

2801 複数の無線伝送方式を併用する地上一車上传送システム

正 [電] ○関 清隆 (鉄道総研) 川島 和也 (富士通ソフトウェアテクノロジーズ)

Wireless Transmission Systems Using Multiple Transmission Media Jointly

Kiyotaka SEKI, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Kazuya KAWASHIMA, Fujitsu Software Technologies Limited

Although low-cost and high-speed transmission systems may be constructed between ground and trains by using general purpose wireless transmission technologies, sometimes it may happen that transmissions become impossible due to interferences from other transmission systems. So in order to increase availability of transmission, we experimentally manufactured transmission control systems which use multiple wireless transmission media jointly. We verified that the systems can reduce both frame loss rates and transmission delays through the experiments with two wireless LAN systems in our sites of RTI.

Keywords: general purpose wireless transmission, multiple media

1. はじめに

地上～車上の無線通信システムに無線 LAN 等の汎用無線技術を利用することにより低コストで高速な伝送システムを構築できる可能性があり、列車制御システムへの適用が検討されている¹⁾。しかし無線 LAN の通信装置は誰でも自由に使用でき、同一チャネルを使用する他の無線 LAN システムが妨害源となり通信品質が劣化することがある。IEEE802.11b や IEEE802.11g が使用する 2.4GHz 帯は、これらの方式が広く普及している上に、電子レンジや医療機器等の通信以外の装置や Bluetooth 等の別方式の無線通信システムが使用するため、特に妨害を受けやすい。また IEEE802.11a については、5.2GHz 帯(W52)や 5.3GHz 帯(W53)は屋外では使用できず、5.6GHz 帯(W56)は屋外で利用できるもののレーダの検出のために 1 分間は通信できないなどの制約がある。さらに、携帯電話等の公衆無線通信システムでは、話中や輻輳により接続が不可能なこともある。このような事象は無線回線を利用するシステムのアベイラビリティを低下させるが、汎用無線を使用する限り本質的に回避することは不可能である。

しかし、複数の無線通信方式を併用すればいずれかの無線回線が使用できる確率が向上し、通信のアベイラビリティを向上できる可能性がある。そこで、伝送システムの試作を行い、鉄道総研内で性能確認実験を行った。

2. 伝送システムの試作

2.1 適用システムの前提条件

本無線通信システムが対象とする列車制御システムでは、列車は駅や踏切の周辺のみで地上と通信できればよく、連続的な通信は要求されない(図 1)。また、駅は地上のバックボーンネットワークで相互に接続されているが、踏切はネットワークからは孤立している。また、閑散線区が対象であり、列車密度は低い。

地上装置(駅制御装置及び踏切制御装置)と列車内の車上制御装置とは、IP(ユニキャスト、マルチキャスト、ブロードキャスト)で通信を行う。列車相互間の IP 通信は

行わない。

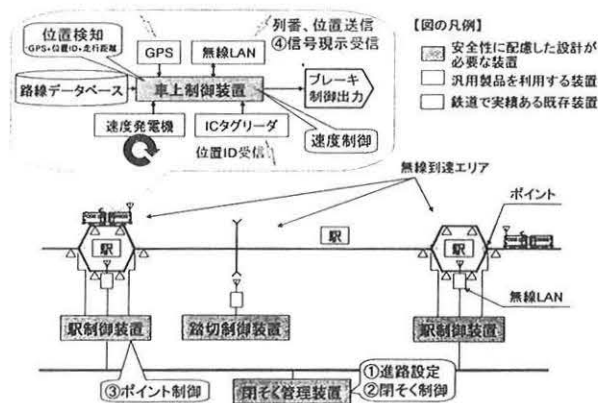


Fig. 1 Outline of Train Control System

2.2 伝送システムの構成

伝送システムの構成を図 2 に示す。地上ネットワークと車上ネットワークをシームレスに結合するために、地上と車上に伝送制御装置を置く。伝送制御装置は、複数(n 個)の有線 LAN インタフェースを持ち、そのうちの 1 つをネットワーク側(駅制御装置や列車制御装置などを接続する側)に使用する。残り(n-1 個)には、対向する伝送制御装置と接続するための無線伝送装置を接続する。

伝送制御装置は、ネットワーク側インタフェースで IP フレームを受信すると、制御用情報を付加して複製を作成し、(n-1)個の無線伝送装置側インタフェースに出力する。対向する伝送制御装置は、複数個の同一フレームを受信するが、そのうち最も早く受信したフレームを採用してネットワーク側に出力し、遅れてきた残りのフレームは廃棄する。こうして、(n-1)個の無線回線のいずれかが接続していれば IP フレームの伝送を行うことができる。

地上～車上の無線方式は、無線伝送装置の有線 LAN インタフェースから入力するフレームをシームレスに伝送できるものであれば何でもよい。無線伝送装置の具体的な例としては、無線 LAN であれば、地上をアクセスポイント、車上をメディアコンバータとする構成、地上・車上ともブリッジやアクセスポイントとする構成等が該当する。また、携帯電話や PHS であれば、これらの通信モジュールを組み込んだモバイルルータが該当する。

無線 LAN を使用する場合には、異なる規格の方式を併用(IEEE802.11g と IEEE802.11a など)するか、同一方式で異なるチャンネルを併用(IEEE802.11g でチャンネル 1 とチャンネル 13 を併用するなど)するか、が考えられる。いずれの場合も、無線伝送装置はその組み合わせごとに、以下のように設定する必要がある。

- 地上無線伝送装置と車上無線伝送装置同士はすべての組み合わせで接続できるようにする(接続許可を与える、SSID や暗号化キーを同一にする、など)。
- その他の組合せ(車上無線伝送装置同士、地上無線伝送装置同士)は、接続できないようにする(MAC アドレスフィルタリングなどによる)。

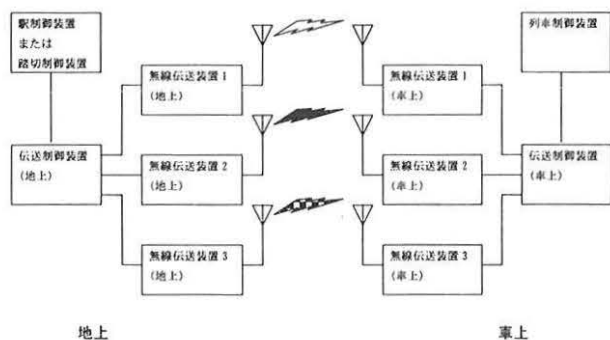


Fig. 2 Configuration of Transmission System

2.2 伝送制御装置の機能

伝送制御装置の機能構成を図 3 に示す。

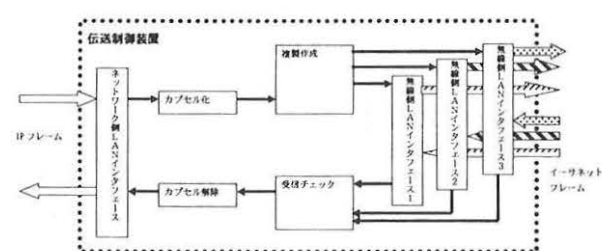


Fig. 3 Functional Configuration of Transmission Control Equipment

各機能の概要は、以下の通りである。

(1) カプセル化

ネットワーク側 LAN インタフェースから受信した IP フレームに対し、通番及び装置の起動時刻並びにデジタル署名を付加し、さらに暗号化を行ってイーサネットフレームのデータ部に設定する。

通番は、プログラムが起動するごとに初期値から開始する。またこれに加えて起動時刻も送信する。

本試作では、暗号アルゴリズムは共通鍵方式を採用し

た。暗号鍵は、固定のシードと時刻をもとに生成する。鍵生成の周期はパラメータで可変とできるが、例えば 1 時間間隔である。シードは、本試作ではプログラム中に記載したが、IC カード等の耐タンパデバイスを使用しそこに記憶させればセキュリティは向上する。

暗号化鍵を頻繁に変えることにより、解読、なりすまし等の攻撃に対する耐性が向上するが、送受信伝送制御装置間で時刻の同期がとれていないと正規の受信者でも解読不可能になる。そこで、伝送制御装置は ntp サーバに周期的に接続して時刻同期を行うとともに、ntp サーバとの接続ができない場合には送受信動作を停止することにした。本列車制御システムの車上では位置検知のために GPS の利用が想定されていることから、列車制御装置で ntp サーバを稼働させれば追加のハードウェアを必要とせず高精度での時刻同期は可能と考えられる。

このようにして生成された暗号文を、イーサネットフレームのデータ部に格納する。

(2) 複製作成

生成したイーサネットフレームの複製を作成し、無線伝送装置に向けて出力する。

本伝送システムでは、複数の無線伝送装置を採用できるため、周波数ダイバーシチ(2.4GHz と 5.6GHz など)、空間ダイバーシチ(同一方式だがアンテナ位置を変えるなど)等の効果を見込むことができる。さらに、コスト低減等のためにもともと 1 つの無線伝送装置しか使用しない場合や無線伝送装置が故障した時などに備えて、一つの無線側インタフェースに複数の同一フレームを出力する機能も実装した。これにより、時間ダイバーシチの効果を見込むこともできる。

(3) 受信チェック

無線側 LAN インタフェースから受信したイーサネットフレームを復号し、送信側で複数送信したフレームの中で最初に到着したフレーム以外は廃棄する。

暗号の解読には、受信側で独立して生成した鍵を使用する。そのため、上述のように時刻同期がとれていなければ解読ができない。解読に失敗したフレームは廃棄する。また、暗号化されていないフレームも廃棄するので、不正な接続によるデータも廃棄することができる。

解読に成功しデジタル署名のチェックを行ったデータに対し、その通番をチェックする。伝送制御装置は通番カウンタと送信装置の起動時刻を保持しており、カウンタ値より大きな通番を持つデータは新規到着として採用するとともに通番カウンタに受信通番をセットし、そうでなければ廃棄する。

ただし、通番が通番カウンタ値より小さいフレームであっても、受信した起動時刻と保持している起動時刻が異なっていれば採用し、通番カウンタ及び起動時刻の値を更新する。これは、送信側伝送制御装置のリポートによる通番のリセット時にも継続して受信できるようにするためである。

(4) カプセル解除

新規到着と判断したデータから元の IP フレームを取り出し、ネットワーク側 LAN インタフェースへ出力する。

3. 試作システムの所内実験

試作した伝送制御装置を鉄道総研構内の実験線沿線と実験用車両内に配置して仮設ネットワークを構築した。このネットワークに実験用 PC を接続し、車上の実験用

PC から地上の実験用 PC に向けて、100ms 間隔で連続的に ping コマンドを実行し、トラフィックを発生させた。伝送制御装置に記録されたログを解析することで、プログラムが仕様通りに動作していることを検証するとともに、フレームのロス、伝送遅延時間を評価した。

3.1 実験機器の構成と配置

実験に使用した機器の外観を図 4 に示す。伝送制御装置のハードウェアは、汎用の Linux マイクロサーバである。

汎用無線方式として、IEEE802.11g(以下では 802.11g と記載する)及び IEEE802.11a(以下では 802.11a と記載する)を使用した。802.11g の伝送装置はブリッジモードで動作させ、地上をルートブリッジ、車上をノンルートブリッジとした。地上のルートブリッジは車上のノンルートブリッジのみと、車上のノンルートブリッジは地上のルートブリッジのいずれかと接続するように設定した。また、802.11a については、地上にアクセスポイント(以下では AP と略記する)を配置し、車上にクライアントとなるメディアコンバータを設置した。さらに、無線 LAN のチャンネルは 802.11g でチャンネル 13 に、802.11a でチャンネル 100 に、それぞれ固定し、無線 LAN での暗号化や認証等のセキュリティの設定は行わなかった。802.11g では、接続の安定性を重視し伝送速度を最高 6Mbps(OFDM の最低速度)に設定した。

地上の基本的な機器配置を図 5 に示す。伝送制御装置は、最大で 3 ケ所(図の A, B, C)に設置し、すべて有線 LAN で接続した。802.11g ブリッジは各伝送制御装置に接続したが、802.11a AP は台数の制約により、A, B のみ設置した。また、802.11g ブリッジのアンテナについては、B では鉄道用アンテナを、A と C では汎用の屋外用アンテナを使用した。

一方車上では、屋根上に 802.11g 鉄道用アンテナを仮設した。また、運転台に 802.11a クライアントを設置した。

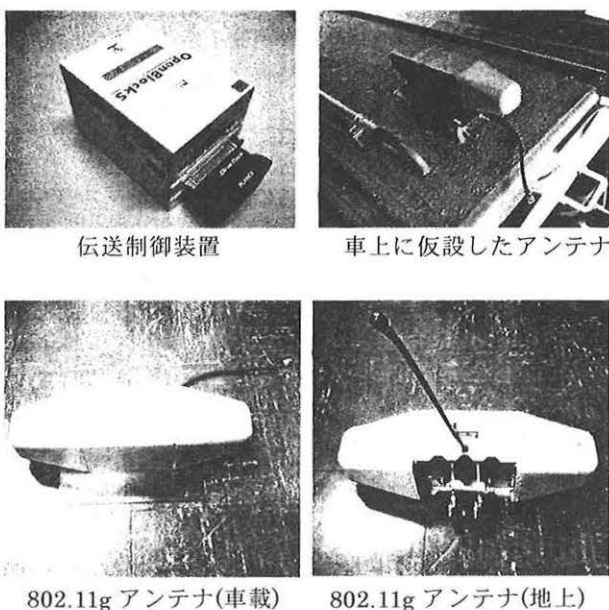


Fig. 4 Transmission Control Equipment and Antennas

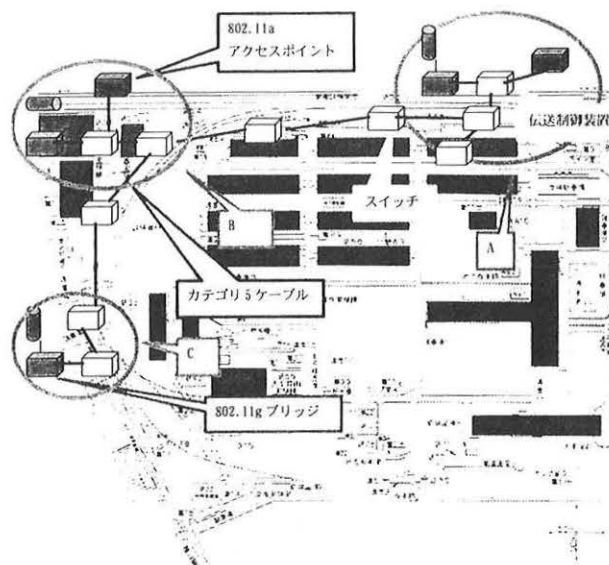


Fig. 5 Layout of Devices for Experiment

3.2 実験結果

(1) 地上局が 1 ケ所 (B のみ) の場合

地上局を B のみに設置した場合には、ハンドオーバーは発生せず、802.11g と 802.11a のうち早く到着した送信データが採用されて IP フレームに還元される。車上→地上の測定結果例を図 6 及び図 7 に示す。図 6 は受信範囲内において、受信したフレームの相対伝送遅延時間を 802.11a 及び 802.11g のおのおのに対してプロットしたグラフである。ここで相対伝送遅延時間とは、処理対象となるフレームの伝送遅延時間の最小値を 0ms としたときの相対値である。また図 7 は、その一部を拡大表示したものである。

車上→地上の伝送では、地上アンテナ設置箇所付近では 802.11a と 802.11g のどちらも安定した通信が行え、いずれか一方の方式を採用する場合よりも伝送遅延時間の平均値に改善が見られた。例えば、802.11g 単独の場合よりは 1ms, 802.11a 単独の場合よりは 8ms 改善された場合があった。なお、受信状態が悪化すると伝送遅延時間の増大やフレームロスの発生が増加するが、本実験構成では 802.11g の方が通信可能なエリアが広く 802.11a の通信エリアは 802.11g の通信エリアにほぼ含まれている。そのため、2 方式を併用した場合の伝送遅延時間の最大値やフレーム受信率は、802.11a 単独の場合よりは大きく改善されるものの、802.11g 単独の場合と比較すると改善が見られなかった。

一方、地上→車上の伝送では、802.11a の伝送遅延時間が 802.11g よりほとんどの場合に大きく、2 方式を併用した場合の伝送遅延時間は、802.11g 単独の場合と差がなかった。

今回の実験では行わなかったが、各方式のアンテナを同一箇所を設置するのではなく、たとえば 802.11g の通信エリアの限界に近い箇所に 802.11a アンテナを設置するようにすれば、通信エリアの拡大と伝送遅延時間の改善がさらに効果的に行える可能性がある。

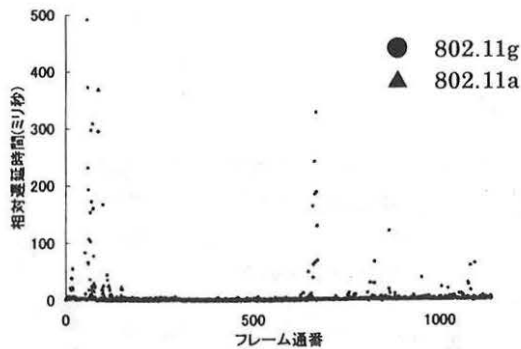


Fig. 6 Example of Transmission Delay

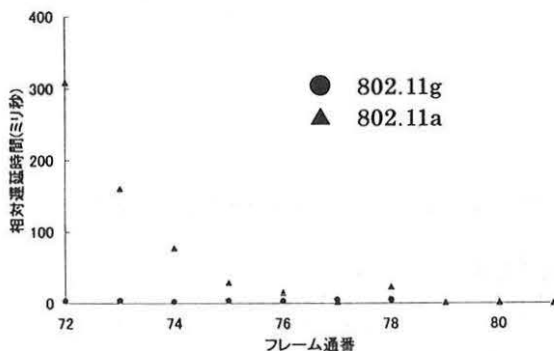


Fig. 7 Example of Transmission Delay

(2) 地上局が複数の場合

地上局が2ヶ所または3ヶ所の場合には、ハンドオーバーが発生する。

802.11g でハンドオーバーが発生した場合の無通信時間を、車上局がハンドオーバー前に接続していた地上局から802.11g 経由で最後にフレームを受信した時刻と、ハンドオーバー後に接続した地上局から最初のフレームを802.11g 経由で受信した時刻の差で求めたところ、平均1.232 秒、最大で2.511 秒であった。

802.11g の無通信時間を802.11a による通信でカバーできれば、通信断を回避することができ、フレーム受信率の向上を図ることができる。そのような受信状況の一例を図8に示す。横軸は相対時刻である。時刻0では、車上局は地上局Aと802.11gで、地上局Bと802.11aで接続している。しばらくすると地上局Aとの間の802.11g通信リンクが切断し、2秒頃に地上局Bと再接続する。この間も802.11aの通信リンクは接続しているため、フレームロスの発生を抑えることができる。

(3) ping コマンドの実行結果

地上局A及びBを動作させた状態で車両をA→C方向に走行させた場合の、ping コマンドの応答時間の時系列例を図9に示す。横軸は、出発時刻を0とした相対時刻を示している。経過時間1分頃にAからBへのハンドオーバーが行われたことが推定され、この付近とBの通信エリアの限界である1分50秒付近で一時的に応答時間が大きくなっているが、それ以外は安定している。他の試番もおおむね同様な傾向であった。走行試験で安定した応答時間が得られている場合、その値は室内でのそれとほぼ同一であった。

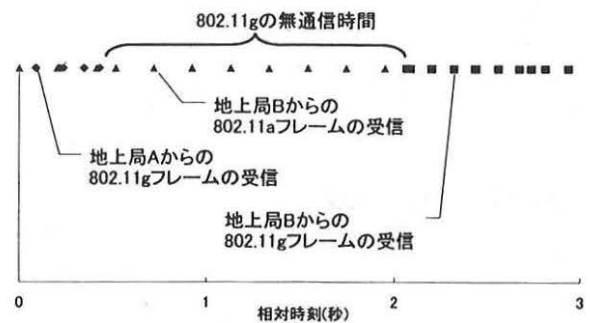


Fig. 8 Replacement IEEE802.11g with IEEE802.11a

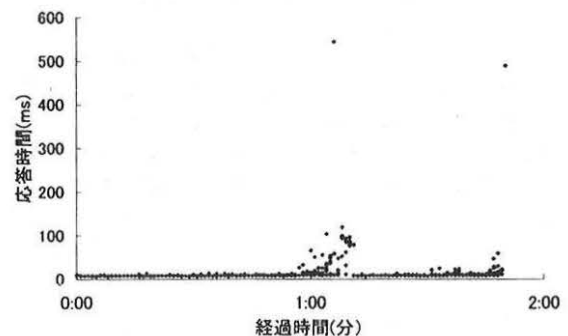


Fig. 9 Example of Ping Roundtrip Delay

4. 終わりに

汎用無線を複数併用して伝送の信頼性を高める地上～車上伝送システムを試作し、無線LAN(802.11g及び802.11a)を使用した所内実験を実施した。

2方式を併用することにより、伝送遅延時間やフレームロスの減少が期待できることを確認した。特に、ある方式の地上局の無線カバーエリアの境界付近など受信状態のよくない箇所やハンドオーバー発生箇所などに別方式の地上局を設置するようにした場合などに効果が高いことが推定された。

参考文献

- 1) 山本春生：無線利用の閑散線区列車制御システム，JREA, Vol.51, No.8, pp.33534-33536, 2008