

2209 IEEE 802.11g を利用した高速鉄道用移動通信における TCP 動作の解析

○山田 和弘 (JR 東海) 川原 圭博 (東京大)
浅見 徹 (東京大) 相田 仁 (東京大)

An Analysis of TCP Behaviors over a High Speed Communication System based on IEEE 802.11g

Kazuhiro YAMADA, Central Japan Railway Co.

Yoshihiro KAWAHARA, The Univ. of Tokyo

Tohru ASAMI, The Univ. of Tokyo

Hitoshi AIDA, The Univ. of Tokyo

We are proposing a high speed mobile communication system using IEEE 802.11g. The System has been verified to have a maximum communication performance of 25(Mbps). On the other side, high speed movement causes frequent Layer 2 Handovers (L2HO), on each of which TCP (Transmission Control Protocol) experiences Retransmission TimeOuts. This paper thoroughly discusses a TCP flow containing a TCP Timeout over a L2HO. As a result, this paper concludes that TCP Timeouts are incurred from consecutive packet drops over an instable IEEE 802.11g link just before a L2HO, not the L2HO itself.

Keywords: High Speed Mobile Communication, Layer 2 Handover, Mobile IPv4 and TCP

1. はじめに

高速鉄道の世界的な広がりとともに、高速鉄道車内における高速ネットワークアクセスのニーズも高まる可能性がある。このような中、2009年3月には、東海道新幹線車内においてインターネット接続サービスが開始された。同システムにおいては、地上～車上の間に LCX (Leaky Co-axial: 漏えい同軸ケーブル) 通信システムを利用して、最大で 2(Mbps) 程度の安定した通信環境を実現している[1, 2]。

移動環境からのネットワークアクセスニーズはますます増大する傾向にあり、今よりも高速なアクセス回線が必要である。そこで我々は、コストパフォーマンスを考慮し、地上-車上間の通信に IEEE802.11g を利用したシステム構成 (本システム) を提案している[3]。これまでに本システムにより、270(km/h) で移動中の高速鉄道に対して、平均 16.4(Mbps) の TCP (Transmission Control Protocol) スループットを実現することに成功している[4, 5]。

本システムはセル長が約 500(m) の小型セルラーシステムであるにもかかわらず、移動局の移動速度が 270(km/h) と高速であるため、移動局は約 6.7(秒) おきにレイヤ 2 ハンドオーバー (L2HO) を行わなければならない。L2HO ごとに TCP タイムアウトが発生し、同事象が TCP スループットの時間平均値を著しく低下させていることは既に報告したとおりである[4, 5]。本稿では、L2HO 前後における TCP フローをパケットレベルで解析し、TCP がタイムアウトするまでのメカニズムを明らかにする。

本稿の構成は次の通りである。第 3 節で我々のシステム構成を説明する。第 4 節で解析結果を報告する。最後に第 5 節で本稿を総括する。

2. 関連研究

様々な鉄道向けの移動通信システムが開発されてきた。移動速度が 130(km/h) と比較的低速な在来鉄道では、JR 西日本 (日本) が Wi-Fi を利用したシステムを構築している[6]。同システムでは数 Mbps の通信が可能である。また、ヒースローエクスプレス (英国) では携帯電話や WiMAX などの通信事業者回線を利用した移動通信サービスを提供している。一方、移動速度が 300(km/h) 領域の高速鉄道通信においては、JR 東海 (日本) が LCX を利用して最大 2(Mbps) 程度の通信を実現した他、IEEE 802.11g を利用して 16.4(Mbps) の TCP スループットを得ることに実験的に成功している。また、SNCF (仏) では TGV において衛星通信と Wi-Fi のハイブリッドシステムを構築している[7]。

3. IEEE 802.11g 通信システム

IEEE 802.11g 通信システムは小型セルラー通信システムである。従って通信システムの基本構成は他のセルラーシステムと大きく異なることはない。携帯電話システムの構成と同様に、地上には無線セルを展開し、移動局は地上セルをハンドオーバーしながら移動する。携帯電話システムでは、地上セルを 2 次的に配置する必要があるが、鉄道通信をターゲットとする IEEE 802.11g 通信システムでは、地上セルを鉄道軌道に沿って、1 次的に展開することになる。地上セルの構成概要を図 1 に示す。

視した。このとき MR のログも合わせて取得した。列車が試験区間に入ると、MR において MIPv4 トンネルの構築を確認した後、Web100 による TCP パラメータの測定を開始し、Iperf による TCP フローの送信を開始した。HA、FA、11 組の地上 BR のログについては syslog サーバに自動送信させた。車上 BR のログについては、車上 BR 自体にログをバッファリングさせ、試験終了後に回収した。なお、以下における測定の時刻は、車上 PC で最初の TCP パケット (SYN) を送信した時刻を 0(秒)とした。

4.2 L2HO 直前の TCP フロー解析

車上 PC の LAN インターフェースからの出力ビット数を 0.1 秒おき計測し、おおよそのペイロードサイズを算出するために MSS/Frame_Size を乗じたものが図 3 である。ハンドオーバー特性を論じるため、図 3 では全測定データのうち、時刻 20 秒～45 秒のものを抜粋した。

また、図 4 には、図 3 と同時刻における、Congestion Window size(cwnd)、Slow Start Threshold (sssthresh)、Retransmission Timeout (RTO)、Round Trip Time (RTT)を示す。これらは web100 により取得したものである。なお、地上 PC の TCP より通知された advertised window size については cwnd に比較して十分大きな値であったため省略する。

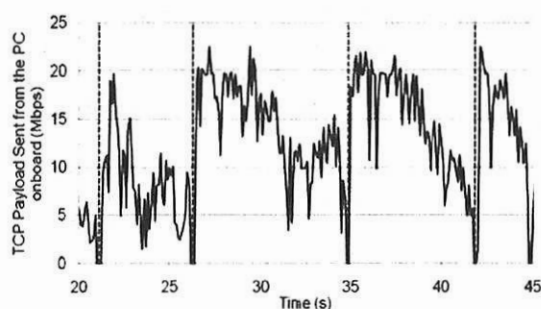


図 3 車上 PC から送信された TCP ペイロード

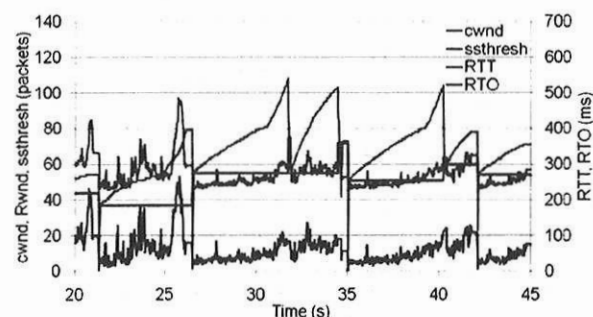


図 4 TCP パラメータ

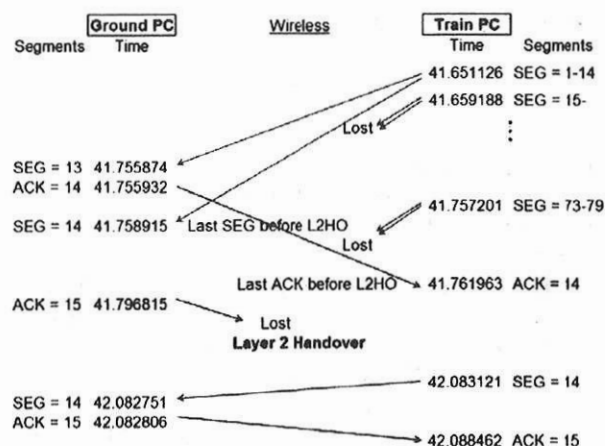


図 5 TCP transmission sequence

図 3 に破線で示したものが L2HO の発生箇所である。図 4 より、全 L2HO 時に cwnd が大きく落ち込んでいることがわかる。これはタイムアウトが発生したために、cwnd を一旦 Maximum Segment Size (MSS) まで低下させ、スロースタートをやり直しているためである。スロースタート開始直後には L2HO が完了しており、電波状態も最良の状態であるため、RTT は 10ms 以下である。このため、50ms(5RTT)程度経過後には cwnd を $2^5 \text{MSS} = 32 \text{MSS}$ まで増加させることができる。これにより、cwnd は短時間で sssthresh 以上となり、輻輳回避モードへと移行する。

L2HO における TCP の動作を詳細に検討するため、wireshark のログより、TCP シーケンスを作成したものが図 5 である。同図は時刻 42 秒付近の TCP シーケンスを示している。図 5 では、図を見やすくするため、シーケンス番号に代わり、セグメント番号を表示するとともに、図中の最初のセグメント番号を 1 とした。また、同図中の時刻については、車上 PC では SYN を送信した時の時刻を 0、地上 PC ではその SYN を受信した時の時刻を 0 とした。これは厳密に言えば正確ではないが、本システムの RTT は 10(ms)以下 (片道遅延はその半分) であり、以下で TCP のシーケンスを論じるには 5(ms)程度の誤差は問題にならないため、このように扱った。

同図より、地上 PC に最後に到達したセグメント番号は 14 であり、セグメント 15 以降はすべて失われていることがわかる。つまり、IEEE 802.11g のリンクが完全に切断される以前から、データパケット (車上 PC→地上 PC) を伝送できない状態が存在していることいえる。一方で ACK パケットは L2HO 直前まで正常に到達出来ていることが確認できる。またデータパケットの片道遅延は 100(ms)以上に対して、ACK パケットの片道遅延は 10(ms)程度である。以上から推論出来ることとしては次の通りである。

L2HO 直前は電波状態が劣悪であるため、無線区間でのパケット再送が発生する。再送回数はパケットサイズに比例する傾向があるため、フレームサイズの小さい ACK パケットよりも、データサイズの大きなシーケンスのパケットの方が再送回数が増え遅延が増大する。さらに、セグメント 15 以降は再送回数が規定値を超えたために、パケットが伝送できなかった。以上より、L2HO 前後の通信環境は 4 つの状態に分類できる。

【状態 A】(SEG14 以前)

電波状態が悪化し、遅延は増大するが、パケットは正常に伝送可能

【状態 B】 (SEG15~L2HO 開始)

電波状態がさらに悪化し、データサイズの大きなパケットは伝送できなくなる。ただし無線リンクは接続されている。この状態は最も望ましくない状態であり、100ms 以上継続する。

【状態 C】 (L2HO 中)

無線リンクが切断され、L2HO を実行する。

【状態 D】 (L2HO 完了後)

L2HO が終了し、無線リンクが回復する。

ACK14 を受信したのちの車上 PC における TCP 動作について考える。TCP はセルフクロッキングにより、ACK 受信をトリガとして、次のシーケンスを送信するように設計されているが、ACK14 受信以降、ACK が到着していない。つまりクロックが得られない状態にあるため、次のシーケンスを送信することができない。このとき、TCP は ACK 受信を待つと同時に、再送タイマーを働かせている。

今回の試験における Retransmission Time Out (RTO) は、Linux-kernel-2.6.32 に実装された TCP CUBIC におけるデフォルトのアルゴリズムである RFC2988[12]に記載のものを使用した。なお、RTO の計算方法は以下のとおりである。

$$\begin{cases} SRTT < \frac{7}{8}SRTT + \frac{1}{8}RTT \\ RTTVAR < \frac{3}{4}RTTVAR + \frac{1}{4}|RTT - SRTT| \\ RTO = SRTT + \text{Max}(200, 4 \cdot RTTVAR) \end{cases} \quad (1)$$

※計算単位はすべてミリ秒。

Web100 の測定結果より、41.757 秒あたりでの RTO は 328(ms)程度であった。実際、TCP は 326(ms)のインターバルの後、車上 PC でロストと判断したシーケンス 14 を再送している。この後は ssthresh を再計算し、cwnd を 1 に落としてスロースタートを行った。

4.3 各セル内における TCP 特性

各地上 BR が構成する無線セル内において、アンテナから遠ざかるに従い、送信レートが低下していることがわかる。これは、RSSI 低下→RTT 増加→単位時間あたりの ACK 着信数 (ACK 着信レート) 減少→送信レート抑制というメカニズムによるものであり、以下に述べる。RSSI が低下すると、無線リンクにおいてパケットロスが増加する。地上 BR 及び車上 BR はドロップしたパケットを再送するため、この再送により RTT が増加する。さらに再送に起因して、地上 BR 及び車上 BR における無線インターフェースの送信バッファに蓄積されたパケットのフォワーディング待ちによる RTT 増加が発生する。また RSSI 低下により、地上 BR 及び車上 BR は変調速度を低下させる。このため物理的な帯域が絞られ、送信バッファの蓄積量が一時的に増加することも RTT 増加の一因である。RTT が次第に増加すれば、ACK の受信間隔は次第に増加するため、ACK 着信レートは低下する。TCP は Self-Clocking によりデータ送信を行うため、ACK 着信レートが低下すれば、データセグメントの送信レートも抑えられる。これが、図 4 で 36 秒付近から 40 秒付近まで cwnd が増加しているにもかかわらず、図 3 で送信レートが低下している理由である。

図 4 の時刻 31.5 秒付近と 40.0 秒付近において、データパケットロスが発生し、ssthresh がリセットされ、輻輳回避モードが再開されていることがわかる。これらのパケットロスは、cwnd が過剰に拡大したことによるものである。この 2 つのケースにおいては、車上 PC は Duplicated Ack を 3 つ (以上) 受信したことにより高速再転送を行った。

ただし、パケットロス後の ssthresh は 60 セグメント程度であるため、送信レートには瞬時低下が確認されるが、TCP パフォーマンスに大きな影響を与えるものではない。

5. まとめ

本稿では、我々が提案している IEEE 802.11g を利用した通信システムにおける L2HO 時に発生する TCP タイムアウトのメカニズムについて解析した。その結果、本システムにおける TCP タイムアウトは、L2HO 以前の IEEE 802.11g リンクが不安定な状態における連続したパケットドロップをトリガとして発生することを明らかとした。TCP タイムアウトを回避するためには、L2HO 以前の IEEE 802.11g リンクがかろうじて構成されている状態におけるパケットドロップを回避する必要がある。このためには、IEEE 802.11g リンクがこのような状態に陥った際には、送信対象となるパケットを別のパスにバイパススティングするなどの方法が必要である。

参考文献

- 1) 杉山寛之：東海道新幹線車内インターネット接続サービスの導入、鉄道と電気技術、vol. 19, No.11, pp.10-14 (2008)
- 2) 古田武志、前野博明、杉山寛之：東海道新幹線列車無線のデータ通信について、CYBERNETICS Quarterly report, vol. 15, No. 2, pp. 13-17 (2010).
- 3) Yamada, K., Sakai, Y., Suzuki, T., Kawahara, Y., Asami, T., Aida, H.: A Communication System with a Fast Handover under a High Speed Mobile Environment, 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall, pp.1-5 (2010).
- 4) Yamada, K., Simizu, K., Kawahara, Y., Asami, T. and Aida, H.: A Seamless TCP Connection over High-Speed Mobile Communication System based on IEEE 802.11g, IPSJ Journal, vol.53, no.1, pp.251-273 (2012).
- 5) Yamada, K.: A High Speed Mobile Communication System implementing Bicast Architecture on the IP Layer, Ph.D. diss., The University of Tokyo, (2012).
- 6) 森崇、本多光一郎、武田善憲：試験沿線 IP ネットワークの技術とアプリケーション、Technical Meeting on Intelligent Transport Systems, IEE Japan, ITS 2007(29-40) pp.55-60 (2007).
- 7) Sanz, D., Pasquet, P., Mercier, P., Villeforceix, B. and Duchange, D.: "TGV Communicant Research Program": from research to industrialisation of onboard broadband Internet services for high-speed trains, WCRR2008 (2008).
- 8) http://www.cisco.com/en/US/docs/switches/lan/catalyst3750/software/release/12.2_40_sc/configuration/guide/swtrafc.html, accessed Sep. 3 2012.
- 9) <http://iperf.sourceforge.net/>, accessed Sep. 3 2012.
- 10) <http://www.wireshark.org/>, accessed Sep. 3 2012.
- 11) <http://www.web100.org/>, accessed Sep. 3 2012.
- 12) V. Paxson et al: Computing TCP's Retransmission Timer, RFC2988, Nov. 2000.