループットに及ぼす影響 ～,” 信学技報, NS2004-264, pp.103-106, Feb. 2005.
- [11] H. Balakrishnan, R. H. Katz, and V. N. Padmanabhan “The Effects of Asymmetry on TCP Performance,” Mobile Networks and Applications, Springer Netherlands, Vol. 4(3), pp.219-241, Oct 1999.
- [12] M. Allman and E. Blanton, “Notes on Burst Mitigation for Transport Protocols,” ACM Computer Communications Review, Vol. 35(2), pp.53-60, April 2005.
- [13] C. Partridge, “ACK Spacing for High Delay-Bandwidth Paths with Insufficient Buffering,” Internet Draft draft-rfcd-info-partridge-01.txt, Aug. 1998.
- [14] 高野了成, “HPC ユーザが知っておきたい TCP/IP の話,” SACSIS2009 チュートリアル, May 2009.
- [15] W. Stevens, “TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols,” Addison-Wesley, 1994.
- [16] 松山公保, 西田佳史, 尾家祐二, “トランスポートプロトコル,” 岩波書店, 2001.
- [17] Network Simulator – ns (version 2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)