

鉄道移動体における IP ネットワーク構築について

森 崇† 山内 雪路‡ 加川 一夫† 石井 順†

†西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部技術部 〒530-8341 大阪市北区芝田 2-4-24

‡大阪工業大学 情報科学部 〒573-0196 枚方市北山 1-79-1

E-mail: †{t-mori, kagawa, jun-ishii}@jrwest-tech.gr.jp, ‡yamauchi@is.oit.ac.jp

あらまし JR 西日本では、鉄道移動体向けの試験 IP ネットワークを構築している。鉄道においては指令、乗務員、係員が相互に情報を共有することが非常に重要になってきている。これらを実現するため、IP+モビリティの技術を用い、広帯域の伝送能力を持った IEEE802.11b 無線 LAN と Mobile IP を活用し試験を行っている。今回は RTT と電波伝搬について述べる。

キーワード 無線 LAN, Mobile IP, 鉄道車両, DSL, 電波伝搬, RTT

Experimental IP Network Construction For Railway Mobiles

Takashi MORI† Yukiji YAMAUCHI‡ Kazuo KAGAWA† and Jun ISHII†

†R&D dept, JR-West 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka, 530-8341, Japan

‡Osaka Institute of technology 1-79-1 Kitayama, Hirakata, 573-0196, Japan

E-mail: †{t-mori, kagawa, jun-ishii}@jrwest-tech.gr.jp, ‡yamauchi@is.oit.ac.jp

Abstract

We have constructed the 'Experimental IP Network For the Railway Mobiles'. It is very important issues for railways to communicate between dispatchers, drivers, conductors and wayside workers to keep on time and rapid recovery from railway accidents. We put up the experimental field to provide wide digital bandwidth and realizing the IP mobility for the high-speed railways by using the IEEE802.11b wireless LAN bridges and Mobile IP.

Keyword Wireless LAN, Mobile IP, Railcar, DSL, radio propagation, RTT

1. はじめに

JR 西日本技術部では、乗務員、指令員や沿線の作業員相互間の情報共有化を図るため、「IP Mobility の実現」というネットワークビジョン実現のために試験を行っている。IP Mobility を実現させるためには、電波伝搬の把握による基地局位置の決定やアンテナ選択など、無線技術のフィールドからルーティングやセキュリティなど IP ネットワーク構築ポリシーにいたることまで各種の技術分野を総合的に積み上げていく必要がある。

このような多様な技術分野が絡み合うシステム構築においては、いきなり実用化を目指すよりも、試験フィールド

を構築し、その中から出てくる課題を抽出し、その解決を一步步目指すことにより実現を図ることとした。

我々 JR 西日本技術部と大阪工業大学はまず列車を「走りながら、外部と連続的につながる IP ネットワーク」を第一ターゲットとし、「列車内がオフィス」となる将来像を描きつつ技術開発を行っている。

本論文では、試験フィールドの紹介とそのフィールド上で行っている試験内容、特に電波伝搬結果と今まで知られている近似式との対比を行うとともに RTT(Round Trip Time)の測定することにより、連続的な IP コネクティビティを検証する。

2. 試験フィールド

試験フィールドは、いろいろな地形を含むことが電波伝搬上の変化があり望ましいことといえる。特に鉄道の場合、鉄道トンネルとトラス橋（三角形を細長い部材で組み合わせた橋で鉄道橋梁によく使われる）は、鉄道路線に頻出する構造物としては電波伝搬上特異であると思われる。また、山岳地帯、田園の平坦地帯、都市地帯における電波伝搬は過去事例においても大きく差異があることが報告されている。これらをバランスよく含む線区を選択することが重要であり、試験システムとして投資効果が高いことになる。

JR 宝塚線（福知山線）は、尼崎～福知山までの路線である。この路線のうち尼崎～新三田までは各種地形を含み、大阪近郊においては最高のフィールドである。

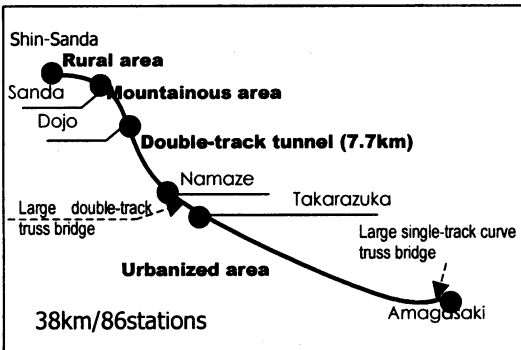


Fig. 1 Test field outline of JR Fukuchiyama Line

無線装置は、メーカー間の相互接続性がよいことや費用対効果を考慮した結果、IEEE802.11b無線LANブリッジを採用し、86局で全線カバーするように設置した。この周波数帯の電波は回折効果がほとんど期待できないため、見通し内伝搬となる。信号機は列車から見通しがよく、基本的に500-800m遠方から確認可能な位置に設置してあることや電源の確保が容易であることから無線ブリッジは信号機に設置した。また、信号機間隔も通勤線区においては500m程度と無線伝達距離とほぼ一致している。これらの利点を踏まえ沿線の信号機柱に12.14dBiの多段コリニアアンテナを設置し、伝搬距離をできるだけ確保するように施工した。また、トンネル内は壁面反射によるマルチパス歪みをできる

だけ防ぐため12.14dBiの八木アンテナを使用している。

列車に取り付けるアンテナは、沿線構造物との衝突を避けるため、定められた車両限界内にすべての車両部品を設置する必要がある。近年車体の大型化が進み車両限界と車両断面の差が減少しており、車上取り付けのアンテナの取り付け余地が小さくなっている。このため小型の無指向性の5.2dBiのゲインを持つアンテナを使用している。

これらのアンテナ系により、全線において-85dBm以上の受信電力を確保するように設計し、おおむね500mおきに無線ブリッジを設置することとした。

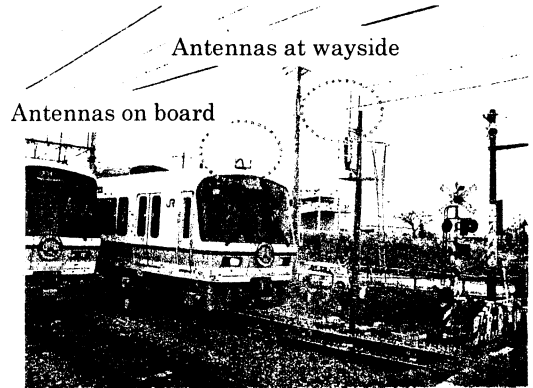


Fig. 2 Antennas on wayside and on the train

3. ネットワーク構成概要

3.1 有線ネットワーク

列車と最寄りのノードまでの通信を担うためにはIEEE802.11b無線ブリッジが担当することは先述したが、事務所やインターネットに存在するノードとデータ伝送を行うためには、無線装置だけではなく、無線装置と接続する有線ネットワークが必要である。この有線ネットワークの例を、Fig. 3に示す。

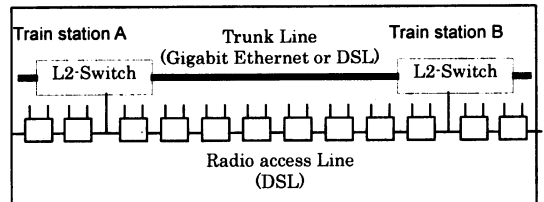


Fig.3 Layer 2 network for trunk line and radio access line

各駅経由の基幹線ネットワークを敷設し、無線アクセス回線を各駅で分岐している。基幹線ネットワークは光ケーブルが用意できる駅間においては Gigabit-Ethernet を採用した。福知山線の光ケーブルがない区間については DSL で駅間を接続した。無線アクセス回線には 5.2Mbps の対称型 DSL を採用し、できるだけ高速なアクセスを可能とした。このように基幹線ネットワークと無線アクセス回線に分離を行った理由を以下に示す。

(1) 多段接続による遅延累積をできるだけ回避する。

今回のように、86 無線ノードが存在するようなネットワークの場合、ノードを直列に接続すると最大 85 のノードを経由することになる。このため、遅延が累積し、TCP/IP の場合 ACK がすぐ返らないことによる伝送能力の低下が顕著となる。また、VoIP などリアルタイム性が強度に必要なアプリケーションについても問題が生じる。このため、最寄りの駅で無線アクセス回線から基幹線ネットワークに乗り換えさせることにより到達時分を短縮することを狙っている。ちょうど、鉄道における緩急接続による到着時分短縮の考え方を基を一にしている。

(2) 冗長性の確保

伝送回線が一箇所切断されても迂回が可能となるように、Spanning Tree Protocol にて冗長性を確保し、伝送路の稼働率の向上を図っている。基幹線ネットワークと無線アクセス回線は異なるケーブルに収容している。

3.2 セグメントの分割と Mobile IP

すべてのノードを同一セグメントに収容することは、小規模ネットワークでは問題なくとも、大規模ネットワークにおいては IPv4 の ARP テーブル、IPv6 における Neighbor discovery, L2 スイッチの MAC アドレスフォワーディングデータベースの増大など各ノードに負担をかけることになる。安価な L2 スイッチの中には MAC アドレスフォワーディングデータベースの登録数が 1000 程度のものがあり、IPv4 の /22 以上のネットワークセグメントには対応が

困難である。

このため、セグメントの分割を区間により行う必要が生じる。今回の試験ネットワークにおいては、5つのセグメントに分割した。通常よく使われるこの手法も、鉄道への応用では問題がある。鉄道車両は通例複数の線区や会社にまたがり運行される。このため、地上ネットワークのネットワークセグメントは線区ごとに異なることが通常であると考えられる。このため、RFC2002 による Mobile IP を使用し、Correspondent Node が Mobile node にアクセスする際、同一 IP アドレスで通信可能であるように工夫している。鉄道車両の場合、車両がセグメント境界を越える際、多数のノードの登録が Home agent と Foreign agent に対して行われることとなる。これを防ぐため、車載のルータを Mobile Node とし、ルータのみが Home agent と Foreign agent に登録を行うことにしている。

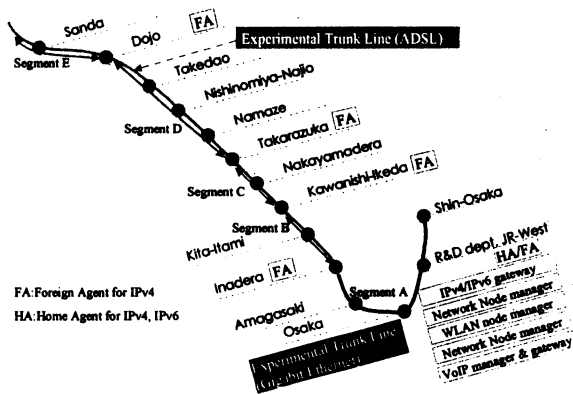


Fig.4 Mobile IP test field at Fukuchiyama Line

3.3 IPv6 への取り組み

今後鉄道沿線において各種機器の監視や遠隔操作が IP 化されてくることが予想される。監視対象の機器の数は今後増大していき、すべての沿線機器に IP アドレスが割り当てられることになることも考えられる。IP アドレスが重複しないように固定的に割り当てることは管理の複雑さを招くと考えている。このため、IPv6 Stateless Address Assignment を活用すると IPv6 アドレスが自動的に自動生成される。また、IPv4 グローバルアドレスの枯渇問題が中

国を中心に問題化していること、米国国防総省が IPv6 化を進めることや次期 NTT の地域 IP 網が IPv6 化されることなど IPv6 の波が進んできている。この流れに乗るべく、今回の試験ネットワークは IPv6 と IPv4 双方のデュアルスタックとし、RIPng でルーティングしている。また、DNS、FTP、SMTP 等のサーバーも IPv6 における通信を可能としている。また、各ルータは、Router Advertisement を送出し、Plug and Play でのアドレス割り当てが可能となっている。

移動する列車に対応するため Mobile IPv6 の試験も行っている。現在 Mobile IPv6 の規格化は Internet Draft 24 まで進展している（2004 年 1 月 14 日現在）が、各 Draft 間の相互接続性はほとんどないことが確認されたため、最新の ID24 での試験を行っている。

3.4 ハンドオーバー

列車走行中無線ブリッジの伝送エリアを越えると、次の無線装置との通信を行うため、ハンドオーバーが必要となる。これは以下のような手順で行われる。

- (1) 移動中の列車の信号強度やビットエラーが増大する。
- (2) チャンネルサーチを行う。
- (3) 以前の通信状態よりもよい局が見つかった場合、Open authentication を行う。
- (4) 次の局と通信開始

このような手順で行われるため、どうしても切り替え時間が要する。現在は 0.5s 程度であるため、これを短縮することが課題である。

4. 電波伝搬結果とモデルとの対比

直線区間の例

2.4GHz 帯の伝搬を調査した結果を示す。Fig.5 は複々線区間の直線の都市化区域(東海道本線：尼崎市立花～西宮市甲子園口)における、基地局地上高 3.8m、移動局 3m の条件下での距離による減衰を示したものである。移動体通信における伝搬モデルは、畠(1)により提案されているものがある。(しばしば Hata Model と呼ばれている。)これとの対比を行うことにより、直線区間の伝搬モデルの適合性を

評価することができる。

この Hata Model は

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log R \quad (1)$$

と表される。

但し 中小都市、郊外の移動体アンテナ高さ補正係数 $a(h_m)$ は、

$$a(h_m) = (1.1 \log f_c - 0.7) h_m - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad (2)$$

都心部のアンテナ高さ補正係数は、

$$a(h_m) = 3.2 (\log 11.75 h_m)^2 - 4.97 \quad (3)$$

となる。

郊外における補正は：

$$L_{ps} = L_p - 2 (\log f_c (1/28))^2 - 5.4 \quad (4)$$

但し： f_c 周波数(MHz)

h_b : 基地局高(m) h_m : 移動局高(m)

d : 無線局間距離(km)

と定義されている。

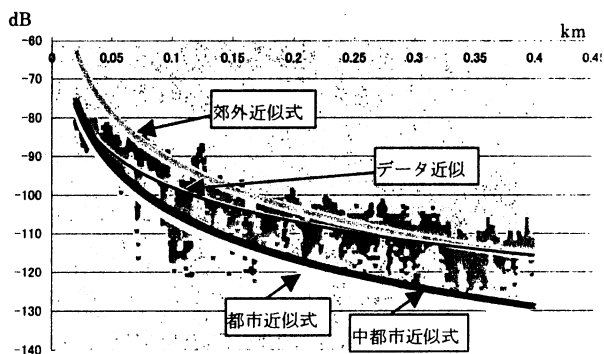


Fig. 5 Radio Propagation loss for 2.4GHz band

この式と試験結果を対比させると、距離が 200m を越える際においては郊外における Hata Model が比較的よい近似を示している。本来、Hata Model は伝搬距離 1km 以上および基地局のアンテナ高さ 30m 以上の近似に適用するものであるが、今回の結果はその距離未満においても鉄道路盤においては適用可能であることがわかった。本試験を行ったエリアは人口集積が著しいが、線路路盤内は建築物がな

く完全に見通しが確保できることにより 200m を超える伝送距離においては郊外モデルが適用できたと考えられる。

測定結果から、周期的に急激に電界が落ち込む点があることが観測されている。この電界の落ち込みは線路路盤による反射波による干渉であると推定した。Hata Model における郊外モデルに路盤反射減衰を 5% として足し合わせたシミュレーション結果を Fig. 6 に示す。

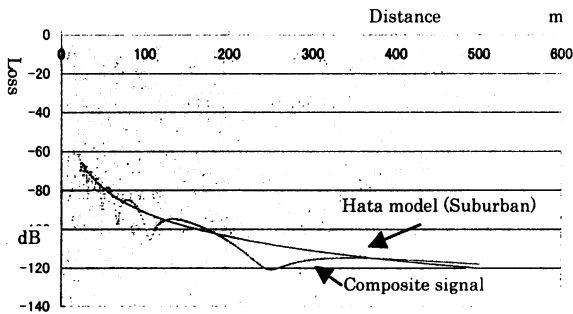


Fig. 6 Direct and ground-reflected composite signal

反射波を合成した結果と実測結果を比較すると 100m を超える場合同一の傾向が観測されている。このため、電波伝搬経路は短距離伝搬を除くと 2 波モデルとして考えるとよいことがわかる。今回の場合、基地局、移動局とも 3m 程度と地表から近いところにあり、ほとんどの干渉が地表での反射によるものとなったと考えられる。

5. RTT 試験

IP 的なコネクティビティーを検証するため、RTT (Round Trip Time) 測定を列車から大阪の事務所に対して行った。当社 221 系電車の快速運用で使用している列車から Ping を行い、RTT を測定した。当該線区の運用最高速度は 120km/h であり、車両最高速度も 120km/h である。

都市区間の例

Fig. 7 に都市区間である福知山線中山寺駅～宝塚駅間における RTT の例を示す。ハンドオーバーが行われる 500-700m おきに RTT の増加が観測され、無線通信相手先が切り替わっていることがわかる。この程度の連続性を確保すると、Web ページアクセスではまったく違和感なく使用することができる。VoIP の場合においても無音時間が

一秒以下程度あることが分かるが、会話内容の了解度についてはあまり問題がない。

RTT が徐々に増加しているのはだんだん大阪から離れ DSL の段数が増えているためである。この遅延累積はリアルタイム性に大きな影響を与えるため、ストア&フォワードの時間を短縮することが必要であり、現在改良型の DSL を開発中である。

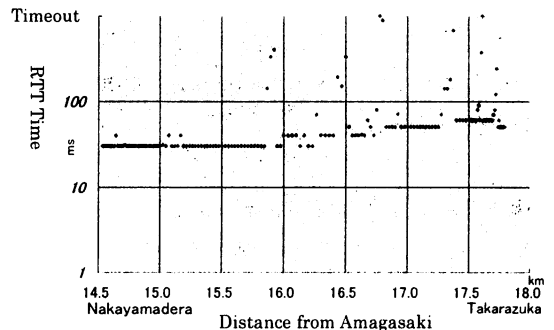


Fig.7 RTT result from the train in Urbanized Area

トンネル区間の例

Fig.8 にトンネル区間である西宮名塩駅～武田尾駅の RTT の例を示す。この駅は双方ともトンネルとトンネルの合間にあり、駅間はすべてトンネルである。

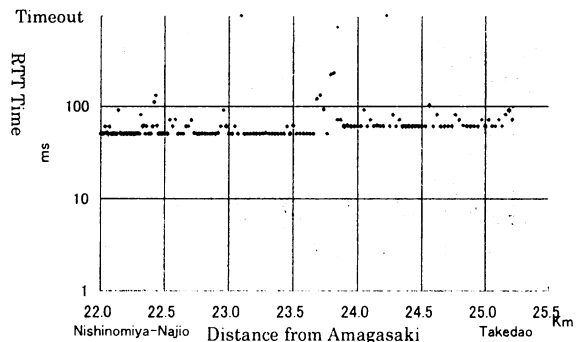


Fig.8 RTT result from the train to Osaka in tunnel

トンネル壁面反射による RTT の悪影響は意外に少なくあまり観測されていない。トンネル内は八木アンテナを利用したことによる壁面方面への電波放射をできるだけ防いだこ

とよること、導波管効果により特定のモードの伝送により伝搬が行われていることによるものと推定される。

トンネル内の使用感は特に問題なく、VoIPの音質についても問題がなかった。

山岳エリア

尼崎起点 31.8km～33km 付近までは山の中腹を走行する区間であり、一般的な直接波と路盤の反射波の合成波ではないと考えられる区間である。山に反射する電波の干渉が無視できない区間である。この区間は、無指向性のアンテナを使用しているため、線路方向にも山腹の方向にも同一程度の輻射が行われる。

この RTT の結果を Fig. 9 に示す。尼崎起点 31.8km～33km の RTT の乱れが大きく観測されている。その前後は田園地帯であり、RTT の乱れはさほどでもないため山腹による反射による干渉が疑われる。より詳しくは電波伝搬の測定を行った後に解析し次回報告を行いたい。

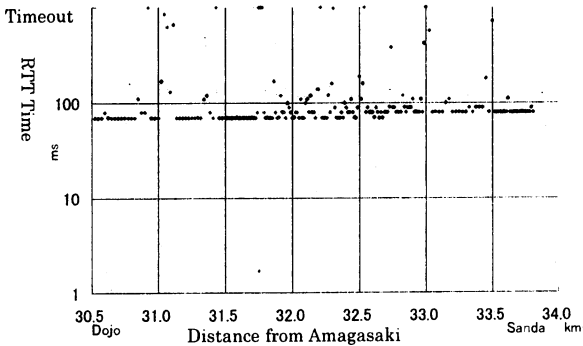


Fig.9 RTT result (near mountain)

山腹における反射をできるだけ低減するため、ビームアンテナを使用し、できるだけ山腹に向けての輻射を低減することが必要である。現在、アンテナの選定を行い、状況の改善を進めている。

6. アプリケーションの実装

安定な鉄道運用を考える際、必要なことは状態監視および異常時の的確な情報提供である。列車においては MPEG2

ストリーミング装置の試験仮設や VoIP 電話機の仮設、乗客のサービス面を考慮して車内からのインターネットアクセスの試験を可能としている。また、踏切をモデルケースにして、踏切画像の取得やリレーシーケンスのログを取得している。また、新三田においては気象状態を把握できるように IP 化した気象センサを設置し、移動体だけではなく固定した機器による沿線状態把握も進めている。

沿線の作業員に対しては、列車の運行を逐一把握できる端末の開発や携帯型 VoIP 電話装置の実装を行い、沿線の作業員の安全確保に役立つような機器の試験を行っている。

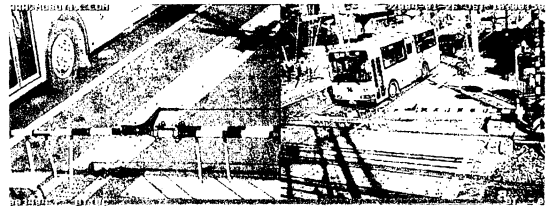


Fig. 10 Railway crossing picture transmitted by IP network

7. おわりに

無線を使った IP、特に無線 LAN 活用においては大変広い分野を含む技術であり、まだまだ開発を進めていく必要があると考えている。

特に電波伝搬関係、IPv6 Mobility や端末、センサ類の IPv6 化など今後検討していかなければならない部分も多くある。関係各位のご指導ご鞭撻をいただければ幸いである。

文 献

- [1] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, August 1980, pp. 317-325.
- [2] T. Mori, K. Kagawa, J. Ishii: "Broadband IP Network For Running Trains", Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, JSME No.03-205 pp94-99, (2003-8)