

広域無線通信メディア利用時のゲートウェイ協調による TCP の性能改善

山本 一隆, 砂原 秀樹, 尾家祐二

奈良先端科学技術大学院大学

概要

携帯電話や PHS などの広域無線通信メディアを利用してインターネットに接続を行う場合、無線状況による RTT の揺らぎ、データリンク層とトランスポート層でのデータの信頼性保証の重なり等の影響により、データの転送効率が著しく低下するという問題がある。

本稿では、ゲートウェイ協調により、広域無線通信メディア利用時の TCP の性能を向上させることを提案する。協調ゲートウェイは TCP コネクション上で、データの信頼性を保証するリンク層と保証しないリンク層の間に介在し、受信ウィンドウを考慮した ACK の生成を行うことによって、送信側のデータ転送をコントロールする。これにより無線状況悪化時のデータの転送効率の低下を防ぐことが可能となる。実験の結果、無線状況悪化時のデータ転送速度の向上が確認された。

Improving TCP Performance over Cellular Telephone Network by Cooperative Gateway

Kazutaka Yamamoto, Hideki Sunahara, Yuji Oie

Nara Institute of Science and Technology

Abstract

TCP cannot work effectively over cellular telephone network, because RTT is changed under worse transmitter conditions and error control schemes cause bad effects on TCP. We propose a technique, which we call cooperative gateway, to improve TCP performance in such environment. It is located between the two kinds of links, the one has error control schemes and the other doesn't. The cooperative gateway generates fake acknowledgments and manages sender's data transmission by controlling window size in TCP header. Our experiments show that cooperative gateway improves TCP performance.

1 はじめに

インターネットの普及と共に、その通信メディアも従来の専用線、固定電話網、ISDNに加え、移動電話網、無線LAN、衛星回線、CATVネットワークなど多様化してきている。この通信メディアの多様化に伴い、ユーザは状況に応じて最良の通信メディアを選択できるようになってきた。

しかし、現在のTCPはリンク層でのビットエラー率が低く、パケットロスは輻輳によって引き起こされるような有線環境において、最良の性能を示すように設計されている。よって、従来のものとは異なる特性をもつ新しい通信メディアでは、伝送効率が低下するといったことが起きている。

例えば、無線LANなどのビットエラー率の高い通信メディアでのビット誤りによるパケットロスに

対しても、輻輳によるパケットロスとみなし、輻輳回避を適用する。従って、ネットワークに転送するパケット数を減少させてしまい、伝送効率が低下する [1]。

衛星回線などの伝送遅延が大きい通信メディアでは、伝送遅延の影響によりデータ転送速度が著しく低下する。これは、TCP のフロー制御により、受信側が広告したウィンドウサイズ以上のデータを送信側が送信できないようになっているため、確認応答が返ってくるまでの時間が長い場合、単位時間に送信可能なデータが減少するからである [2]。

携帯電話や PHS などの広域無線通信メディアを利用した場合にも、前述の 2 つのメディア同様に現在の TCP との相性が悪く伝送効率の低下という問題が起きる。これらの特徴が違うメディア全てに対して 1 つのプロトコルで、効率の良いデータ転送を行なうことは不可能であるため、利用するメディアの特性に合わせた解決策をとるのが妥当であると思われる。そこで本研究では、広域無線通信メディアに注目し、ゲートウェイ協調によって、TCP の性能を改善する手法について提案する。

本稿の構成は次の通りである。まず、広域無線通信メディア利用時の TCP の特徴、問題点について概説し、その改善方針について述べる。その後、本稿で提案する協調ゲートウェイの役割について説明し、最後に、協調ゲートウェイを利用した際の TCP の性能評価について述べる。

2 広域無線通信メディア利用時の TCP

2.1 広域無線通信メディアの特徴

一般に携帯電話や PHS 等の広域無線通信メディアを利用したデータ通信では以下のような特徴がある。

1. 無線状況の悪化による伝送遅延の揺らぎが大きい
2. ハンドオーバーやチャンネル切替による瞬断が発生する
3. 回線断が起きる

PDC (Personal Digital Cellular phone) や、PI-AFS (PHS Internet Access Forum Standard) などの無線データリンクのプロトコルでは、ARQ (Automatic Repeat Request) により、データ誤りのあるフレームは再送することでデータリンク層において、エラーフリーを保証している。無線状況が良

好であればさほど問題はないが、無線特有のフェージングやシャドウイングなどが頻繁に起きるような無線状況では、再送が頻発し、伝送遅延が大きくなる [3]。

また、携帯電話や PHS などの移動通信では、通信品質の確保やゾーン間での連続性を確保するために、チャンネル切替えやハンドオーバーが起動される。この際、通信の瞬断が起きるため一時的にデータが流れない状況が起きる。これは TCP などの上位層に影響を及ぼす。

上記の 1,2 がひどくなるとついに回線断が起きる。

2.2 現行の TCP の挙動

現行の TCP の機能には大きくわけて、フロー制御とデータの信頼性の保証という 2 つの機能がある。

フロー制御に関しては、データの受信側が広告する受信ウィンドウと、データの送信側が内部に保持している輻輳ウィンドウによりネットワーク中に送り出すデータ量を制限している。現行の TCP ではパケットロスが判明すると、ネットワークの輻輳が原因でパケットロスが生じたと判断し、送信側で輻輳ウィンドウを小さくすることで、輻輳を回避しようという処理をする。特にタイムアウトによるパケットロスの判明では、輻輳ウィンドウを 1 セグメントサイズにまで減少させる。

データの信頼性の保証に関しては、パケットが消失したと判断した場合、そのデータを再送することによって信頼性を保証している。パケットが消失したという判断には、一定時間内に確認応答が返ってこない場合のタイムアウトと、受信側が順番通りでないデータパケットを受信した場合に送信する重複 ACK を、送信側が一定数 (通常 3) 受信した場合の 2 通りがある。

2.3 広域無線メディア利用時の TCP の問題点

2.1 で述べたように、広域無線メディアを利用した場合には、伝送遅延の揺らぎが大きい。この伝送遅延の揺らぎの大きさが TCP の挙動に大きな影響を与える。図 1 はその TCP の挙動を示したものである。なおここでは、信頼性を保証しないデータリンク層のメディアでつながっているホスト (以下、有線側ホスト) から、信頼性を保証するデータリンク層のメディアでつながっているホスト (以下、無線側ホスト) へのデータ転送を考慮している。ゲー

トウェイを通過したパケットは、無線状況により無線側ホストへの到達が遅れる。図1では2番のパケットの到達が大きく遅れているのがわかる。TCPではタイムアウトによりパケットロスの判断をしているが、このタイムアウトの時間はパケットを送信して、その確認応答が返ってくるまでの時間であるRTTを基に、計算されている。順調に行われていた通信が無線状況の悪化により伝送遅延が大きくなり、RTTが長くなると、TCPでタイムアウトを起しパケットの再送、輻輳ウィンドウの減少が起きる(図1のtimeout)。しかし、無線リンク層においてエラーフリーは保証がされているので、以前送信したパケットは無線側ホストに確実に届き、確認応答がされる。従って、再送されたパケットは無線側ホストにとっては以前に受信したデータであり、期待するデータでないことから、重複ACKを有線側ホストに転送することになる(図1のduplicate ack)。この重複ACKが3つ以上届くと、有線側ホストは更にパケットロスが起きたと判断し、再送を行なう(図1のFast retransmit)。このような悪循環によって、スループットの低下が生じる。

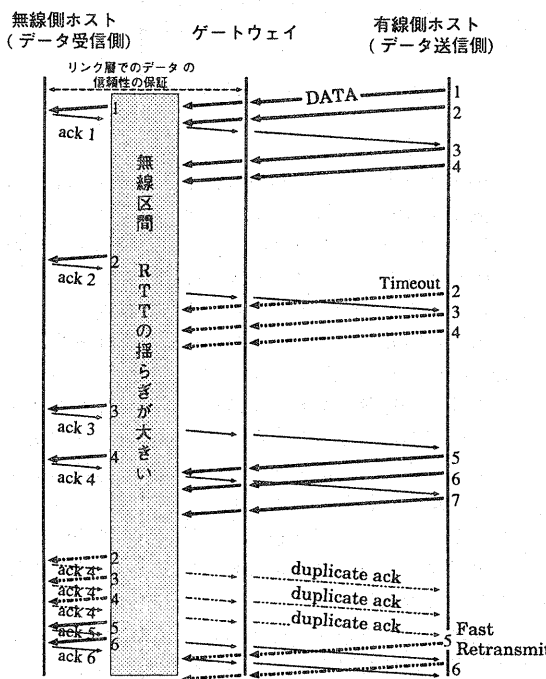


図1: 広域無線メディア利用時のTCP

3 広域無線通信メディア利用時のTCPの改善方針

この章では、前章で述べた広域無線通信メディア利用時のTCPの問題点を解決するための改善方針を述べる。大きな方針としては以下の3つがあげられる。

1. 無線区間等のデータリンク層での信頼性保証を有効に利用する
2. 送信側にRTTの変化によって生じるタイムアウト再送をさせない
3. 既存のシステムの変更は必要最小限にとどめる

1はデータリンク層で保証しているデータの信頼性をTCPでも保証するのは、機能が重なるので無駄が多くなる。このような場合、TCPでのデータの信頼性保証の機能を軽くして、データリンク層に頼るのが得策である。2については、無線状況などによってRTTが極端に長くなった場合、TCPでタイムアウトを起こす。しかし、信頼性を保証するリンク層を利用して送信したパケットは正確に受信側に届くので、確認応答が返ってくるのが遅れただけである可能性がある。そのような時にTCPでタイムアウト、パケットの再送が起きるのは問題である。3については、現在のTCPで稼働している様々なサーバやクライアントを全て広域無線通信メディア利用時も転送効率が下がらないように、新たなものにするということは莫大なコストがかかる。よって、既存のシステムの変更する部分は最小限にとどめ、TCPの効率の改善を図る。

以上の方針に基づき、本研究ではデータリンク層のプロトコルによって、データの信頼性を保証している区間と保証していない区間をわけるゲートウェイが通信の補助をすることによって、TCPの性能を改善する方法を提案する。

これまでに、無線部分と有線部分との間のゲートウェイでTCPコネクションを分割したり[4]、無線区間では独自プロトコルを採用し[5]、ゲートウェイから再送を行うといった手法は存在したが、このような方法の場合、有線区間と無線区間での伝送遅延、帯域の違いにより、ゲートウェイにデータをバッファリングして保存しておく必要があった。特に無線状況が悪化した場合には、有線区間でデータ転送が進められてしまい、ゲートウェイでのバッファリングの負荷は非常に大きなものになってしまうという問題がある。本研究では、無線状況が悪化した場合、有線側の送信ホストからのデータ転送を無線状況が

回復するまで停止させることにより、ゲートウェイでのバッファリングの負荷を抑える。詳細は次章で述べる。

4 協調ゲートウェイの役割

協調ゲートウェイは、リンク層で信頼性が保証されている区間と保証がされていない区間の中で TCP コネクションに介在し、無線状況に応じて、有線側のホストからのデータ転送をコントロールする。協調ゲートウェイは、既存の TCP に変更を加えないまま、送信側のデータ転送をコントロールするために、TCP のヘッダ情報にある受信ウィンドウの広告を利用する。詳細は以下の通りである。

1. 協調ゲートウェイは、有線側ホストからのデータを受信したら、それを無線側のホストに転送すると同時に、無線側のホストになりすまし、偽造 ACK を作成、有線側のホストへ送信する。その際に、その時点で無線ホストから受信している ACK 番号、広告された受信ウィンドウの大きさ、有線側ホストから届いたデータのシーケンス番号、データ長とから、無線側ホストの空き受信ウィンドウサイズを計算し、偽造 ACK に反映させる。無線側へ転送されたデータパケットは、信頼性を保証するデータリンク層により、無線側のホストへ正しく届くことになる。
2. 無線側ホストから ACK を協調ゲートウェイが受信した場合、協調ゲートウェイが内部で保持している無線側ホストの空き受信ウィンドウサイズの値を更新するが、有線側ホストへ ACK の転送はしない。これは偽造 ACK を協調ゲートウェイが転送しているからである。
3. 無線状況の悪化により、無線側ホストからの ACK の到着が遅れると、有線側ホストからの転送により、偽造 ACK 中の受信ウィンドウサイズが次第に減っていき、ついには 0 になる。このような偽造 ACK を有線側ホストが受信した場合、有線側ホストはそれ以上のデータ転送は不可能となるので、既存の TCP で稼働しているホストにおいても、無線状況が悪い時は、データ転送を止めることができる。
4. 無線側ホストから ACK が返ってきて、受信ウィンドウに 1 セグメント以上の空きができた場合、協調ゲートウェイは受信ウィンドウサイズ更新の偽造 ACK を作成し、送信側ホストへ送信の再開を促す。

図 2 は協調ゲートウェイが介在した場合の TCP の挙動を示したものである。

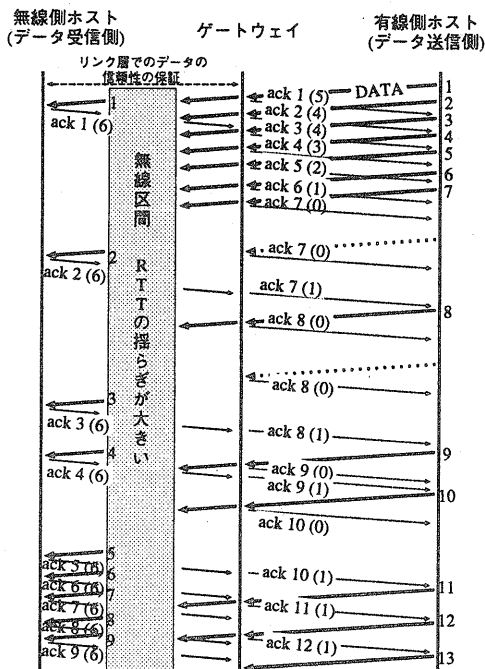


図 2: ゲートウェイ協調による TCP

協調ゲートウェイから無線側ホストになりすまし偽造 ACK が送信されているが、図中に書かれた ack1(5) などの括弧の中の数字は、無線側ホストの受信ウィンドウサイズを示す。受信ウィンドウサイズは TCP コネクション確立の際、SYN をやりとりする時に協調ゲートウェイでパケットを覗き見ることによって把握することができる。図中の TCP コネクションでは、無線側ホストの受信ウィンドウは 6 セグメント分である。従って、最初の 1 セグメントが送られてきた際に、協調ゲートウェイでは、無線側ホストの受信ウィンドウ 6 のうち、1 セグメント分データが埋められたことを想定し、偽造 ACK の受信ウィンドウサイズの欄に 5 セグメント分の空きがあることを広告する。

無線側ホストから実際の ACK が協調ゲートウェイに返ってきた場合は、改めて空き受信ウィンドウサイズを計算し、次に有線側ホストからきたデータパケットに対する偽造 ACK に反映させる。図 2 の偽造 ack3 において広告受信ウィンドウが ack2 と同じ値の 4 であるのは、無線側ホストからの ack1 を

受信したことで、受信ウィンドウサイズが1セグメント分の空きができたことを確認したからである。

無線状況の悪化により、2つめのセグメントの到着が遅れ、無線側ホストからのack2がなかなか返ってこない間にも、協調ゲートウェイの偽造ACKにより、有線側ホストのデータ転送は進むが、やがて偽造ACKの広告受信ウィンドウが0になり、有線側ホストはデータの転送ができなくなる。このように無線状況が悪い時は、有線側のホストには無線側ホストのデータの処理能力が低く、転送されたデータが処理しきれていないと判断させることで、通常のTCPのようにタイムアウトの発生、それに伴う無駄なパケットの再送が起きることを防ぐことができる。

TCPでは0ウィンドウが広告されると、送信側は、受信側の受信ウィンドウに空きができたかどうか確認するために1バイト転送することになっている。そのパケットに対しては再び0ウィンドウの偽造ACKを送信することで対処する(図2における2つの点線部)。

0ウィンドウを広告している間に、協調ゲートウェイへ無線側ホストからackが返ってきて、無線側ホストの受信ウィンドウに空きが確認された場合には、その空き受信ウィンドウサイズをもとに偽造ACKの作成、有線側ホストへ送信し、有線側ホストに続きのデータ転送を促す。

このようにして無線状況の悪い時にも無駄な再送をすることなくデータの転送を行なうことができる。

図2と図1は同じ無線状況のもとでのTCPの挙動を示している。これら2つを比較してみると、通常のTCPでは、無駄な再送が起きることで、正味7パケット分しか送信されていないところを、ゲートウェイ協調によるTCPは無駄な再送が起こらずに、13パケットを送信できている。このことからゲートウェイ協調によりTCPが性能を向上させていることが伺える。

5 実装・性能評価

5.1 実装

本研究の協調ゲートウェイでは、固定網にモデムを通じて継った固定ホストと、移動ホストをPPPでつなぎ、携帯電話やPHS等で回線交換型のデータ通信を行なうことを想定している。この場合、無線基地局と移動ホストの間はPDC,PIAFSなどのプロトコルでエラーフリーが保証される。また無線基地局とモデムの間でもMNP CLASS 4やV42などのエラー訂正プロトコルが適用されるので、この間もエラーフリーが保証される。つまり、移動ホストとモデムで継った固定ホストまではデータリンク層でエラーフリーが保証されることになるので、この固定ホストを協調ゲートウェイとする。

実装はBSD/OS 3.1上でijj-pppのコードに協調ゲートウェイのコードを追加することで行なった。

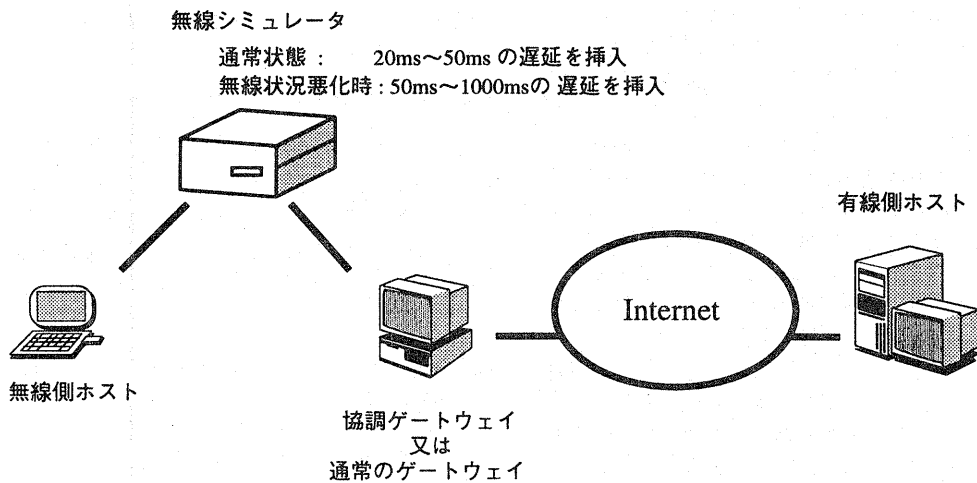


図3: 性能評価に使用したネットワークの構成

5.2 性能評価

本節では提案した協調ゲートウェイの有効性を検証するために行った性能評価試験の結果について述べる。

図3は、性能評価に使用したネットワークの構成である。無線環境にある移動ホストが無線シミュレータを介して、有線環境にあるFTPサーバよりファイルを取得する際のスループット、goodput(全転送データパケット中の有効パケット率)を測定した。無線シミュレータにおいては無線状況悪化時の伝送遅延の揺らぎをエミュレートするため、無線シミュレータを通過するパケットに対して、通常状態で20msec～50msec、無線悪化状態で50msec～1000msecの遅延を挿入した。無線悪化状態は周期的に起こすよう設定した。

表1は協調ゲートウェイが存在した場合(CGWあり)のデータ転送と、協調ゲートウェイが存在しない場合(CGWなし)のデータ転送でのスループット、goodputの比較を示している。

表1: 協調ゲートウェイの有無によるTCPのスループット、goodputの違い

	Throughput	goodput
CGWあり	3899 bytes/s	100 %
CGWなし	2152 bytes/s	92.3 %

協調ゲートウェイが存在しない場合、無線シミュレータで挿入される遅延が大きくなると、2.3節で述べたようにTCPでタイムアウトが発生し無駄な再送が起きる。この再送パケットは無線側ホストでは破棄されるため、協調ゲートウェイなしの場合のgoodputは92.3%と低くなっている。一方、協調ゲートウェイが存在する場合には、遅延が大きくなっても偽造ACKの広告ウィンドウを0とすることで、データ転送をストップさせ、TCPでのタイムアウト、パケットの再送を防ぐことができる。よって、協調ゲートウェイありの場合パケットの再送が起きないため、goodputは100%である。

スループットに関しては、goodput以上に差が明らかに生じている。これは、無線状況が悪化した場合、パケットが到達し辛い状況になるにもかかわらず、無線側ホストで破棄されてしまう再送パケットを転送するためである。

協調ゲートウェイが存在した場合、偽造ACKによりデータ転送をコントロールし、無線側ホストか

らのACKで受信ウィンドウの空さを確認した後、続きのデータを転送させる。よって、無線側ホストで破棄されるパケットは転送せず、パケットが到達し辛い状況においても確実にデータ転送を進めることができる。このことがスループットの差となって現れたと考えられる。

6 まとめ

本稿では、携帯電話やPHSなどの広域無線環境において、無線状況により低下するTCPのスループットを、ゲートウェイで協調することで改善する方法を提案した。無線状況が悪化した場合、TCPで起きるタイムアウト、データの再送を、協調ゲートウェイが無線側ホストのウィンドウサイズを考慮した偽造ACKを作成、送信することでデータの転送を止め、無駄な再送を防ぐことが可能となる。シミュレーションを通した性能評価によって、スループットの低下防止の効果を確認した。

参考文献

- [1] H.Balakrishnan, V.Padmanabhan, S.Seshan, R.Katz: A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links, IEEE/ACM Transactions on Networking, Dec. 1997
- [2] 三宅優, 長谷川輝之, 長谷川亨, 加藤聡彦: 衛星インターネット用TCPゲートウェイの提案, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会報告集, 1998年6月
- [3] 田中利憲, 藤井敏孝, 服部武: PHSマルチメディア伝送システム, NTT R&D, Vol.45, No.11 1996
- [4] A.Bakre, B.R.Badrinath: I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts., Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Computing System (ICDCS), Vancouver, Canada, June 1995
- [5] 植原啓介, 西村厚, 村井純: LWPA: インターネット環境における広域無線通信メディア利用のためのアーキテクチャ, インターネットコンファレンス'97論文集, pp49-62, 1997年12月