

IEEE 802.11gを利用した高速移動通信における シームレスなTCPコネクション

山田 和弘^{1,2,a)} 清水 和人² 川原 圭博² 浅見 徹² 相田 仁³

受付日 2011年3月28日, 採録日 2011年10月3日

概要:我々はWi-Fi (IEEE 802.11g)を利用した高速移動通信システムを提案している. Yamada ら (2010)では, 提案手法により 270 km/h の高速移動時中に最大 25 Mbps のスループットが得られることを示した. 一方で, 頻繁に発生するレイヤ2ハンドオーバー (L2HO) においてトラフィックフローが不連続となることも指摘した. 本論文では最初に, L2HO 時における TCP パフォーマンスの解析結果を示し, L2HO およびそれに起因する TCP 再送タイムアウトにより, 各 L2HO で長時間の通信中断が発生することを示す. 無通信状態改善のため, Multipath Mobile IPv4 を利用したパス間バイキャストの実装方法を提案する. 移動体と地上ネットワークの間に Multipath Mobile IPv4 による複数のパスを構築し, L2HO 時にはパス間 (IP レイヤ) でトラフィックのバイキャストを行った. 実際の高速移動環境における試験の結果, TCP に再送タイムアウトを発生させない L2HO が実現可能であることを示す.

キーワード: 高速移動通信, IEEE 802.11g, モバイル IP, 高速ハンドオーバー, TCP

A Seamless TCP Connection over High-speed Mobile Communication System Based on IEEE 802.11g

KAZUHIRO YAMADA^{1,2,a)} KAZUTO SHIMIZU² YOSHIHIRO KAWAHARA²
TOHRU ASAMI² HITOSHI AIDA³

Received: March 28, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: We are proposing a high speed communication system using IEEE 802.11g. Yamada et al. (2010) has proven that the proposed system has a bandwidth of 25 Mbps even when a mobile node moves at 270 km/h. It also pointed out discontinuous traffic flows over frequent Layer two handovers (L2HO). This paper shows an analysis of TCP performances over L2HOs. It has revealed TCP does not recover from a freeze until its timeout expires after a L2HO. In order to reduce communication disruptions, this paper proposes a way to implement a Bi-casting solution over paths established by Multipath Mobile IPv4. Multipath Mobile IPv4 is used to make multiple connections between the ground network and mobile entities. Traffic was bi-casted over the paths during L2HOs. A field trial on a high speed train has proven that our proposal achieves L2HOs without TCP retransmission timeouts.

Keywords: high speed mobile communication, IEEE 802.11g, mobile IP, fast handover, TCP

¹ 東海旅客鉄道株式会社技術開発部
Technology Research and Development Department, Central Japan Railway Co., Komaki, Aichi 485-0801, Japan

² 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

³ 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

a) kzy@akg.t.u-tokyo.ac.jp

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. このようななか, 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 2Mbps 程度の安定した通信環境を実現している [2], [3].

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。我々は、コストパフォーマンスを考慮し、可能な限り汎用機器を利用して高いパフォーマンスを得るべく、地上-車上間の通信に Wi-Fi (IEEE802.11g 無線 LAN) を採用したシステム構成 [1] (本システム) を検討している。文献 [1] で報告したとおり、本システムにより、270 km/h で移動中の高速鉄道に対して、UDP スループットで最大 25 Mbps の通信を実現することに成功した。しかし同時に、6~7 秒おき (500 m 移動ごと) に発生する L2HO のたびにスループットが 0 まで低下することも確認した。

ネットワークアクセスにおいては、通常 TCP が利用される。TCP では輻輳制御、再送制御などが動作する。本論文では最初に、本システムで 6~7 秒おきに発生する L2HO における TCP パフォーマンスの解析結果を報告する。特に、L2HO において発生するバースト的なパケットロスが TCP パフォーマンスに与える影響に焦点を当てる。その結果、L2HO 時には必ず TCP 再送タイムアウトが発生するだけでなく、L2HO 自体にも 400 ms 程度を要するケースがあることを確認した。また、通信メディアとして利用した IEEE 802.11g が高速移動に起因して無線リンクを確立できないケースがあることが判明した。このような無線リンク障害は車上無線局と任意の地上無線局との間でランダムに発生した。

本論文では、L2HO 時における TCP パフォーマンスの改善と、無線リンク障害に対する耐性を向上させるため、地上と車上を結ぶ無線リンクを Multipath Mobile IPv4 (MP-MIPv4) [4] により IP レイヤで多重化して 2 本の IP ルート (パス) を構成し、いずれかのパス上の無線リンクで L2HO や無線リンク障害が発生した場合に他方のパスにバイキャストする手段の実装方法を提案するとともに、実環境において行った動作試験結果について報告する。動作試験の結果、L2HO 時においても TCP にタイムアウトを発生させることのないシームレスな TCP セッションを構築することに成功した。なお、本論文において“シームレスな TCP セッション”とは、「パケットロスはともなうが、TCP タイムアウトは発生しない TCP セッション」と定義する。“パス”とは、MIPv4 または MP-MIPv4 により構成される HA~MR 間の MIPv4 トンネル (IP ルート) である。必要に応じて MIPv4 トンネルという用語も使用する。

本論文の構成は次のとおりである。3 章で、我々がこれまでに提案した本システムについて説明する。4 章では、本システムの L2HO 時における TCP パフォーマンスについて解析する。再送タイムアウトなどにより通信性能が低下することを報告し、システム改善のための指針を示

す。5 章では、TCP パフォーマンス低下の改善策として、MP-MIPv4 を利用したパス間バイキャスト方法を提案し、MP-MIPv4 によるプラットフォームについて解説する。6 章では、5 章で提案した MP-MIPv4 プラットフォーム上で動作するパス間バイキャストシステムのアーキテクチャについて述べる。7 章では、提案方式による実験結果について報告し、本方式により、L2HO 時においてもシームレスな TCP セッションが構築可能であることを示す。

2. 関連研究

2.1 高速移動通信システム

これまでも様々な鉄道向けの移動通信システムが開発されてきた。移動速度が最高 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 [5]。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、前述のとおり、JR 東海 (日本) が LCX を利用しているほか、SNCF (仏) が 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 [6]。同システムでは Wi-Fi で 1.5 Mbps 程度の通信を実現している。

2.2 移動通信におけるレイヤ 3 ハンドオーバー (L3HO) の高速化

移動通信における L3HO 高速化の研究は多く存在する。文献 [7], [8] などでは、リンクレイヤの情報をトリガとして L3HO を開始する。Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) [9] では、地上ネットワークを階層化し、モバイルノードの位置管理を局所化して Binding Update の遅延を短縮する。これらの手法は、L2HO 直後の L3HO 動作を想定し、L3HO の高速化を図るものである。

Mobile IPv6 Fast Handovers (FMIPv6) [10] では L3HO と L2HO を分離する。FMIPv6 では Predictive Fast Handover と Reactive Fast Handover が規定されている。Predictive Fast Handover では、リンクレイヤの情報を利用してモバイルノードの移動先となる New Access Router (NAR) を特定し、L2HO が発生する以前に L3HO を行う。L2HO 中は Previous Access Router (PAR) から NAR にパケットを転送する。この手法を適切に実装すれば、L3HO をきわめて高速化できる。

2.3 レイヤ 2 ハンドオーバー (L2HO) におけるパケットロス補償手法

移動通信においては、移動ノードが地上ネットワークのサブネット境界を超える L3HO のほかに、同一サブネット内で接続先の無線機を変更する L2HO も発生する。L2HO

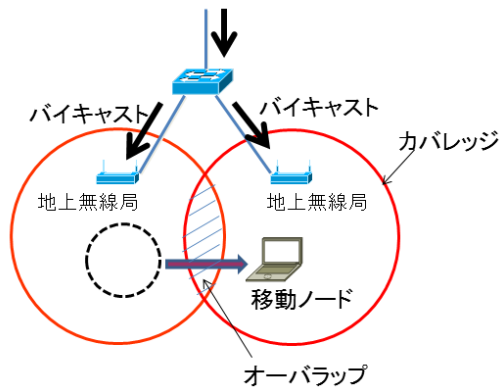


図 1 バイキャストによる L2HO 時のパケットロス補償手法
Fig. 1 Packet loss compensation with bicast during L2HOs.

は IP ルーティングの変更をともしないため、一般に L3HO よりも短時間に完了するが 0 秒とできるわけではない。L2HO 処理中はパケットフォワーディングが停止するためパケットロスが発生する。これを回避する手法の 1 つとして、バイキャスト方式 [11], [12], [13], [14], [15] がある。これまでに提案されている多くのバイキャスト方式の基本的な考え方では、図 1 のように隣接する地上無線局の電波のカバレージをオーバーラップさせたうえで、移動ノードでは、L2HO 時において複数の無線局と無線リンクを構成して、それら複数の無線リンクにトラフィックをバイキャスト (3 つ以上利用すればマルチキャスト) する。これにより、いずれかの無線リンクを通過したパケットを利用して通信を継続し、L2HO 時のパケットロスを防止している。

2.4 L2HO における TCP パフォーマンス

ハンドオーバーにおける TCP パフォーマンスは文献 [16] で報告されている。文献 [16] ではハンドオーバー終了から TCP 再送タイマが完了するまでの時間について、伝送路は回復しているにもかかわらず TCP 自身が送信を中断していることに着目したうえで、無線リンクの回復をトリガとして、TCP に強制的な高速再転送を促す手法を提案している。

3. IEEE 802.11g を利用した通信システム (シングルパス構成)

我々は文献 [1] において、IEEE 802.11g を利用した通信システム (本システム) を提案し、270 km/h で移動中の全長 400 m の高速鉄道に対して、UDP で最大 25 Mbps のスループットが得られることを報告した。本章では本システムの概要を説明する。

3.1 シングルパス構成の無線伝送路

無線伝送路の概要を図 2 に示す。地上 BR(L 系) とは IEEE 802.11g の無線機本体、地上 ANT(L 系) とは地上 BR(L 系) に同軸ケーブルで接続された外部アンテナであ

る。車上 BR(L 系) と車上 ANT(L 系) の関係も同様である。地上 ANT(L 系) および車上 ANT(L 系) には、アンテナ利得 11.5 dBi, 半値角 40° のものを利用した。地上 ANT(L 系) は鉄道線路中心から線路に対して垂直方向に 3.0 m の離隔をもって設置した。地上 ANT(L 系) からは、線路と平行方向に単方向にのみ電波を放射した。すべての地上 ANT(L 系) の電波放射方向は同一とした。車上に設置した車上 ANT(L 系) は地上 ANT(L 系) と対向するように、列車の運転席に設置した。

本システムでは移動中におけるアプリケーションレベルの平均スループットで 10 Mbps 以上の実現を目指している。図 2 の下部は、各地地上 BR(L 系) が構成する無線セルにおいて想定される電波強度である。IEEE 802.11g は適応変調を行うため、電波環境が良好であれば、規格上では最大 54 Mbps の通信速度が期待できる。一方、無線セルのカバレージのエッジ付近では変調速度は低速となる。このように列車の移動にともないスループットは変化する。そこで、カバレージのエッジ付近において、IEEE 802.11g における変調方式 QPSK, 符号化率 3/4 を利用した 18 Mbps の通信を行うことができれば、移動中における平均スループットで 10 Mbps を実現することは可能であると考え、この変調速度が得られるように無線伝送路を設計することとした。本システムで採用した Cisco Air-BR1310G-J-K9 が、変調方式 QPSK, 符号化率 3/4 で 18 Mbps の通信が可能な所要受信機入力 (RSSI (Received Signal Strength Indication)) は -84 (dBm) である [17]。そこで、車上 BR(L 系) の受信電力 (RSSI) が -84 dBm 以上となる地点に次の地上 BR(L 系) を配置することとした。この結果、隣接する 2 組の地上 BR(L 系) の距離はおおよそ 500 m となった。ただし、本システムは実際の高速鉄道沿線に設置したため、地上 BR(L 系) の設置に際しては、本研究とは関係のない設備などによる設置上の物理的制約があった。このため、車上 BR(L 系) の受信電力が -84 dBm を下回る場所の設置も一部で許容した。当該位置における車上 BR(L 系) の受信電力は -87.2 dBm であった。この場合、スループットの低下は避けられないが、このような場所は例外であり平均的には 10 Mbps を実現可能と考えた。

図 2 のシステム構成では、地上・車上間の無線伝送路はただ 1 つ存在する。このため、このシステム構成を“シングルパス構成”と呼ぶこととする。車上 ANT(L 系) は列車の片端に設置したため、列車走行方向により特性が異なる [1]。車上 ANT(L 系) が列車後端部となって移動する (図 2 において右方に走行する) 場合、列車の移動とともに (通信中) に、対向するアンテナ間距離は大きくなる。これを Mode 1 とする。一方、車上 ANT(L 系) が列車前端部となって移動する (図 2 において左方に走行する) 場合、列車の移動とともに (通信中) に、対向するアンテナ間距離は小さくなる。これを Mode 2 とする。

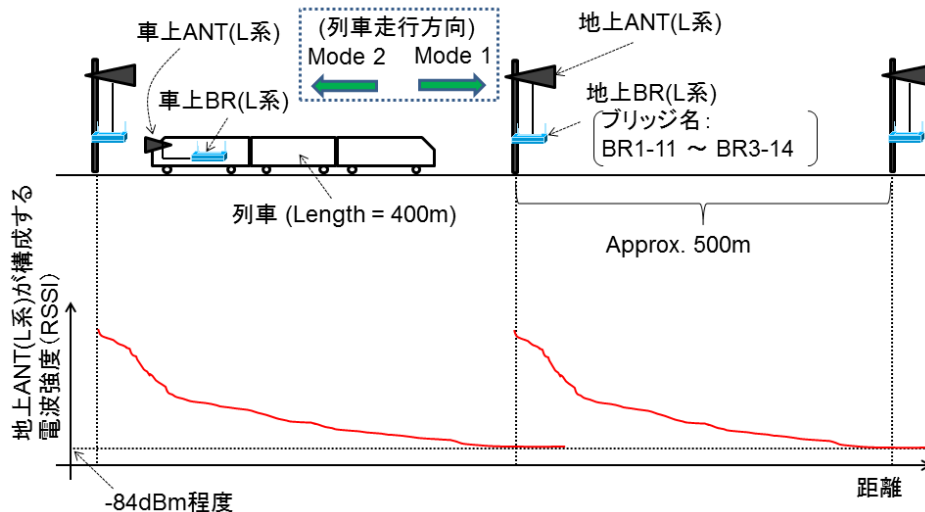


図 2 無線リンク構成 (シングルパス)

Fig. 2 Configurations of wireless links (Single-path).

各デバイスの名称に“(L系)”とあえて付加したのは、5章以降で述べる“デュアルパス構成”における同様のデバイス（それらには(R系)と付記）と区別するためである。

3.2 Mode 1 と Mode 2 における L2HO 特性

本システムで地上 BR(L系)、車上 BR(L系)に採用した Cisco Air-BR1310G-J-K9 には、子局となる車上 BR(L系)で次のいずれかのイベントが発生したときに、別の新しい接続先をスキャンする機能が実装されている [1]。

- (1) 受信 RSSI が設定値（本実験では -80 dBm と設定）を下回ったとき
- (2) 通信中の地上 BR(L系)との間においてパケットドロップと再送が規定値（本実験では 16 回と設定）以上発生したとき

Mode 1 の場合、車上 BR(L系)は地上 BR(L系)から離脱しながら通信する。図 2 における右方への移動である。車上 BR(L系)が通信中の地上 BR(L系)のカバレッジのエッジ付近に到達すると、RSSI は -84 dBm 程度まで低下するため、車上 BR(L系)において、このどちらかの L2HO 開始のトリガとなるイベントが発生する。発生イベント ((1) or (2)) およびイベント発生位置は電波環境に依存するとともに、列車速度、天候などにも影響されるため、試験のたびに異なる。イベント発生時において、車上 BR(L系)が次の (図 2 でいえば、通信中の地上 BR(L系)よりも 1 つ右に隣接した) 地上 BR(L系)が構成する無線セル内に進入していれば L2HO が発生する。一方、車上 BR(L系)がまだ次の地上 BR(L系)が構成する無線セル内に進入していなければ、新しい接続先候補がないため、すぐに L2HO は発生せず、車上 BR(L系)は現状の無線リンクの維持に努める。この場合、車上 BR(L系)は新しい接続先を定期的にスキャンする。車上 BR(L系)が次の地上 BR(L系)のエリアに進入した後のスキャンにおいて、次の地上

BR(L系)を発見したい L2HO が発生する。なお、Mode 1 の L2HO 直後には、新しい地上 BR(L系)と車上 BR(L系)との距離は短いため、電波強度は十分に高くなる。

Mode 2 の場合、車上 BR(L系)は地上 BR(L系)に接近しながら通信する。図 2 における左方への移動である。車上 BR(L系)が地上 BR(L系)に接近するにつれて RSSI は向上するため、この状態においては L2HO のトリガとなるイベントは発生しない。車上 BR(L系)が通信中の地上 BR(L系)の真横を通過すると、車上 BR(L系)が受信する RSSI は急激に低下し、L2HO のトリガとなるいずれかのイベントが発生する。このとき車上 BR(L系)は別の新しい接続先をスキャンするが、次の接続先候補である地上 BR(L系)は 500m 遠方に設置されているため、受信する RSSI は -84 dBm 程度と微弱である。

3.3 シングルパス構成のネットワーク

バックボーンとなる地上のネットワーク構成を図 3 に示す。現在のシステム [2], [3] においては Mobile IPv4 (MIPv4) [18] を利用しているため、相互接続性を考慮して、本システムでも MIPv4 を採用した。Home Agent (HA) と同一のセグメントに Foreign Agent (FA) を 3 組配置し、それぞれの FA の配下に、3~4 組の地上 BR(L系)を設置した。本研究では、L3HO の試験を目的として、このようにネットワークを 3 つの FA で分割した。列車は 1 度の実験において、L2HO を 10 回、L3HO を 2 回行う。これは実験としては必要十分な回数である。

実際には 1 組の FA の配下に収容可能な地上 BR(L系)の台数に明確な制限はなく、適切なサイズのブロードキャストドメインが構成されれば問題ない。また、もう 1 つの制約としては、サブネット内の有線リンクがボトルネックにならないようにすることである。本研究においては列車は 1 編成のみであるが、複数編成が同一 FA 配下に移動し

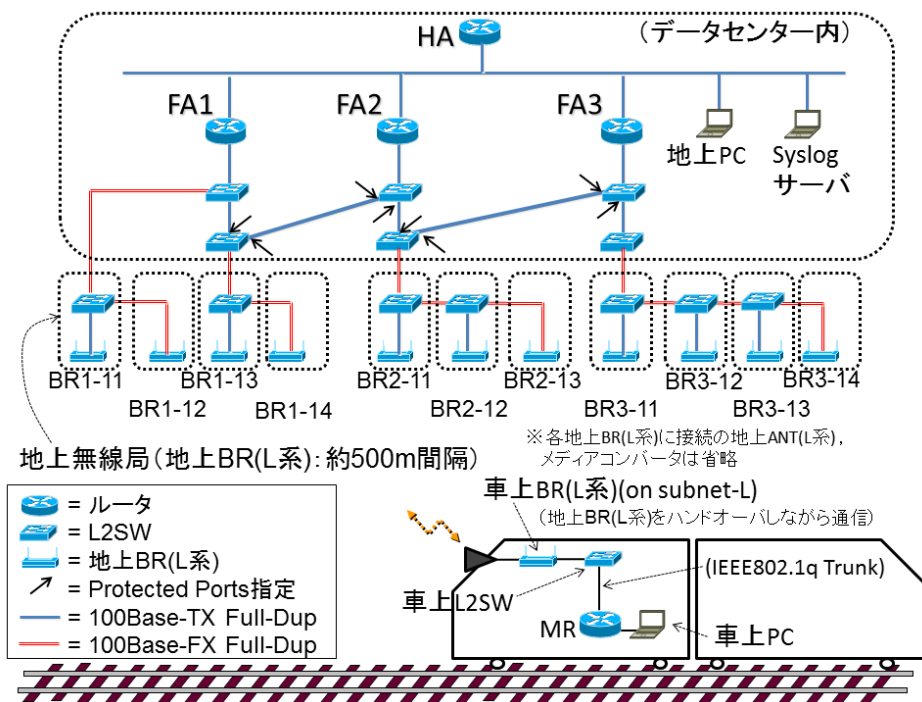


図 3 提案するネットワーク構成 (シングルパス構成)
Fig. 3 Proposed network configuration (Single-path network configuration).

接続された場合においては、サブネット内の有線リンクがボトルネックになる可能性がある。文献 [1] にあるように 1 組の地上 BR(L 系) のスループットを 25 Mbps と見積もった場合、FA 配下の有線リンクが 100 Mbps であれば、アクティブな地上 BR(L 系) は 4 組まで (ここでは簡単な見積りのため、パケットのオーバーヘッドなどは考慮しない) とすべきである。ここで “アクティブ” とは車上 BR(L 系) との無線リンクがアクティブな地上 BR(L 系) であることを意味する。すなわち、1 組の FA 配下の車上 BR(L 系) の同時接続数 (列車数) の期待値を 4 組とすべきである。列車は上下線に存在するため、片線の収容可能列車数は 2 編成となる。隣接する列車の間隔を 10 km とすれば、1 組の FA のカバーエリアの適正值は 20 km となり、収容可能な地上 BR(L 系) は 40 組 (20 km/500 m) となる。なお、以上の計算においては、HA~FA 間、HA より上位のネットワークにボトルネックはないと仮定した。

図 3 のように 1 組の FA 配下に設置した地上 BR(L 系) の数量として 3~4 組というのは少ないが、前述のとおり、L3HO における通信パフォーマンスの検証のためにこのような構成とした。

MIPv4 において Predictive FMIPv6 の思想を応用し L3HO と L2HO を分離するため、物理的に隣接する FA 配下のサブネット間に図 3 に示すようなバイパス接続を行った。バイパスを行うレイヤ 2 スイッチ (L2SW) には Cisco Catalyst2960 を利用して、同 L2SW の矢印を付加した物理ポートに protected ports [19] を設定した。各 L2SW において protected ports どちらのポートはブロックされ、

他ポートと protected ports 間は通常どおりスイッチングされる。これにより、地上のバックボーンネットワークのブロードキャストドメインサイズの拡大を抑えながら、Mobile Router (MR) は物理的に隣接する 2 つの FA から MIP advertisements を受信することが可能となる。たとえば、図 3 において、列車が左方から右方へ走行する場合を考える。車上 BR(L 系) が地上 BR(L 系) の 1 つである BR1-11 とアソシエートすると、MR は FA1 からの MIP advertisements を受信し、FA1 経由で HA との間に MIPv4 によりパス (MIPv4 トンネル) を構成する。列車が右方へ走行し、車上 BR(L 系) が BR1-13 とアソシエートすれば、MR は FA2 からの MIP advertisements を受信する。ここで MR はデータトラヒックを FA1 経由のパスにフォワーディングしつつ、FA2 経由で HA への Mobile IP binding update を行う。Update が完了すれば、MR はデータトラヒックのルートをただちに FA2 経由に変更する。このように、本手法ではデータトラヒックをフォワーディングしながら L3HO を開始・完了させることができる。この L3HO の動作については、すでに文献 [1] において検証されている。この手法による L3HO はルーティングパスとなる FA を切り替える際に若干のパケットロスをとまなうものの、通信に与える影響はきわめて小さい。このため、本論文においては L3HO について議論せず、L2HO にのみ注目する。

図 3 に示す各リンクのうち、青線のリンクには 100 Mbps のイーサネットケーブル (100Base-TX Full-Duplex), 100 m を超える赤線のリンクにはメディアコンバータを利用した光ファイバ接続 (100Base-FX Full-Duplex) を利用した。

このため、ボトルネックとなるのは地上-車上間の通信のみである。

本システムを構成するすべての機器は市販機器であり、次のとおりである。

- HA, FA : Cisco 2811 Integrated Service Router
- MR : Cisco 3250 Mobile Access Router
- L2SW : Cisco Catalyst 2960
- 地上 BR(L系), 車上 BR(L系) : Cisco Air-BR1310G-J-K9
- メディアコンバータ : Buffalo LTR2-TX-WFC20AR, LTR2-TX-WFC20BR

なお, Cisco Air-BR1310G-J-K9 には, 無線リンクで発生したパケットロスを無線機間で再送する機能が実装されている。

MIPv4 のフレーム構成を図 4 に示す。本システムでは移動ノードとして, ホスト (単体の端末) ではなく, ルータ (ルータ配下のサブネットごと移動する) を利用した。このルータは特に “Mobile Router” と呼ばれるものであり, 本論文では MR と記述している。MR を使用する場合には, RFC3344 [18] に従い, HA⇔FA 間, HA⇔MR 間においてトンネルが構成される。つまり HA⇔FA 間は 2 重にカプセル化される。トンネルを構成するためのカプセル化プロトコルとしては IPinIP, GRE (Generic Routing Encapsulation) などの利用が想定されているが, 本システムでは GRE を利用した。

図 3 における地上 PC から車上 PC へ送信される IP パケットについて考える。この IP パケットは, 車上 PC の (RFC3344 でいう) “Home Address” にルーティングされる。Home Address が属する (RFC3344 でいう) “Home Network” は HA で管理されており, 当該 IP パケットは, 物理的には HA に配送される。HA では最初に, 当該 IP パケットに GRE によるカプセル化を行い, HA→MR の IP

ヘッダを付加する。さらに, 再度 GRE でカプセル化し, HA→FA の IP ヘッダを付加する。このとき, FA のアドレスは, MR に (RFC3344 でいう) “Care-of Address” を払い出した FA である。したがって, 図 4 上部に示すように, HA⇔FA 間の IP パケットには, GRE によるカプセル化が 2 重に施されることになる。当該 IP パケットが FA に到達すると, FA では, HA⇔FA 間のトンネルから IP パケットを取り出す。これは, HA→FA の IP ヘッダおよびその直後の GRE ヘッダを取り除くことを意味する。この後, FA は当該パケットを MR にフォワーディングする。このときのフレーム構造を図 4 下部に示す。ただし, 図 4 下部では, 車上 L2SW~MR 間の VLAN タグが含まれていることに注意が必要である。VLAN タグすなわち IEEE 802.1q トランクは, 5 章で提案する MP-MIPv4 の追加実装 (図 9) に必要であるため, ここにおいて事前にネットワーク構成をしておくこととした。

HA⇔MR 間のカプセル化に利用する GRE ヘッダには “GRE key” と呼ばれる ID が付加される。GRE key とは, 5 章で提案する MP-MIPv4 において使用する情報であり, 当該パケットが経由するパスを示す ID である。

4. シングルパス構成における TCP パフォーマンス

本章では, シングルパス構成における TCP パフォーマンスの測定および解析結果を報告する。

4.1 TCP パフォーマンス測定方法

図 3 に示す 2 つの PC の間で, 輻輳ウインドウなどいくつかの TCP パラメータを含む L2HO における TCP パフォーマンスを測定した。送受信の PC の OS には Ubuntu10.04LTS (Kernel 2.6.32 with Web100 [20] patch) を利用した。TCP は Ubuntu にデフォルトで実装される TCP CUBIC を利用した。車上 PC において Iperf [21] により TCP フローを作成し地上 PC に向けて送信するとともに, 車上 PC において Web100 を利用して TCP パラメータを取得した。地上 PC・車上 PC においては Wireshark [22] によりパケットキャプチャした。具体的な測定手順は次のとおりである。

実験区間はおよそ 5 km である。列車は 270 km/h で走行するため, 実験区間を通過するのに要する時間は約 70 秒である。列車が試験区間に進入するまでに, すべての測定準備を終えておく必要がある。列車が試験区間を走行中に, 測定系を操作することは事実上不可能 (70 秒間に, 何らかを変更しその有効化を完了させるのは不可能) であり, 測定は可能な限りシンプルなものとした。

受信側となる地上 PC においては, 列車が試験区間に進入する前までに, Iperf の受信ポートをオープンし, Wireshark によるパケットキャプチャをスタートした。送信側

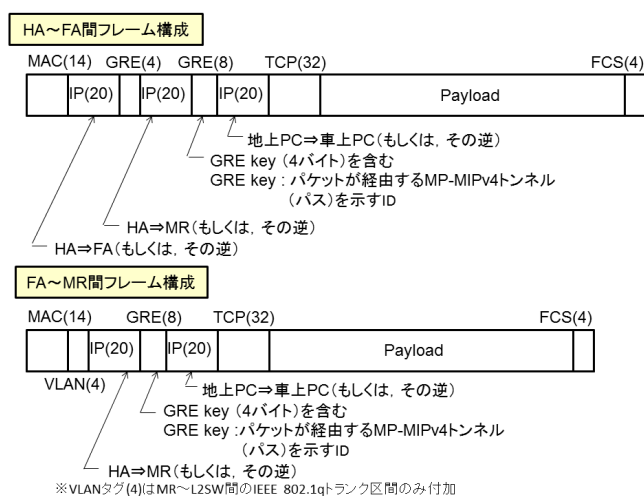


図 4 Mobile IPv4 におけるフレーム構成

Fig. 4 Frame structure of Mobile IPv4.

となる車上 PC では、やはり列車が試験区間に進入するまでに Wireshark によるパケットキャプチャをスタートし、Web100 による TCP パラメータの取得準備と、Iperf による TCP フローの送信準備を終えた。列車が試験区間に近づくと、車上 PC では MR に telnet 接続し、そのログを監視した。このとき MR のログもあわせて取得した。列車が試験区間に進入し、MR においてパス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(L 系) のログについては syslog サーバに自動送信させた。車上 BR(L 系) のログについては、車上 BR(L 系) 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。MIPv4 のフレーム構成は図 4 のとおりであるため、本測定における MSS は 1,396 Bytes, Frame Size は 1,514 Bytes とした。

4.2 列車が各地上アンテナから遠ざかる場合 (Mode 1)

L2HO における TCP パフォーマンスを論じるため、測定データのうち、隣接する地上 BR(L 系) が構成する無線セル (BR2-12 と BR2-13) における結果を抜粋し、車上 BR(L 系) が BR2-12 との無線リンクを構成した時刻を 0 としたものが図 5 である。図 5(a) は、車上 PC の LAN インタフェースからの出力ビット数を 100 ms ごとに計測し、ペイロードの送信レートを算出するために MSS/Frame.Size を乗じたもの (以下では“送信レート”と呼ぶ) である。

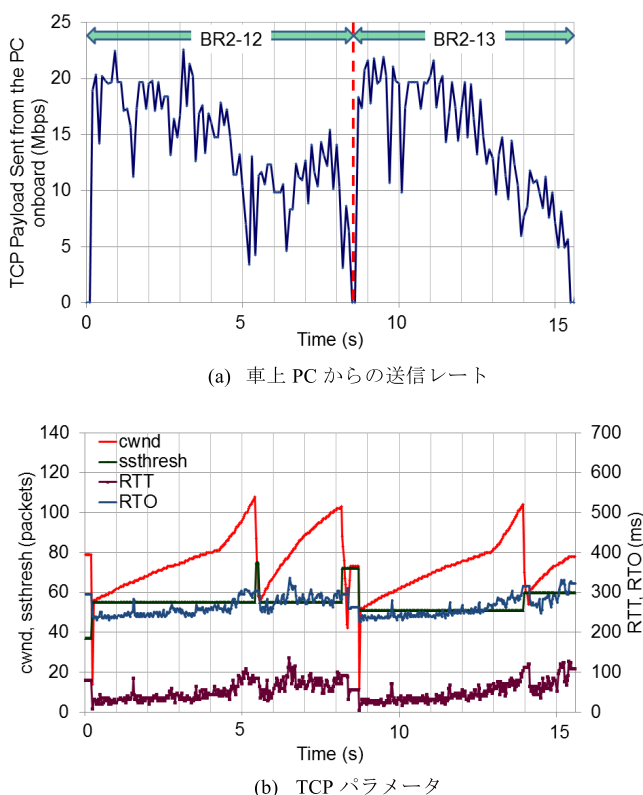


図 5 Mode 1 の L2HO における TCP パフォーマンス
Fig. 5 TCP performance over a L2HO in Mode 1.

図 5(b) には、Congestion Window size (cwnd), Slow Start Threshold (ssthresh), Round Trip Time (RTT), Retransmission Timeout (RTO) 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 は cwnd に比較して十分大きな値であったため省略する。

図 5(a) に破線で示したものが L2HO の発生箇所である。L2HO 時に送信レートおよび cwnd が大きく落ち込んでいることが確認できる。TCP タイムアウトが発生するとともに、cwnd は 1 セグメントまで低下した。TCP タイムアウトは他のすべての L2HO においても確認された。図 6 は図 5 の時刻 8.6 秒に発生した L2HO における TCP 動作と L2HO の時間的關係を示したものである。L2HO 直前に最後の TCP データパケットが送信されてから L2HO が終了するまでの時間を“L2HO 待ち時間”，L2HO 終了から TCP が再送を開始するまでの時間を“再送待ち時間”，L2HO 待ち時間と再送待ち時間の和を“ダウンタイム”と呼ぶこととする。つまり、L2HO 待ち時間は L2HO 自体によるフォワーディング不能の時間である。再送待ち時間は L2HO が終了しているにもかかわらず、TCP がタイムアウト完了まで待機する時間である。図 6 に示すとおり、L2HO が完了しても、TCP はただちに通信を再開できるわけではない。

図 6 に示す L2HO を含め、本走行実験 (走行回数は 1 回) において観測した全 7 回の L2HO の平均値を表 1 に示す。L2HO の回数は本来であれば全 10 回となるはずではあるが、本走行実験では、BR1-11 および BR1-14 において、車上 BR(L 系) との間で無線リンクが構成されない無線リンク障害が発生した。このため L2HO 回数は 7 回となった。これら 7 回の L2HO について検証したところ、L2HO 待ち時間の最大値は 134 ms であった。これは RTO [23] の最低値である 200 ms よりも短いため、TCP がタイムアウトを完了させるまでに L2HO は終了する。したがって、図 6 は Mode 1 における L2HO の典型例といえ、Mode 1 にお

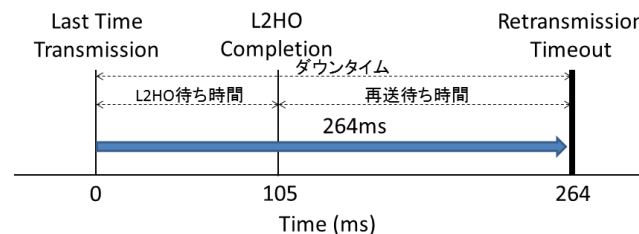


図 6 図 5 の時刻 8.6 秒に発生した L2HO における TCP の動作
Fig. 6 TCP state transition over L2HO at 8.6 sec in Fig. 5.

表 1 Mode 1 の L2HO における平均ダウンタイム

Table 1 Average downtime at L2HO in Mode 1.

	L2HO 待ち時間	再送待ち時間	ダウンタイム
所要時間 (ms)	115	219	334

る L2HO のダウンタイムは RTO に一致することになる。

ここで、車上 BR(L 系) が任意の地上 BR(L 系) と無線リンクを構築し、通信を行った後に L2HO を行い、次の地上 BR(L 系) と無線リンクを構築するまでの時間を“各地上 BR 滞在時間”と呼ぶこととする。つまり各地上 BR 滞在時間は、車上 BR(L 系) と各地上 BR(L 系) の間の通信時間+ダウンタイムで構成される。ダウンタイムが各地上 BR 滞在時間に占める割合について考える。各地上 BR 滞在時間は地上 BR(L 系) の設置間隔と列車速度によるが、ここでは、本システムの標準的な目安として、設置間隔を 500m、列車速度を 270km/h とする。このとき、各地上 BR 滞在時間は 6.7 秒となる。平均ダウンタイムは 334ms であるため、ダウンタイムは各地上 BR 滞在時間の 5.0% に相当する。TCP パフォーマンス改善のためには、このロス時間の削減が必要である。

L2HO に起因するタイムアウト後に TCP はスロースタートにより通信を再開した。L2HO 直後には電波状態が最良であるため RTT は 10ms 以下であった。これにより、50ms (5RTT) 程度経過後には cwnd は $2^5MSS = 32MSS$ まで増加した。したがって、cwnd は短時間で ssthresh 以上となり輻輳回避モードへと移行した。このため、L2HO 後の送信レートは速やかに 20 Mbps 程度まで上昇した。

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分かる。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(L 系) および車上 BR(L 系) はドロップしたパケットを再送するため (Cisco Air-BR1310G-J-K9 の機能: 3.3 節参照)、この再送による RTT 増加や、再送に起因して、地上 BR(L 系) および車上 BR(L 系) における無線インタ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(L 系) および車上 BR(L 系) 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 5(b) で 12 秒から 14 秒まで cwnd が増加しているにもかかわらず、図 5(a) で送信レートが低下している理由である。

図 5 の時刻 5.5 秒付近と 14.0 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分かる。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。

4.3 列車が各地上アンテナに近づく場合 (Mode 2)

Mode 1 と同様に L2HO における TCP パフォーマンスを論じる。測定データのうち、隣接する地上 BR(L 系) が構成する無線セル (BR2-11 と BR1-14) における結果を抜粋したものが図 7 である。車上 BR(L 系) が BR2-11 との無線リンクを構成した時刻を 0 とした。図 7(a) は、車上 PC からの送信レートである。図 7(b) には、cwnd, ssthresh, RTT, RTO を示す。図 7(a) に破線で示したものが L2HO の発生箇所である。表 2 には同 L2HO を含め、Mode 2 で車上 BR(L 系) が任意の隣り合う地上 BR(L 系) 間において行った過去 15 回分の L2HO の各所要時間の平均値を示す。

3.2 節に記載のとおり、Mode 2 では L2HO 直後に車上

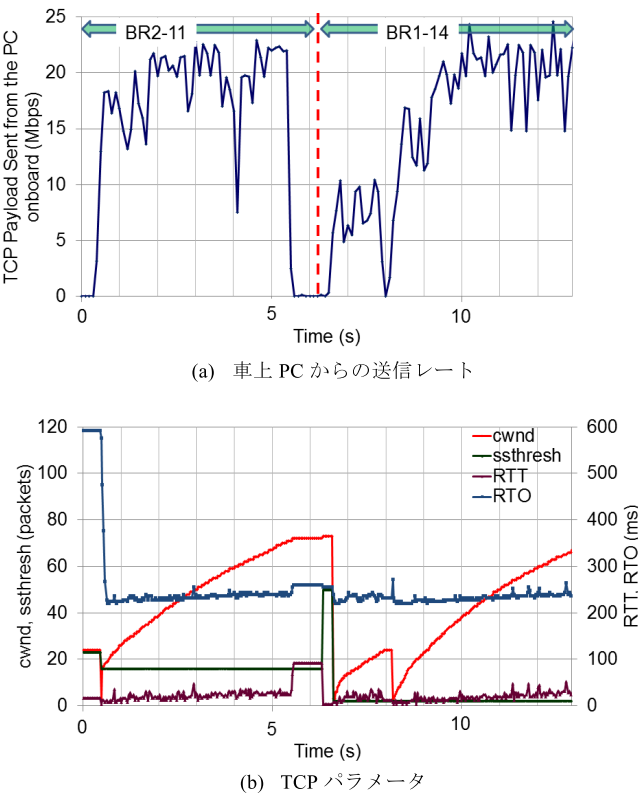


図 7 Mode 2 の L2HO における TCP パフォーマンス
Fig. 7 TCP performance over a L2HO in Mode 2.

表 2 Mode 2 の L2HO における平均ダウンタイム

Table 2 Average downtime at L2HO in Mode 2.

	L2HO 待ち時間	再送待ち時間	ダウンタイム
所要時間 (ms)	400	509	909

BR(L系)が新しい地上BR(L系)から受信するRSSIは -84 dBm 程度と微弱である。このため、IEEE802.11gのリンク確立や、WPAによる認証パケットのロスおよび再送などに長時間を要した結果、Mode 1に比較してL2HOに長時間を要することになったと考えている。

ダウンタイムが各地上BR滞在時間に占める割合について考える。地上BR(L系)の設置間隔と列車速度をMode 1と同様に想定すれば各地上BR滞在時間は6.7秒となる。Mode 2の平均ダウンタイムは909msであったため、ダウンタイムは各地上BR滞在時間の13.6%に相当する。

ダウンタイムのうち400msがL2HO自体に起因するものであり、509msはTCPの再送待ちによるものであった。再送待ち時間を短縮する方法については文献[16]で提案されているが、本システムの場合、再送待ち時間を0とすることができたとしても、400msもの長いL2HO待ち時間が残る。TCPはVoIPのようなタイムセンシティブなアプリケーションを伝送するためのものではないため、TCPのみを考えれば文献[16]の方法は1つの選択肢となる。しかし、UDP上でVoIPを利用しようと考えたとき、400msのL2HO待ち時間はその品質を劣化させる。本システムではTCPのみでなく、すべてのプロトコルを伝送する。したがって、L2HOにおけるTCPパフォーマンス改善方法の検討にあたっては、他のプロトコルへの影響も考慮に入れなければならない。すなわち、L2HOの終了を待つため400msもの間通信を待機することは許容されない。

以上より、Mode 2のL2HOにおけるTCPパフォーマンス改善のためには、UDPなど他のプロトコルへの適用も考慮に入れ、L2HO待ち時間においてもトラヒックフォワーディング可能なシステムの構成が必要である。

4.4 高速移動環境におけるIEEE802.11gリンク

本システムにおいて特記すべきは、地上BR(L系)のリンク障害についてである。もともと固定通信もしくは低速移動中の通信を前提としたIEEE802.11gを高速移動で使用するため、車上BR(L系)と任意の地上BR(L系)において偶発的に無線リンクが構築できない障害が発生することがあった。この事象はまったくランダムに発生した。そのときどきの天候・気温・走行速度(本試験では 270 km/h で一定としたが若干の違いはある)などに起因すると考えている。試験結果の統計から、このような障害事象は5.2%程度の確率で任意の地上BR(L系)で発生することが確認された。むしろ、無線技術の見地から障害率低減の検討は必要であるが、ネットワーク技術からのアプローチとしては、このような無線リンク障害に対する耐久性を持ち、無線リンク障害時でも通信を継続することのできるシステム構築が必要である。

この障害は車上BR(L系)が次の地上BR(L系)のセルに移動すれば回復するため、長時間のL2HOととらえるこ

とができる。このとき本問題は、Mode 2でのL2HO待ち時間における通信継続要求に帰着することができる。つまり、耐障害性の観点からも、L2HO時においてもトラヒックフォワーディング可能な通信システムが求められる。

4.5 シングルパス構成の課題

Modeにかかわらず、すべてのL2HOにおいてTCPタイムアウトが発生することを示した。ダウンタイムが各地上BR滞在時間に占める割合はMode 1で5.0%、Mode 2では13.6%に達することを明らかにした。さらに、5.2%程度の確率で任意の地上BR(L系)でリンク障害が発生することも判明した。これらを考慮して、全体の通信時間に占める通信不能時間の割合(以下、通信不能時間率と呼ぶ)を計算する。Mode 1では、全体の5.2%で無線リンク障害により通信できない。残りの94.8%のうちの5.0%でL2HOに起因して通信不能となる。したがって、Mode 1における通信不能時間率は統計的に 9.9% ($= 0.052 + (1 - 0.052) \times 0.05$)となる。一方、Mode 2も同様に計算すれば、Mode 2における通信不能時間率は 18.1% ($= 0.052 + (1 - 0.052) \times 0.136$)となる。

通信不能の原因は、① L2HOにともなう物理的な伝送路の物理的な瞬時切断(L2HO待ち時間)、② TCPがタイムアウトを完了するまでの送信待機(再送待ち時間)、③ 無線リンク障害、の3つである。②は①に起因するものであり、①を解決すれば②の解決も期待できる。①については、L2HOにともなう物理的な伝送路の物理的な瞬時切断を回避することが不可能である以上、何らかの手法により、L2HOにおいてもトラヒックフォワーディング可能な通信システムを検討する必要がある。③はL2HO待ち時間が長時間になったものであるととらえれば本質的には①と同じ問題である。

以上の課題を解決するため、次の3つの要求条件を満足する通信システムの開発を目指した。

- (1) L2HO時においてもトラヒックフォワーディングが可能であること。これによりTCPのダウンタイムを0とすること。
- (2) 地上BR(L系)の無線リンク障害時においてもトラヒックフォワーディングが可能であること。
- (3) UDPその他のプロトコルにも適用可能であること。

(3)については、本システムではTCP以外のプロトコルも伝送するため、要求事項として追加した。次章以降で、これらの要求を満たす通信システムの構成方法について論じていく。

5. Multipath Mobile IPv4によるデュアルパス構成

前章までの通信システムにおいては、地上・車上間にはただ1本のパス(シングルパス)を構築し、通信を行

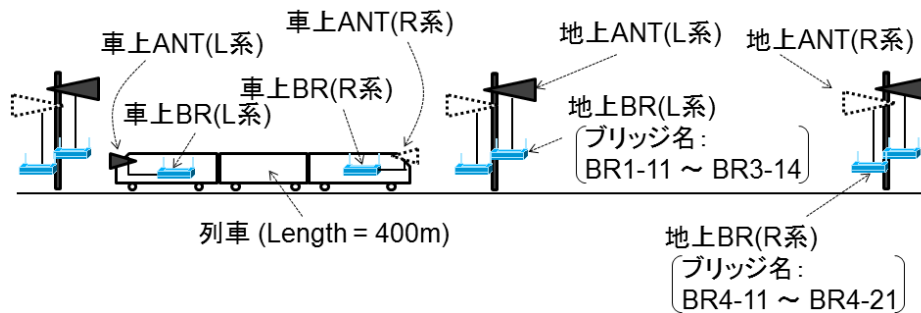


図 8 無線リンク構成 (デュアルパス)

Fig. 8 Configurations of wireless links (Dual-path).

うものであった。その唯一のパスが L2HO により切断されれば、通信できないことは当然である。そこで文献 [11], [12], [13], [14], [15] のようなバイキャストを用いる方法が考えられる。これらの既存手法の基本的考え方は、図 1 のように移動ノードと地上ネットワークの間に 2 本のパスを構成し、それらの上でバイキャストを行うというものである。通常“2 本のパス”とは、移動ノードが利用中のパスに加え、移動ノードが次に接続される地上無線局を経由するパスである。この前提条件としては、隣接する地上無線局どうしの境界で両地上無線局が構成する電波にオーバーラップが存在し、移動ノードと地上ネットワーク間に 2 つの無線リンクが確実に構成されることである。一方、本システムでは、4.4 節で述べたとおり、5.2% の確率で地上 BR(L 系) と車上 BR(L 系) は無線リンクを構成することができず、無線リンク構築の確実性は保証されていない。本システムにて既存手法を利用した場合、車上 BR(L 系) が移動先の地上 BR(L 系) とのリンク構築に失敗すればバイキャストすることはできない。そのうえ、当該地上 BR(L 系) のエリアから進出するまで、ネットワークの接続性が損なわれることになる。

そこで我々は、L2HO 時におけるパケットロス補償と耐障害性向上を同時に実現するため、“地上・車上間の無線リンクの常時 2 重化”を行い、“2 重化された無線リンク相互間でのバイキャスト”の実現方法を提案する。地上・車上間に 2 本の無線リンクを冗長的に構成し、それらを別の IP ルート (パス) として MP-MIPv4 により統合する。片系において L2HO や無線リンク障害が発生した場合には、2 重化したパスの相互間でバイキャストを行うことにより、もう一方で通信を継続可能とするものである。すなわち、MP-MIPv4 プラットフォーム上における IP レイヤでのバイキャストである。

本章では、地上・車上間の無線リンクの 2 重化とパス間バイキャストを行うための MP-MIPv4 プラットフォームについて説明し、6 章では、MP-MIPv4 プラットフォーム上で動作するパス間バイキャストシステムについて述べる。

5.1 デュアルパス構成の無線伝送路

図 2, 図 3 のシステム構成 (シングルパス構成) は、列車の片端部に車上 BR(L 系) を設置して通信を行うものである。4 章においては、車上 BR(L 系) が列車走行方向に対し前端部になる場合 (Mode 2) と後端部になる場合 (Mode 1) における通信特性の違いについて報告した。その結果、通信特性に違いはあるものの、いずれの場合でも最大 20 Mbps 程度のスループットが実現できることを明らかとした。したがって、列車の他方の端部にも同様の車上無線局を設置すれば、列車と地上ネットワークを接続する無線リンクは 2 本となる。これを利用すれば、L2HO 時と無線リンク障害時以外にはそれぞれの無線リンクに別のトラフィックをフォワーディングし、L2HO 時と無線リンク障害時には 2 本の無線リンクにバイキャストするシステムが構成できると考えた。この構成をデュアルパス構成と呼ぶこととする。

システム展開イメージを図 8 に示す。デュアルパス構成においてはシングルパス構成と同一のデバイスを利用した。地上 BR、地上 ANT、車上 BR および車上 ANT それぞれに、“(R 系)” を付加して表し、前章までで述べたシングルパス構成のデバイス (L 系) と区別する。地上 BR(R 系) および地上 ANT(R 系) の設置箇所は、地上 BR(L 系) および地上 ANT(L 系) が設置されている位置と同じ場所とした。地上 ANT(R 系) からの電波放射方向は地上 ANT(L 系) から 180 度の反対方向とした。これと通信する車上のアンテナ (車上 ANT(R 系)) は車上 ANT(L 系) を設置した運転席と反対の運転席とした。IEEE802.11g のチャンネルには、物理的に同一位置に設置した地上 ANT(L 系) および地上 ANT(R 系) からは同じチャンネルを発射した。アンテナの指向性と鉄道車両自体による遮蔽により電波干渉を防止した。地上 (L 系) と地上 BR(R 系) では、それぞれ別の SSID (Service Set Identifier) を利用し、車上 BR(R 系) は必ず地上 BR(R 系) と、車上 BR(L 系) は必ず地上 BR(L 系) と接続されるようにした。

4 章においては、Mode 1 と Mode 2 における通信特性の相違について議論したが、図 8 のような構成をとった場合、車上 BR(L 系)、車上 BR(R 系) のうち、列車走行方向

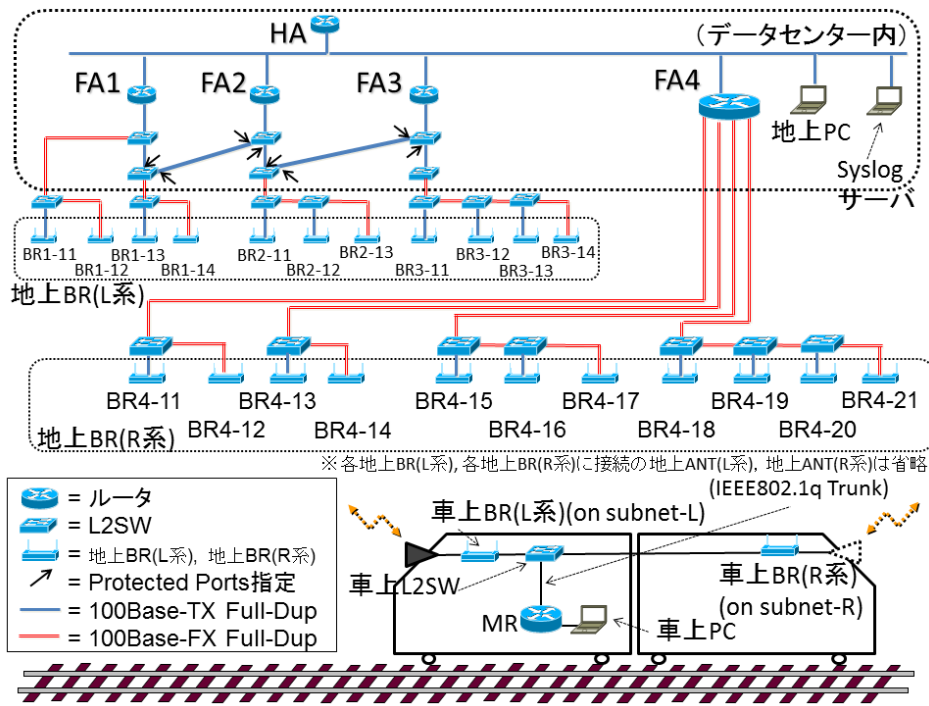


図 9 デュアルパス構成のネットワーク (実験用)
Fig. 9 Dual-path network configuration (Experimental).

に対して先頭位置となった車上 BR は Mode 2, 後端位置となった車上 BR は Mode 1 で動作することになる。

5.2 MP-MIPv4 を利用したデュアルパス構成のネットワーク

デュアルパス構成のネットワークを図 9 に示す。本システムでは、3.3 節に記載のとおり、MIPv4 をベースにシステム構成することが求められている。そこで、デュアルパス構成のプラットフォームには、MIPv4 の拡張として HA~MR 間にアクティブなパスを複数構成することが可能な MP-MIPv4 を採用した。

図 9 における HA, MR, FA1~FA3 はシングルパス構成で利用したものである。シングルパス構成 (図 3) に対し FA4 を追加し、FA1~FA3 のパスと FA4 のパスを別のパスとすることによりデュアルパスを構成した。新しく追加したパスには、FA を 1 組 (FA4) だけ設置した。これは、FA1~FA3 を利用して、すでに L3HO の検証を終えたため [1], 新しいパス上で L3HO の実験を行う必要はないことと、3.3 節で述べたとおり、1 組の FA 配下の地上 BR は 40 組程度が実用上最適であるものの (11 組というのは最適ではないものの), 1 組の FA 配下の地上 BR の数量としてはまったく問題なく収容可能なためである。

車上のネットワークについては、車上 BR(R 系) と車上 BR(L 系) はそれぞれ別のサブネットに収容した。図 9 のように車上 L2SW を挿入して、MR~車上 L2SW の間は IEEE 802.1q トランクで接続し、車上 BR(R 系) および車上 BR(L 系) は MR における同一物理インタフェース上で

別の VLAN に収容した。これにより、MR は L 系と R 系を別のネットワークと識別し、HA との間に別の (2 つ) のパス (MIPv4 トンネル) を構成することができる。

以下では、FA1, FA2 または FA3 および地上 BR(L 系), 車上 BR(L 系) を経由するパスを L 系パス, FA4, 地上 BR(R 系), 車上 BR(R 系) を経由するパスを R 系パスと呼ぶ。L 系パスと R 系パスのうち、車上 BR が列車走行方向に対して先頭位置となったパスは Mode 2, 後端位置となったパスは Mode 1 で動作する。

“地上 BR(R 系) および地上 ANT(R 系) の設置箇所は、地上 BR(L 系) および地上 ANT(L 系) が設置されている位置と同じ場所とした”と前述したが、同一場所に設置したホストの対応は、BR1-11 と BR4-11, BR1-12 と BR4-12 のように図 9 に記載の順である。

図 9 に示す各リンクのうち、青線のリンクには 100 Mbps のイーサネットケーブル (100Base-TX Full-Duplex), 100m を超える赤線のリンクにはメディアコンバータを利用した光ファイバ接続 (100Base-FX Full-Duplex) を利用した。このため、ボトルネックとなるのは地上-車上間の通信のみである。

本章の目的 (デュアルパス構成の実験システムの説明) からは外れるが、3.3 節における検討内容をふまえて、デュアルパス構成による最適構成を検討すれば図 10 のとおりとなる。地上 BR を 40 組収容する FA を必要数量だけ、図 3 の要領で protected ports [19] を活用して L2SW でバイパス接続する。必要数量とはカバーすべき距離で決まる。1 組の FA, すなわち 40 組の地上 BR がカバーできる

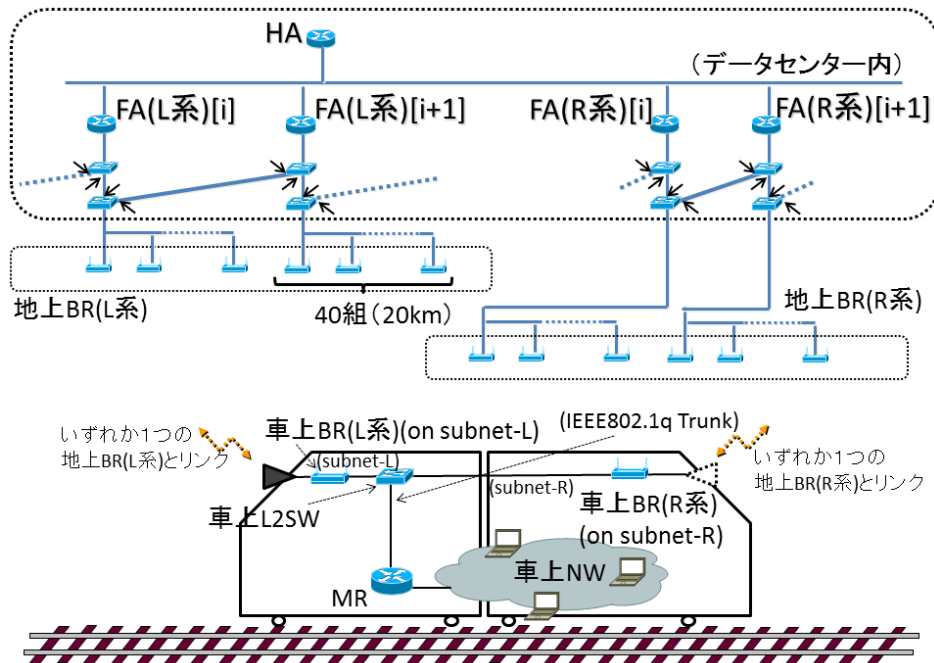


図 10 デュアルパス構成のネットワーク (最適化)
Fig. 10 Dual-path network configuration (Optimized).

のは 20 km である。デュアルパスを構成するため、これを 2 セット (L 系と R 系) 構成し、図 8 および図 9 の要領で L 系と R 系を展開する。

5.3 デュアルパス構成における TCP フローの分散送信方法

デュアルパス上で TCP を送信する場合におけるパケット送信制御方法については、2 通りに大別することができる。

(1) per-packet Load-Balancing (PPLB)

TCP のセッションをまったく考慮することなく、パケットごとにパスを選択する。パケットが HA または MR の送信バッファから出力される順序により、奇数番目のパケットは L 系パス、偶数番目のパケットは R 系パス、もしくはその逆となるように送信制御する。

一般的に無線通信においては、伝送遅延は時々刻々と変動する。これは、図 5、図 7 から明らかである。PPLB においては、2 つのパスの伝送遅延の相違により、パケットの送信順序と受信順序の逆転が発生する。TCP はこのような状態をパケットロスと判断し、再送制御を行うとともに、輻輳ウィンドウを縮小させるため、十分なスループットを得ることができない可能性が高い。

(2) Session-base Load-Balancing (SBLB)

同一 TCP セッションのパケットは同一パスを通過するように制御する。SBLB では TCP セッションごとにパスが固定されるため、フローが通過中のパスで L2HO が発生した場合、シングルパス構成における

L2HO と同事象が発生する。また、TCP セッションに基づく負荷分散のため TCP 以外のプロトコルに適用できない。

PPLB で予想される、パケット受信順序逆転による輻輳ウィンドウ縮小の問題は TCP の基本動作に関わる課題である。一方、SBLB における L2HO の課題については、L2HO 中に TCP フローを他方のパスへバイキャストすることにより解決できると考えた。そこで本システムでは、SBLB をベースとして設計し、L2HO における TCP ダウンタイムを 0 とするシステムの開発を目標とした。

本システムにおいては純粋な SBLB ではなく、宛先 IP アドレスに基づく負荷分散 (IPLB) を採用した。TCP のみを考えれば、セッションごとにパスを選定する方法が適切と考えられるが、4.5 節に記載のとおり、本システムでは、TCP だけでなく UDP など他のプロトコルにも適用できるものとした。TCP セッションに基づく負荷分散ではこれを実現することはできない。宛先 IP アドレスに基づく負荷分散ならば、同一 TCP セッションのパケットは同一パスを通過するうえ、他のプロトコルの負荷分散にも適用が可能である。したがって、本システムでは TCP セッションに基づく負荷分散に代えて、宛先 IP アドレスに基づく負荷分散を行うこととした。

各フローの通過パスの決定は HA および MR で独立に行った。“独立”とは、同一 TCP セッションのフローでも HA→MR 方向のフローと、MR→HA 方向のフローでは、同じパスを通ることもあれば、異なるパスを経由することもあるという意味である。同じ方向のフロー (たとえば HA→MR 方向) の通過パスの決定は、HA へのフローの到

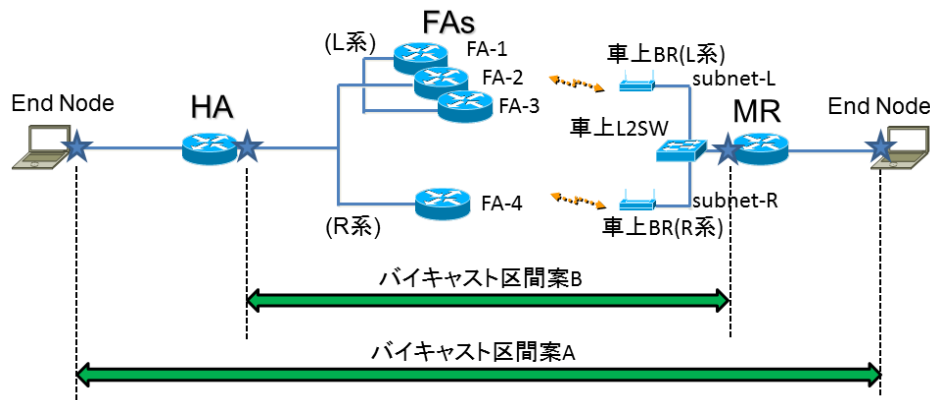


図 11 2つのバイキャスト案
Fig. 11 Two options for Bi-casting.

着順に宛先 IP アドレスに基づくラウンドロビンによる等価負荷分散を行った。このような負荷分散方法をとったのは、将来的に 2 本のパスで主従関係を構成し一方をメインとして利用するのではなく、両方のパスで同量のトラフィックをフォワーディングし、通信帯域を最大限活用することを目指しているためである。

6. Multipath Mobile IPv4 を利用したパス間バイキャストシステム

本章では、5 章で提案した MP-MIPv4 プラットフォーム上で動作するパス間バイキャストシステム、すなわち、パス相互間でのバイキャストアーキテクチャについて述べる。L 系パスまたは R 系パスのいずれかにおいて L2HO や無線リンク障害が発生した場合に、MP-MIPv4 により 2 重化したパスの相互間で IP レイヤにおいてバイキャストを行うものである。また、具体的な L2HO 予測方法およびその予測に基づくバイキャスト制御について説明する。

6.1 MP-MIPv4 を利用したパス間バイキャストシステムの設計

デュアルパス構成を単純化して表せば図 11 のようになる。HA～MR 間には MIPv4 トンネルが構成されるため、バイキャストを行うためには、MIPv4 トンネルの外部または内部で実施することになる。MIPv4 トンネル外部で行うものを案 A、内部で行うものを案 B と呼ぶこととする。

案 A において、L 系パスおよび R 系パスに確実にバイキャストするためには、以下の 2 つが必要となる。

- (1) IPLB を行う HA および MR に、オリジナルパケットとコピーパケットを別のパスにフォワーディングさせるため、コピーパケットの宛先 IP アドレスをオリジナルパケットの宛先 IP アドレスと異なるものとして HA (または MR) に配送する必要がある。もちろんこのとき、コピーパケットの宛先 IP アドレスにより所望のエンドポイントにパケットを送付可能であること

を保証しなければならない。

- (2) HA および MR は宛先 IP アドレスに基づくラウンドロビン方式により、当該パケットをフォワーディングするパスを決定する。(1) による処理で、オリジナルパケットとコピーパケットの宛先 IP アドレスが異なっていたとしても、ラウンドロビンにより偶然同じパスにフォワーディングされてしまっは意味がない。そこで、HA および MR でオリジナルパケットとコピーパケットを判別し、別のパスにフォワーディングする必要がある。

(1) を実現するためには、オリジナルパケットとコピーパケットの宛先 IP アドレスを変える必要がある。この場合、マルチホーミングとして End Node に実装するのが最も容易である。しかし、本システムでは End Node は一般ユーザの PC を想定しており実装は困難である。別の方法として、End Node～HA 間、MR～End Node 間に 1 組ずつプロキシサーバを挿入し、オリジナルのフローからコピーフローを生成し、プロキシサーバ間で適切に IP アドレスを管理したうえでフローコントロールすることなどが考えられる。

(2) を実現するためには、コピーセッションであることを HA および MR に通知し、それに基づいて HA や MR を動作させる必要がある。しかし、そもそも MP-MIPv4 を採用したのは、将来的に、本システムと LCX や携帯電話などの他の通信メディアとの結合を目指しているためであった。HA および MR はこれらのシステムとの結合のためにも利用する。そのような機器に本システムのためだけの特殊な実装を施せば、将来にわたり、HA 自体および MR 自体に特殊実装が必要になり、より高機能な汎用の HA や MR が開発された際に、最新の汎用機器への交換の足かせとなる可能性がある。以上の検討結果から、案 A は除外することとした。

案 B について検討する。案 B における物理的なバイキャスト位置についても、案 A と同様に 2 通り考えられる。第

1 案は、HA および MR に実装することである。End Node が送信したオリジナルパケットをカプセル化したうえで、パスにパケットを送出するのは HA および MR である。バイキャストが必要なときには、HA および MR において、どちらか一方のパスにフォワーディングするのではなく、両方のパスにフォワーディングするように実装すればよい。しかし、案 A (2) の検討と同様に、HA や MR に特殊仕様を追加することは避けたいため、本案は不採用とした。第 2 案としては、HA～FA 間、車上 L2SW～MR 間にバイキャストを行う別装置を挿入することである。この案では、本機能をハードウェア的にコンポーネント化することで、汎用機器とは独立して機器交換や機能改修でき、最も適切であると考えた。

HA～FA 間に挿入するバイキャストを行う装置で、同装置を通過するパケットを確認すれば、そのフレームフォーマットは図 4 上部に示すものとなる。また、車上 L2SW～MR 間に挿入するバイキャストを行う装置でパケットを確認すれば、そのフレームフォーマットは図 4 下部に示すものとなる。このため、たとえば GRE key を確認すれば、当該パケットの経由パスは明らかとなる。したがって、両方のパスに確実にバイキャストするためには、オリジナルパケットをコピーしたうえで、表 3 および表 4 の情報（各ヘッダのフィールド）を修正してパケットを送信すれば、

表 3 パス間バイキャストにおいて修正すべきヘッダフィールド (HA→MR)

Table 3 Header fields to be modified for bicasting over paths (HA to MR).

修正フィールド	オリジナル値	修正値
宛先 MAC アドレス ※1	FA1, FA2 または FA3 の MAC アドレス	FA4 の MAC アドレス
	FA4 の MAC アドレス	FA1, FA2 または FA3 の MAC アドレス
最外方の IP ヘッダの 宛先 IP アドレス	FA1, FA2 または FA3 の IP アドレス	FA4 の IP アドレス
	FA4 の IP アドレス	FA1, FA2 または FA3 の IP アドレス
GRE key	L 系 ID	R 系 ID
	R 系 ID	L 系 ID

※1 本実験では HA と各 FA を同一セグメントに収容した。HA から各 FA へ到達するためのネクストホップが同一デバイスであれば (HA～FA 間に別のルータがあれば)、この実装は不要。

表 4 パス間バイキャストにおいて修正すべきヘッダフィールド (MR→HA)

Table 4 Header fields to be modified for bicasting over paths (MR to HA).

修正フィールド	オリジナル値	修正値
宛先 MAC アドレス	FA1, FA2 または FA3 の MAC アドレス	FA4 の MAC アドレス
	FA4 の MAC アドレス	FA1, FA2 または FA3 の MAC アドレス
VLAN ID ※1	Subnet-L の VLAN ID	Subnet-R の VLAN ID
	Subnet-R の VLAN ID	Subnet-L の VLAN ID
GRE key	L 系 ID	R 系 ID
	R 系 ID	L 系 ID

※1 MR において物理的に 2 つのインターフェースを用意して、それぞれに車上 BR(L 系)と車上 BR(R 系)を接続すれば、IEEE 802.1q を利用しないためこの実装は不要

当該コピーパケットはオリジナルパケットの経由パスとは別のパスを経由することになる。表 3 は HA→MR 方向へのトラヒックを HA～各 FA 間でバイキャストする際に修正すべきフィールドである。表 4 は MR→HA 方向へのトラヒックを車上 L2SW～MR 間でバイキャストする際に修正すべきフィールドである。

FA4 の MAC アドレス（または IP アドレス）を、FA1, FA2 または FA3 の MAC アドレス（または IP アドレス）に修正して送信する場合には、FA1, FA2 または FA3 のうちのアクティブな (MIPv4 トンネル上にある) FA の MAC アドレス（または IP アドレス）を使用しなければならない。なぜなら、MR は FA1～FA3 を L3HO しながら移動するため、適切な FA にバイキャストパケットをフォワーディングする必要があるからである。この方法については 6.2.1 項 (4) で説明する。

以上により、案 B を採用することとした。バイキャストを行う装置を含めたネットワーク構成は図 12 のとおりとした。以降では、地上側でバイキャストを行う装置を地上デュプリケータ、車上側でバイキャストを行う装置を車上デュプリケータと呼ぶ。

地上（および車上）デュプリケータでは、バイキャストの開始および停止を制御しなければならない。本提案手法では、車上デュプリケータにおいてこの制御を行うこととした。車上デュプリケータは L2HO を予測すると、自身においてバイキャストを開始するとともに、地上デュプリケータにバイキャスト開始命令を通知する。これにより、地上デュプリケータでもバイキャストを開始する。逆に、車上デュプリケータは L2HO の終了を検知すると、自身のバイキャストを停止するとともに、バイキャスト停止命令を地上デュプリケータに通知する。これにより、地上デュプリケータでもバイキャストを停止する。なお、L2HO の予測方法については 6.3 節で詳述する。

6.2 デュプリケータの動作

本節では、車上デュプリケータおよび地上デュプリケータの動作について説明する。

6.2.1 車上デュプリケータ

車上デュプリケータの OS には Ubuntu10.04 LTS Linux kernel-2.6.32-24 を採用し、3 つの LAN インタフェース (I/F) と、1 つの仮想 I/F を用意した。各 I/F の役割は次のとおりである。

eth0：MR 側 I/F。IP アドレスなし。

eth1：BR 側 I/F。IP アドレスなし。

eth2：モバイルネットワーク内 I/F。同 LAN における IP アドレスを保持し、SNMP (Simple Network Management Protocol) パケットの入出力を行う。地上デュプリケータへのバイキャスト開始（および停止）命令パケットを送出する。

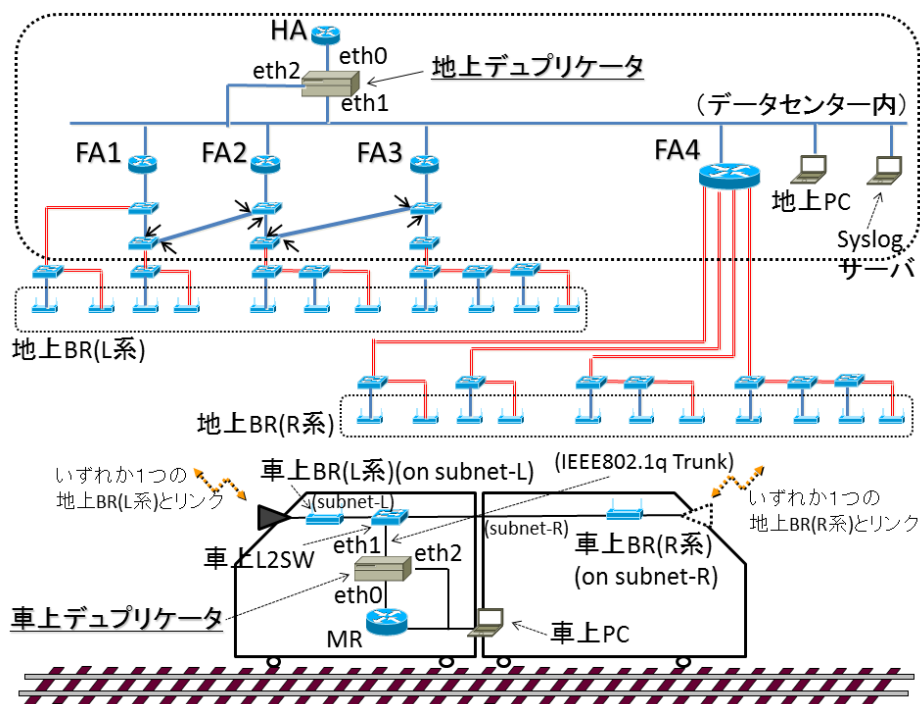


図 12 地上デュプリケータと車上デュプリケータ

Fig. 12 Packet duplicators.

br0: eth0 と eth1 をブリッジ接続するための仮想 I/F. IP アドレスなし.

車上デュプリケータに求められる機能は以下の 4 点である.

- (1) 2つの LAN セグメントのブリッジング
 - (2) L2HO 開始予測, L2HO 終了検知
 - (3) 地上デュプリケータへのバイキャスト開始 (および停止) 命令パケット送出
 - (4) L2HO 予測時におけるバイキャスト
- これらの機能について順に説明する.

- (1) 2つの LAN セグメントのブリッジング

eth0 と eth1 はブリッジング機能により全パケットを通過させた. eth0 においては Linux PACKET ソケットをオープンし, 同 I/F に入力される GRE パケットをキャプチャした. GRE パケットに限定したのは, コピー対象の候補となるパケットが MIPv4 により GRE でカプセル化されていることによる. eth0 でキャプチャされるパケットには, FA1, FA2 または FA3 を経由する L 系パスと FA4 を経由する R 系パスにフォワーディングされたパケットが混在する. アプリケーションでは MR により 2つのルートそれぞれにルーティングされた最新のパケットヘッダを 1 つずつキャッシュした. バイキャストを行う際には (本節 (4) で説明), ここでキャッシュした最新のヘッダ情報を利用して, コピーパケットのヘッダを作成した.

- (2) L2HO 開始予測, L2HO 終了検知

車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) として採用した Cisco Air-BR1310G-J-K9 は, リアルタイムな受信 RSSI

を MIB テーブルに保持する. この MIB テーブルを SNMP get-request により 125 ms おきに参照した. Cisco Air-BR1310G-J-K9 を管理する SNMP マネージャは車上デュプリケータ上に実装した. なお, 無線リンクが構成されていない Cisco Air-BR1310G-J-K9 に当該 SNMP get-request を行うと無効値 (要求データなし) が返される. 車上デュプリケータでは受信した get-response 内の RSSI に基づき L2HO 予測・終了検知を行った. RSSI に基づく具体的な L2HO 予測・終了検知方法については 6.3 節で詳述する.

- (3) 地上デュプリケータへのバイキャスト開始 (および停止) 命令パケット送出

地上デュプリケータは車上デュプリケータからのバイキャスト開始 (または停止) 命令を受信することで動作する仕様とした. この理由については 6.3.1 項で説明する. このため, 車上デュプリケータでは, 地上デュプリケータへのバイキャスト開始 (または停止) 命令を送信する必要がある. この命令は速達性が要求されるため UDP を利用した. バイキャスト開始 (または停止) 命令について新たに UDP ペイロードフォーマットを定義し, 地上デュプリケータに送信する仕様とした.

L2HO 開始予測によるバイキャスト開始命令パケットは, L2HO により無線リンクがダウンする可能性が高い状態で伝達するため, パケットドロップする恐れがある. L2HO により同パケットを喪失させないために, アプリケーションの内部処理時間とパケットの伝達遅延の時間差を利用した. バイキャスト開始命令パケットは車上デュプリケータの eth2 から送出されたのち, MR を経由して車上デュプリ

ケータの eth0 に到着する。ここまで、パケットの伝達遅延が発生する。一方で、車上デュプリケータは内部処理のみによりバイキャストを開始できるため、上記パケットが到達するまでにはバイキャストは開始される。このため、バイキャスト開始命令パケットが MR により L2HO ルートにルーティングされてしまっているにもかかわらず、車上デュプリケータは他方のルートにバイキャストするため、同パケットは地上デュプリケータに無事到達することができる。逆に、地上デュプリケータへの命令パケットがバイキャスト停止を促すものであった場合には、当該パケットが車上デュプリケータの eth0 に到着するまでに車上デュプリケータはバイキャストを停止しているため、無駄なバイキャストが行われることはない。

(4) L2HO 予測時におけるバイキャスト

L2HO が予測された場合にはバイキャストを開始する。バイキャストを行う際には、eth0 から入力された GRE パケットのヘッダ情報を更新し eth1 に出力した。このとき修正すべきヘッダフィールドは表 4 に示したものである。これらの情報は、本節 (1) に記載のとおり、すでにキャッシュされているヘッダ情報から得ることができる。たとえば、R 系パスを経由するパケットを L 系パスにバイキャストする場合には、直前にキャッシュされた L 系パスを経由するパケットのヘッダ情報から、宛先 MAC アドレス、VLAN ID、GRE key を取得してオリジナルパケットのヘッダフィールドを書き換えた。ここで、“直前”にキャッシュされたパケットのヘッダ情報を利用したのは L3HO に対応するためである。MR の移動とともにコピーパケットを送信すべき MIPv4 トンネル上にある FA は変化する（本実験に限定すれば R 系パスでは L3HO しないため、FA4 は常時固定である）。MIPv4 トンネル上にある適切な FA を特定するためには、MR が直前にカプセル化したパケットを見ればよい。このため MR が送信した最新のパケットのヘッダを利用してコピーパケットを作成した。

バイキャスト対象とするパケットは TCP だけでなく、GRE でカプセル化されたすべてのプロトコルとした。本論文では TCP のみについて議論を進めるが、UDP など他のプロトコルにおいても本デュプリケータは動作する。

本システムでは、L2HO を予測したパスに流れるトラヒックのみをバイキャストの対象とした。例として、L 系パスにおいて L2HO が予測された場合には、L 系パスにフォワーディングされるパケットを R 系パスにバイキャストするが、R 系パスにフォワーディングされていたパケットを L 系パスにはバイキャストはしない。

6.2.2 地上デュプリケータ

車上デュプリケータと同様に、地上デュプリケータの OS には Ubuntu10.04 LTS Linux kernel-2.6.32-24 を採用し、3 つの LAN I/F と、1 つの仮想 I/F を用意した。各 I/F の役割は次のとおりである。

eth0：HA 側 I/F。IP アドレスなし。

eth1：FA 側 I/F。IP アドレスなし。

eth2：地上ネットワーク内 I/F。同 LAN における IP アドレスを取得し、車上デュプリケータからのバイキャスト開始（および停止）命令パケットを受信する。

br0：eth0 と eth1 をブリッジ接続するための仮想 I/F。IP アドレスなし。

地上デュプリケータに求められる機能は以下の 3 点である。

- (1) 2 つの LAN セグメントのブリッジング
- (2) 車上デュプリケータからのバイキャスト開始（および停止）命令パケット受信とそれに基づくバイキャスト開始（および停止）制御
- (3) バイキャスト開始命令パケット受信時におけるバイキャスト

eth0 と eth1 はブリッジング機能により全パケットを通過させた。バイキャスト開始（および停止）制御は、車上デュプリケータから通知される命令パケットに基づき行った。バイキャスト方法は車上デュプリケータと同様である。なお、バイキャスト時に修正したヘッダフィールドは表 3 に示したものである。

6.3 L2HO 予測方法とその精度

バイキャストの開始・終了を制御するため、2 つのパスのそれぞれの L2HO をその発生前に事前に予測するとともに、L2HO の終了を検知しなければならない。ここでは L2HO の発生を事前に予測することが重要である。L2HO が開始された直後に TCP は送信を停止するため、L2HO を検知した後にコピー開始をしても、対象トラヒックはすでに存在せず、TCP はタイムアウトを待たなければならない。したがって、L2HO 発生前までにバイキャストを開始する必要がある。本システムでは、L2HO の開始・終了を車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) が受信する RSSI に基づき予測した。

6.3.1 車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) における RSSI 測定

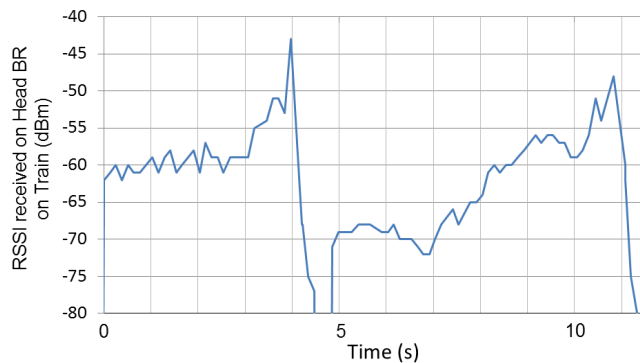
測定対象の候補となる無線機は、アクティブな地上 BR(L 系) および地上 BR(R 系) もしくは車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) である。地上 BR(L 系) および地上 BR(R 系) にて RSSI を測定しようとするれば、列車の移動にともなって、SNMP get-request の送信先を制御しなければならずシステム構成が複雑になる。一方、車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) であれば、検査対象を常時固定することができる。したがって、本システムでは車上に設置した車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) が受信する RSSI を SNMP get-request により測定することとした。

6.3.2 L2HO 判定方法と判定精度

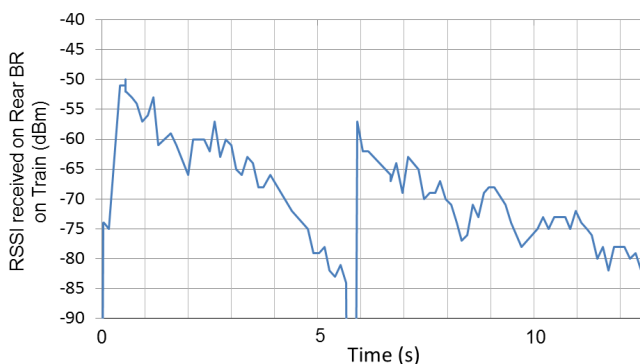
車上デュプリケータから SNMP get-request を 125 ms お

きに送信し、車上 BR(L 系) および車上 BR(R 系) が受信する RSSI を取得した。受信 RSSI の典型例を図 13 に示す。図 13(a) は車上 BR(L 系) または車上 BR(R 系) が列車前端部に設置されたとき (Mode 2 で動作したとき) に受信した RSSI である。以下においては、列車の走行方向により、その前端部になった車上 BR(L 系) または車上 BR(R 系) を前部 BR と呼ぶ。前部 BR は Mode 2 で動作する。各無線セル内において、前部 BR (Mode 2) では L2HO 直前で極大値を持つことが分かる。地上 ANT, 車上 ANT にはともに半値角 40 度の指向性アンテナを利用した。地上 ANT は線路中心から線路に対して垂直方向に 3.0 m の距離を持って設置し、電波は線路と平行方向に発射した。このため、通信中の地上 ANT と車上 ANT の線路平行方向の距離が近づきすぎると、アンテナゲインが大きく落ち込むため極大値を持つことになる。これより、前部 BR における急激な RSSI 低下を検知した場合に L2HO 開始を予測することとした。車上 (地上) デュプリケータはこの予測に従いバイキャストを開始する。また、直前の RSSI 値と比較して、RSSI 値が上昇した場合に L2HO 終了と判断することとした。車上 (地上) デュプリケータはこの判断によりバイキャストを停止する。この結果、前部 BR (Mode 2) による L2HO を 88.2% の精度で予測することができた。

図 13(b) は、車上 BR(L 系) または車上 BR(R 系) が列車後端部に設置されたとき (Mode 1 で動作したとき) に受



(a) 列車前端部のとき (Mode 2)



(b) 列車後端部のとき (Mode 1)

図 13 車上 BR で受信した RSSI の典型例

Fig. 13 Typical RSSI received by train bridges.

信した RSSI である。以下においては、列車の走行方向により、その後端部になった車上 BR(L 系) または車上 BR(R 系) を後部 BR と呼ぶ。後部 BR は Mode 1 で動作する。図 13(a) で見られたような地上アンテナ直近 (Mode 1 の場合は L2HO 直後に相当) の極大値は必ずしも見られるわけではなく、L2HO 後に無線アンテナ間距離の増加にともない、RSSI が単調減少するケースも存在した。ある地上 BR とリンク中の後部 BR が、隣接する地上 BR のセルに移動したとしても、ただちに L2HO するわけではなく、しばらくはリンク中の地上 BR との通信を継続する。この間に、RSSI が極大化する地点以上に、後部 BR が次に接続する地上 BR から離れた場合には、極大値を持つことはない。極大値の有無に関係なく、地上 BR が構成するセル境界に列車が近づくと受信 RSSI は小さくなる。このため、受信 RSSI に L2HO 判定閾値を設け、L2HO 判定閾値以下になった場合に L2HO 開始を予測することとした。車上 (地上) デュプリケータはこの予測に従いバイキャストを開始する。一方、RSSI が L2HO 判定閾値以上に回復した場合に L2HO 終了と判断することとした。車上 (地上) デュプリケータはこの判断によりバイキャストを停止する。

L2HO 判定閾値を選定するため L2HO 直前の RSSI について検討する。車上 BR(L 系) または車上 BR(R 系) にかかわらず、それらが Mode 1 で動作する後部 BR となったとき、後部 BR が各地上 BR (L 系または R 系は対応する車上 BR による) との間で行う L2HO 直前の RSSI を過去 105 回の任意の L2HO について取得した。ある L2HO 判定閾値を与えたとき、L2HO 直前の RSSI がそれ以下になる確率を図 14 に示す。すなわち、図 14 は L2HO 判定閾値を与えたときの L2HO 予測精度にはかならない。

L2HO 判定閾値の設定は False Negative (L2HO 中にもかかわらずバイキャストしない) の割合と、False Positive (L2HO 中以外でバイキャストする) の割合に十分注意しなければならない。L2HO 判定閾値の設定は任意性が高く、L2HO 判定閾値を大きく設定すると L2HO の予測精度は上がる。たとえば、L2HO 判定閾値を -70 dBm に設定すれば L2HO の予測精度を 90% 程度、 -68 dBm 以上に設定

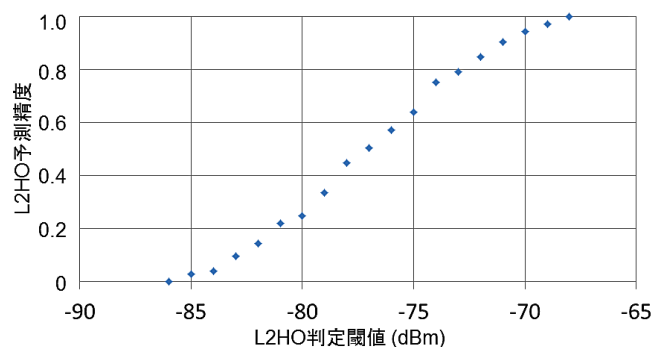


図 14 L2HO 判定閾値と L2HO 予測精度

Fig. 14 L2HO threshold and L2HO prediction rate.

すれば 100%まで向上させることも可能である。このような場合、False Negative の割合が低下することで、L2HO における TCP タイムアウトの発生頻度が減少し通信不能時間率を低下（改善）させる効果が見込まれる。ただしこれは一方で False Positive の割合を増加させる。すなわち、RSSI が高い段階でバイキャストを開始し、その動作を長時間持続させる。これはバイキャストしなくてもユニキャストで正常に通信可能な時間においてもバイキャストすることを意味する。当然、不要なバイキャストにより通信帯域は無駄に消費される。逆に L2HO 判定閾値を小さく設定すると L2HO の予測精度は下がる。この場合、False Negative の割合が増加することで、L2HO において TCP タイムアウトの発生頻度が増加し、通信不能時間率を上昇（悪化）させ、通信時間中の平均スループット（以下、平均スループットという）を低下させる要因となる。一方で、False Positive の割合は低下してバイキャストを行う時間は減少する。このため、2 本のパスに別のトラヒックをフォワーディングする時間は長くなる。これは平均スループットの向上要因となる。このように、通信不能時間率の低減とバイキャストを行う時間の短縮は両立させることができず、相互にトレードオフの関係にある。これらについて適切な値を決定できる指標は平均スループットであると考えられる。平均スループットを最大化させることができる L2HO 判定閾値が最適値であり、そのときの通信不能時間率とバイキャストを行う時間が全体システムを最適化させる値ということになる。

平均スループットを最大化するために L2HO 判定閾値についての検討は必要であるが、本実験は本提案手法（MP-MIPv4 のパス間バイキャスト）による最初の実験であり、本提案手法の基礎評価（7.1 節参照）を行うことに焦点を当てたため、L2HO 判定閾値についての最適化検討は実施せず、7.2 節で述べる暫定的な L2HO 判定閾値（-77 dBm）を用いて実験を行った。

7. Multipath Mobile IPv4 を利用したパス間バイキャストシステムにおける TCP パフォーマンス

本実験は本提案手法（MP-MIPv4 を利用したパス間バイキャスト）による最初の実験であるため、まずは本提案手法の基礎評価を行わなければならない。本章では、基礎評価のための通信実験結果について報告する。

7.1 基礎評価項目

本提案を行う発端となったのは、シングルパス構成における L2HO および無線リンク障害に起因する通信不能時間率の高さである。この解決のため、4.5 節において 3 つの要求条件を設定しシステム開発を行った。したがって、本実験における基礎評価とは、本提案手法がこれら 3 つの要

求条件を満足し、その結果、通信不能時間率の低減がなされたことを示すことにある。

7.2 測定方法と暫定的な L2HO 判定閾値

本測定では、車上 BR(R 系) が前部 BR (Mode 2)、車上 BR(L 系) が後部 BR (Mode 1) として動作する方向に列車を走行させた。図 8 における右方への走行である。走行速度は 270 km/h で一定に保った。

図 12 に示す車上 PC において Iperf により TCP フローを作成し、地上 PC に向けて送信した。車上 PC においては Web100 を利用して TCP パラメータを取得した。地上 PC・車上 PC においては、Wireshark によりパケットキャプチャした。具体的な測定方法は 4.1 節に記載したシングルパス構成における TCP パフォーマンス測定と同じである。測定項目の追加として、本章の測定においては、地上（車上）デュプリケータにおけるバイキャスト性能を確認するため、地上（車上）デュプリケータそれぞれの eth1 を通過するパケットを Wireshark によりキャプチャした。

本提案手法において設定すべき主要なパラメータは、Mode 1 で動作する後部 BR における L2HO を判定するための L2HO 判定閾値である（6.3.2 項参照）。本実験におけるこの設定値について検討する。L2HO 判定閾値を高く設定し L2HO 予測精度を上げるということは、バイキャストする時間率を上げることになる。この場合、通信不能時間率は下がることになるが、むやみにバイキャストを行うことで通信不能時間率を下げていても意味はない。一方、L2HO 判定閾値を低く設定し L2HO 予測精度を下げれば、本提案手法の効果の確認ができない。そこで、まずは本提案手法の基礎評価を行い、その効果を見極めるため、ひとまず予測精度が 50.8% となる -77 dBm を暫定的な L2HO 判定閾値として設定した。なお、Mode 2 で動作する前部 BR における L2HO 予測精度についてはパラメータによる調整の余地はなく、その判定精度は 88.2% である（6.3.2 項参照）。

7.3 本測定における特徴的発生事象

測定データの議論に入る前に、本測定において偶然発生した事象について述べる。本節の内容は本測定が特異的なものであったことを示すものではなく、ランダムに発生する無線リンク障害など、偶然性に基づく発生内容をまとめておく。

列車走行方向は図 8 における右方であった。後部 BR (Mode 1) では無線リンク障害は発生しなかった。一方、前部 BR (Mode 2) では BR4-20 において無線リンク障害が発生した。測定開始タイミングの遅れにより、試験用の TCP フローは、前部 BR が BR4-15 とリンク中、後部 BR が BR1-13 とリンク中に開始された。換言すると、全長 400 m の列車が BR1-14 および BR4-14（同位置に設置

の地上 BR) の真横を通過中に TCP の送信を開始した。また、バイキャストの効果が失われるのは、前部 BR が最後の地上 BR(R 系)である BR4-21 を通過し、前部 BR の無線リンクが切断されたときであった。このとき、後部 BR は BR3-12 との間に無線リンクを構成していた。

本測定における L2HO および無線リンク障害の予測結果は次のとおりであった。前部 BR では、BR4-15, BR4-16, BR4-17, BR4-18, BR4-19 を移動する際に 4 回の L2HO が発生した。このうち 6.3.2 項に述べた方法により 3 回の L2HO 予測に成功した。同じく前部 BR で発生した BR4-20 との無線リンク障害の事前予測に成功した。一方、後部 BR では、BR1-13, BR1-14, BR2-11, BR2-12, BR2-13, BR3-11, BR3-12 を移動する際に 6 回の L2HO が発生した。このうち 6.3.2 項に述べた方法により 2 回の L2HO 予測に成功した。TCP の送信開始から前部 BR を経由する伝送路がダウンするまでの時間は 41.4 秒であった。

各方向のデータトラフィック (車上 → 地上, および, 地上 → 車上) のフォワーディングルートは、MR および HA が独立に、宛先 IP アドレスによるラウンドロビン方式により決定している (5.3 節参照)。本試験時には、データトラフィック (車上 → 地上) は後部 BR (Mode 1) のルートで、ACK トラフィック (地上 → 車上) は前部 BR (Mode 2) のルートでフォワーディングされた。

7.4 RSSI 測定と L2HO 予測

L2HO 時および無線リンク障害時における TCP パフォーマンスを論じるため、測定データのうち、L2HO 予測の成功例と失敗例および無線リンク障害例を含むデータを抜粋した。前部 BR が BR4-17 との無線リンクを構成した時刻を 0 として以下を論じる。

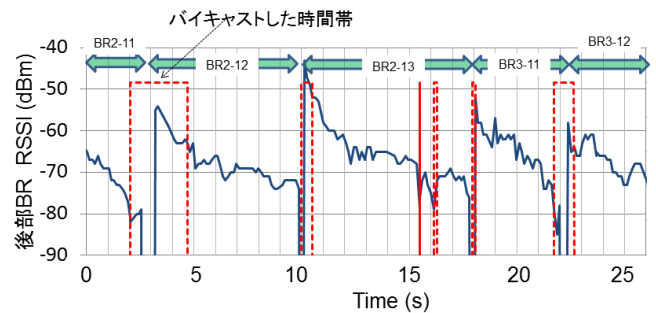
図 15 は後部 BR (Mode 1) および前部 BR (Mode 2) で受信した RSSI である。測定は 6.2.1 項に記載の方法により実施した。図 15(a) は Mode 1 で動作する後部 BR, 図 15(b) は Mode 2 で動作する前部 BR のものである。点線で囲んだ部分は各 BR により、その RSSI 値をもとに L2HO を予測しバイキャストを行った時間である。

(a) 後部 BR (Mode 1: 車上 BR(L 系) が動作)

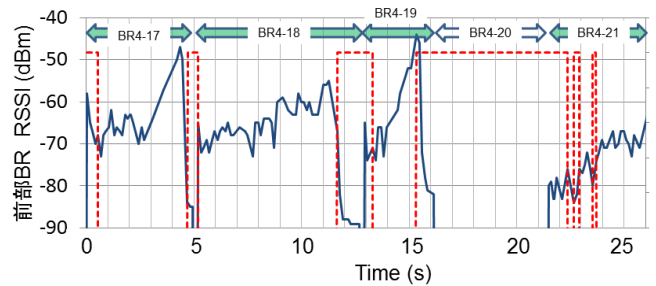
L2HO は時刻 2.6 秒, 9.9 秒, 17.8 秒, 22.0 秒の 4 回発生した。時刻 2.6 秒と 22.0 秒の L2HO では、イベント直前に L2HO の予測に成功しバイキャストを開始した。一方で、時刻 9.9 秒と 17.8 秒の L2HO においては、無線リンクが切断される直前の RSSI 測定値が -77 dBm (判定閾値) 以下に落ちなかったため、L2HO 予測に失敗した。時刻 15.5 秒と 16.1 秒には RSSI が瞬時的に -77 dBm を下回ったために L2HO を予測した。

(b) 前部 BR (Mode 2: 車上 BR(R 系) が動作)

L2HO は時刻 5.0 秒と 12.7 秒に発生した。16.2 秒~21.3 秒の間では、前部 BR と地上 BR (BR4-20) との間の無線



(a) 後部 BR (Mode 1: 車上 BR(L 系) が動作)



(b) 前部 BR (Mode 2: 車上 BR(R 系) が動作)

図 15 受信 RSSI と L2HO 予測

Fig. 15 Received RSSI and L2HO prediction.

リンク障害が発生し、一時的に通信不能状態に陥った。以上 3 ケースにおいて、イベント開始直前に L2HO を予測しバイキャストを開始した。時刻 22.9 秒と 23.6 秒には RSSI が瞬時的に -77 dBm を下回ったために L2HO を予測した。

7.5 TCP セッションのシームレス性

本試験時におけるトラフィックのフォワーディングパスは、7.3 節に記載のとおり、データトラフィック (車上 → 地上) は後部 BR (Mode 1) のルート、ACK トラフィック (地上 → 車上) は前部 BR (Mode 2) のルートであった。このため、後部 BR の L2HO 予測後に車上デュプリケータはデータトラフィックを前部 BR にバイキャストした。前部 BR の L2HO 予測後に地上デュプリケータは ACK トラフィックを後部 BR にバイキャストした。

図 16(a) は車上 PC (送信側) および車上デュプリケータから送信したデータトラフィックのペイロードを 100 ms ごとに測定したビットレート (以下、送信レート) である。図 15(a) において RSSI の測定値が得られていない時間は、L2HO により無線リンクが構成されていないことによる後部 BR におけるフォワーディング不能の時間帯であり、図 16(a) では、この部分に網掛けをして示す。また図 15(a) で点線で囲まれているバイキャストした時間帯においては、車上デュプリケータからフォワーディングされる送信レートにはバイキャスト分が含まれるため、車上 PC からの送信レートの 2 倍になる (図 16(a))。

図 16(b) は地上 PC (受信側) および地上デュプリケータ

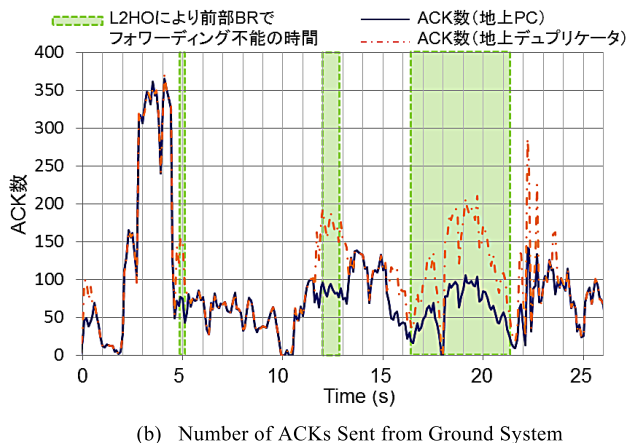
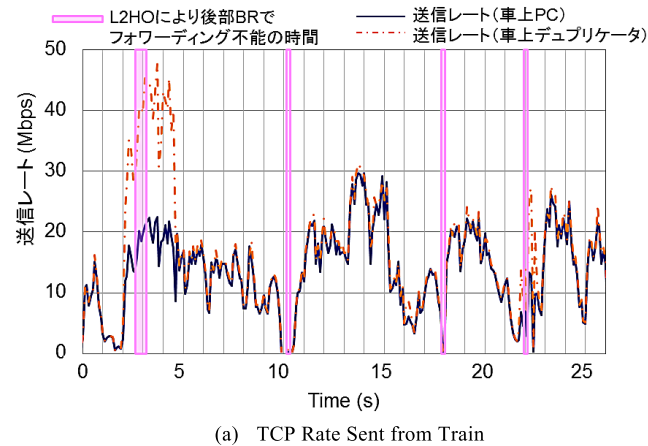


図 16 SBLB システムにおける TCP パフォーマンス
Fig. 16 TCP performance of SBLB system.

タから送信した ACK 数を 100 ms ごとに積算したもの（以下、ACK 数）である。図 15(b) において RSSI の測定値が得られていない時間は、L2HO または無線リンク障害により無線リンクが構成されていないことによる前部 BR におけるフォワーディング不能の時間帯であり、図 16(a) では、この部分に網掛けをして示す。また図 15(b) で点線で囲まれているバイキャストした時間帯においては、地上デュプリケータからフォワーディングされる ACK 数にはバイキャスト分が含まれるため、地上 PC からの ACK 数の 2 倍になる（図 16(b)）。

以下において、各イベント発生時の動作について検証する。

(1) L2HO 予測成功時

Mode 1 で動作する後部 BR の L2HO 予測に成功したケースは時刻 2.6 秒と 22.0 秒の 2 回である（図 15(a)）。これらの L2HO 直前に、車上デュプリケータは、元々、後部 BR を経由するデータトラヒックについて、前部 BR・後部 BR の両ルートへのバイキャストを開始した（図 16(a)）。時刻 22.0 秒の L2HO 直前には、後部 BR のトラヒックを前部 BR にバイキャストしたものの、前部 BR の RSSI は -80 dBm 程度と低く（図 15(b)）、送信レートは 10 Mbps

以下となった（図 16(a)）。

Mode 2 で動作する前部 BR の L2HO 予測に成功したケースは時刻 5.0 秒と 12.7 秒の 2 回である（図 15(b)）。これらの L2HO 直前に、地上デュプリケータは、元々、前部 BR を経由する ACK トラヒックについて、前部 BR・後部 BR の両ルートへのバイキャストを開始した（図 16(b)）。これら 2 回のケース（時間帯）において、送信レートは 15~20 Mbps で安定している（図 16(a)）。

以上より、4.5 節で示した要求条件 (1)「L2HO 時においてもトラヒックフォワーディングが可能であること。これにより TCP のダウンタイムを 0 とすること」が本提案手法により達成されたことが分かる。

(2) L2HO 予測失敗時

後部 BR (Mode 1) の L2HO 予測に失敗したケースは時刻 9.9 秒と 17.8 秒の 2 回の L2HO である（図 15(a)）。L2HO 開始直前の RSSI 測定値が -77 dBm (判定閾値) を下回らなかったための予測失敗である。さて L2HO 開始後に測定される RSSI は、無線リンクが構成されていないために無効値になる（6.2.1 項参照）。これに基づけば、L2HO 予測には失敗するものの、L2HO（もしくは無線リンク障害）開始後の検知は可能である。TCP による 1 度目のタイムアウト後の再送までにバイキャストを開始することができれば、タイムアウト後のパケットは健全なルートを経由して対向の TCP に到達する。実際、時刻 17.8 秒の L2HO において、車上デュプリケータは TCP がタイムアウトを完了するまでにバイキャストを開始した。このため、TCP の 1 度目の再送パケットは前部 BR にもバイキャストされた。

(3) 無線リンク障害時

前部 BR (Mode 2) では時刻 16.2 秒~21.3 秒の間で地上 BR (BR4-20) との無線リンク障害が発生した（図 15(b)）。本システムにおける無線リンク障害は、アクティブな無線リンクが突然ダウンするのではなく、L2HO 失敗により、ある 1 つの地上 BR と車上 BR の間で無線リンクが構築されないというものである。このため、無線リンク障害が発生する前には、通常の L2HO と同様に、前部 BR では RSSI の急激低下が見られたり、後部 BR では RSSI の低下が発生したりする。したがって、無線リンク障害は L2HO とまったく同じアルゴリズムで予測が可能である。実際、当該無線リンク障害の直前には、RSSI の急激な低下が発生した。車上デュプリケータでは 15.2 秒にこれを検知してバイキャストを開始するとともに、地上デュプリケータにもバイキャスト開始を命令した。HA により前部 BR ルートにフォワーディングされたオリジナルの ACK パケットは、無線リンク障害の間、地上デュプリケータにより後部 BR ルートにもバイキャストされた。この様子は、当該時刻の間、地上デュプリケータからフォワーディングされた ACK 数が地上 PC のそれの 2 倍になっていることから確

認できる (図 16 (b)). 無線リンク障害回復後には RSSI が再び L2HO 判定閾値 (-77 dBm) を上回ったため, これを検知してバイキャストを停止した (図 16 (b)).

以上より, 4.5 節で示した要求条件 (2) 「地上 BR (L 系) の無線リンク障害時においてもトラフィックフォワーディングが可能であること」が本提案手法により解決できたことが分かる.

7.6 通信不能時間率

6.3.2 項のとおり, 通信不能時間率は Mode 1 で動作する後部 BR における L2HO 判定閾値に依存する. 本実験では L2HO 判定閾値を -77 dBm としたため, この L2HO 判定閾値における通信不能時間率について論じる. 通信不能時間が発生したのは, 7.5 節 (2) に述べた L2HO 予測に失敗したときのみであり, 本測定全体を通して L2HO 予測に失敗したケースは, 前部 BR (Mode 2) では 1 回, 後部 BR (Mode 1) では 4 回であった. 前部 BR で予測に失敗した 1 度のケースにおけるダウタイムは 804 ms であった. 後部 BR で予測失敗した 4 回のケースにおけるダウタイムの平均は 313.8 ms であった. 以上 5 回の L2HO におけるダウタイムを合計すると $2,060\text{ ms}$ となった. この時間が, 本測定における L2HO 予測失敗による通信不能時間である. 7.3 節で述べたとおり, TCP の送信開始から前部 BR を経由する伝送路が消滅するまでの時間は 41.4 秒 であるため, 通信不能時間率は 4.97% となる.

7.7 基礎評価結果

4.5 節で示した要求条件について検証する. 4.5 節の要求条件 (1) については, 7.5 節 (1) 「L2HO 予測成功時」の結果より, 要求条件 (2) については, 7.5 節 (3) 「無線リンク障害時」の結果より, それぞれ満たされたことが分かる. 要求条件 (3) について, 本提案手法の試験としては TCP を利用したが, SBLB に代えて IPLB で制御を行う (5.3 節) など, TCP に依存した制御を行っていない. したがって UDP その他のプロトコルにおいても本提案手法は有効である.

シングルパス構成における通信不能時間率は, Mode 1 で 9.9% , Mode 2 で 18.1% であった (4.5 節). 一方, 本提案手法における通信不能時間は 4.97% であり, その低減 (改善) を行うことができた. 以上のとおり, 本提案手法 (MP-MIPv4 におけるパス間バイキャスト) により, 4.5 節で示した 3 つの要求条件を満足し, その結果, 通信不能時間率を低減させることのできるシステムが構成可能であることを明らかにした.

通信不能時間率の低減に成功したものの, いまだ課題も残されている. 通信不能時間率が Mode 1 で動作する後部 BR における L2HO 判定精度に依存することは明白である. L2HO 判定精度は L2HO 判定閾値から直接的な影響

を受ける (図 14). L2HO 判定閾値を高め設定すれば, L2HO 判定精度は向上し, 通信不能時間率は低下する. 逆に, L2HO 判定閾値を低く設定すれば通信不能時間率は上昇する. 通信不能時間率のみを考慮すれば, L2HO 判定閾値を高く設定すればよい. 特に -68 dBm 以上にした場合, Mode 1 では全 L2HO 以前にバイキャストを開始することが可能となる. しかしこれでは, バイキャストを行う時間が無用に長時間化し, 不要なバイキャストにより通信帯域は無駄に消費される. 通信不能時間率の低減とバイキャストを行う時間の短縮は相互にトレードオフの関係にある. これらについて適切な値を決定できる指標は通信時間中の平均スループットであるため, 平均スループットを最大化させることができる L2HO 判定閾値を選定することが必要である.

8. まとめ

本論文では最初に, シングルパス構成における TCP パフォーマンスの測定・解析結果を報告した. TCP パフォーマンスの低下要因は, ① L2HO にともなう物理的な伝送路の物理的な瞬時切断, ② TCP がタイムアウトを完了するまでの送信待機, ③無線リンク障害 (5.2% の確率で発生), の 3 つの原因であり, 通信不能時間率が Mode 1 で 9.9% , Mode 2 で 18.1% になることを明らかにした. この低減のため次の 3 つの要求条件を設定しシステム開発に取り組んだ. (1) L2HO 時においてもトラフィックフォワーディングが可能であること. これにより TCP のダウタイムを 0 とすること, (2) 地上 BR の無線リンク障害時においてもトラフィックフォワーディングが可能であること, (3) UDP その他のプロトコルにも適用可能であること.

3 つの要求条件を満足するシステム構成として, MP-MIPv4 を利用したパス間バイキャストを行う通信システムの実装方法を提案し, 実験システムを設計・構築した. 提案システムは L2HO を予測して, 当該ルートのトラフィックを他方のルートにも IP レイヤでバイキャストすることにより, シームレスな TCP ハンドオーバーの実現を目指したものである. 予測に成功した L2HO では, TCP のダウタイムを 0 秒とすることが可能となり要求条件 (1) を満足させた. また, 無線リンク障害時においてもトラフィックフォワーディングが継続できることを示し要求条件 (2) を満足させた. 要求条件 (3) について, 本提案手法の試験としては TCP を利用したが, SBLB に代えて IPLB で制御を行う (5.3 節) ことにより TCP に依存した制御を行わないこととした. したがって UDP その他のプロトコルにおいても本提案手法は有効である. このようにすべての要求条件を満足させた結果, 我々が提案する MP-MIPv4 を利用したパス間バイキャストを行う通信システムによって, 通信不能時間率を 4.97% に低減させることができた.

通信不能時間率の低減に成功したものの課題も残されて

いる。L2HO 予測に関し、Mode 2 で動作する前部 BR の L2HO の予測においては 88.2% の高い精度を得たが、Mode 1 で動作する後部 BR の L2HO 予測については、その予測のための L2HO 判定閾値設定には高い任意性がある。本実験では暫定的に 50.8% の予測精度が得られる -77 dBm を L2HO 判定閾値として実験を実施したが、最適な L2HO 判定閾値を求める必要がある。L2HO 判定閾値は通信不能時間率とバイキャストを行う時間に影響を与えるが、通信不能時間率の低減とバイキャストを行う時間の短縮は相互にトレードオフの関係にある。これらについて適切な値を決定できる指標が通信時間中の平均スループットであると考えられる。平均スループットを最大化させることができる L2HO 判定閾値が最適値であり、そのときの通信不能時間率とバイキャストを行う時間が全体システムを最適化させる値であるということになる。したがって、平均スループットを最大化させることができる L2HO 判定閾値について検討を進めたいと考えている。また、複数の TCP セッションを構築したとき、バイキャストが TCP セッション相互間で影響を与えあうことが想定されるため、この点についても十分な検討が必要であると考えている。

参考文献

- [1] Yamada, K., Sakai, Y., Suzuki, T., Kawahara, Y., Asami, T. and 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Cisco systems: Mobile IP – Mobile Router Multipath Support, available from <http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/12.4t/12.4t11/htmuntun.html> (accessed 2011-03-28).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] Arita, T. and Teraoka, F.: A Fast Handover Mechanism Using Cross-Layer Collaboration for a Mobile Network in a High-Speed Train, *The 3rd AsiaFI Winter School* (2010).
- [8] Cisco Systems: Mobile Router DHCP Support for Dynamic CCoA and Foreign Agent Processing, available from http://www.cisco.com/en/US/docs/ios/ipmobility/configuration/guide/imo_dhcp_dcco_fa_ps6441_TSD_Products_Configuration_Guide_Chapter.html#wp1081748 (accessed 2011-03-28).
- [9] Soliman, H., Castelluccia, C., ElMalki, K. and Bellier, L.: Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) Mobility Management, RFC5380 (2008).
- [10] Koodli, R. (Ed.): Mobile IPv6 Fast Handovers, RFC5568 (2009).
- [11] Kim, J.I. and Koh, S.J.: Proxy Mobile IPv6 with partial bicasting for seamless handover in wireless networks, *Proc. 25th International Conference on Information Networking*, pp.352–356 (2011).
- [12] Jahnert, J.: The Moby Dick Architecture, presented in Wireless Going IP International Project Summit, available from <http://www.it.uc3m.es/~mobydick/> (accessed 2011-07-15).
- [13] Novella J.I.M.: Integrating QoS, Mobility and AAA with IPv6 presented in Global IPv6 Summit 2003, available from <http://www.ist-ipv6.org/presentations/madrid03/joseignacio.moreno.pdf> (accessed 2011-07-15).
- [14] Dinakaran, M. and Balasubramanie, P.: Integrating N-PMIPv6 and Simultaneous Bindings Avoid Packet Loss in NEMO, *International Journal of Computer Applications*, Vol.15, No.4, pp.33–36 (2011).
- [15] 斎藤雅彦, 森本彰人, 中川正雄: 移動体通信におけるバイキャストとフォワーディングを併用するハンドオーバー時の IP パケットロス補償法, IEICE Technical Report, RCS2005-224, pp.277–282 (2006).
- [16] Caceres, R. and Iftode, L.: Improving the Performance of Reliable Transport Protocols in Mobile Computing Environments, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.13, No.5, pp.850–857 (1995).
- [17] Cisco Systems: Cisco Aironet 1300 シリーズ屋外アクセスポイント/ブリッジ, available from http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/airo1300/prodlist/ronet_ds.html (accessed 2011-03-28).
- [18] Perkins, C.: IP Mobility Support for IPv4, RFC 3344 (2002).
- [19] Cisco Systems: Configuring Port-Based Traffic Control, available from http://www.cisco.com/en/US/docs/switches/lan/catalyst3750/software/release/12.2_40_se/configuration/guide/swtrafc.html (accessed 2011-03-28).
- [20] Web100: Web100, available from <http://www.web100.org/> (accessed 2011-03-28).
- [21] Sourceforge: Iperf, available from <http://iperf.sourceforge.net/> (accessed 2011-03-28).
- [22] Wireshark: Wireshark, available from <http://www.wireshark.org/> (accessed 2011-03-28).
- [23] Paxson, V. and Allman, M.: Computing TCP's Retransmission Timer, RFC2988 (2000).



山田 和弘 (学生会員)

平成 9 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業，平成 11 年同大学院修士課程修了．同年東海旅客鉄道入社．平成 16～17 年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員．平成 21 年より東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程在学中．モバイルネットワーク，高速移動通信の研究に従事．



相田 仁 (正会員)

昭和 55 年東京大学工学部電気工学科卒業．昭和 55 年同大学院博士課程修了，工学博士．東京大学助手，講師，助教授を経て，平成 11 年より東京大学教授．ネットワーク，並列・分散処理の研究に従事．平成 5 年より経済協力開発機構 (OECD) 情報コンピュータ通信政策委員会 (ICCP) 副議長．



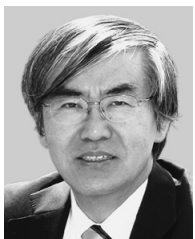
清水 和人 (学生会員)

平成 23 年東京大学工学部電子工学科卒業．現在，同大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻修士課程在学中．高速移動通信，センサネットワーク，ヒューマンプロンプシステムの研究に従事．



川原 圭博 (正会員)

平成 12 年東京大学工学部電子情報学科卒業，平成 17 年同大学院博士課程修了．同年同大学院情報理工学系研究科助手，助教を経て平成 22 年同講師．平成 23 年よりジョージア工科大学客員研究員．ユビキタスネットワークを実現するための情報通信技術に関する研究に従事．博士 (情報理工学)．



浅見 徹 (正会員)

昭和 49 年京都大学工学部電子工学科卒業．昭和 51 年同大学院修士課程修了．同年 KDD (現 KDDI) 入社．以来，UNIX 通信，ネットワーク障害診断システムの研究実用化に従事．博士 (情報理工学)．平成 13 年 (株) KDDI 研究所代表取締役所長．平成 18 年以降，東京大学大学院情報理工学系研究科教授．平成 9 年度前島賞受賞．