

無線式列車制御用通信ネットワークのシミュレーションによる安定性評価手法

○ [電] 菅原 宏之 [電] 川崎 邦弘 (鉄道総合技術研究所)

[電] 立石 幸也 鈴木 祐輔 (東日本旅客鉄道)

[電] 森 崇 松原 康博 (西日本旅客鉄道)

Evaluation Method of Stability by Network Simulation
for Japan Radio Train Control Systems

○Hiroyuki Sugahara, Kunihiro Kawasaki, (Railway Technical Research Institute)

Yukiya Tateishi, Yusuke Suzuki, (East Japan Railway Company)
Takashi Mori, Yasuhiro Matsubara, (West Japan Railway Company)

This paper describes simulation tools, which evaluates a transmission quality of communication network, taking a quality of radio data transmission on a railway line environment into consideration, in order to support designing an optimal communication network on the Japan Radio Train Control (JRTC) systems. And this shows an example of a simulation result for a communication network system which has been constructed on an imaginary 4.7 km line.

By using these simulation tools, railway operators will be able to evaluate a large-scale communication network of the JRTC system, modeling a network configuration to a line planned to introduce it. And then, it will be able to reduce the burden for designing and testing of the system.

キーワード：無線式列車制御システム，通信ネットワーク，シミュレーション

Key Words：Japan Radio Train Control system, communication network, simulation

1. はじめに

近年の情報通信技術の進歩は目覚ましく、情報通信技術を用いて革新的なシステムを実現しようとする試みが鉄道分野の各方面でも進められている。列車の運転制御においては、システムの信頼度を向上させること、システムをより柔軟に運用すること、そして、保守コストを低減させることを目指し、無線式列車制御システムの開発と実用化が進められている¹⁾。

筆者らは、無線式列車制御システムにおける通信ネットワークの設計を支援すること、また、構築された通信ネットワークの信頼性や安定性などの性能を評価することを目的に、鉄道沿線の無線データ伝送品質も考慮した通信ネットワークの伝送品質をシミュレーションできるツールの開発を行っている。本稿では、開発したシミュレーション手法の概要と試行例を報告し、今後の展開について述べる。

2. 無線式列車制御システムにおける通信ネットワークの設計

2.1 無線式列車制御システム

無線式列車制御システムでは、各列車が自身の位置を検知し、その情報を地上の拠点となる制御装置（以下、拠点装置と呼ぶ）に無線で伝送する。拠点装置は、他の拠点装置と情報交換しながら各列車を追跡するとともに、ポイントや踏切などの沿線に存在する設備とも情報交換して、それら設備の制御や状態監視を行う。そして、拠点装置は、各列車の位置や、沿線に存在する設備の状態をもとに、それぞれの列車が安全に走行できる区間を判断し、停止目標となる位置（以下、停止限界）を無線で各列車に伝送する。各列車は、速度制限、勾配などの情報とブレーキ性能にもとづき、停止限界までに安全に走行するための連続的な保安速度パターンを設定する。走行速度が設定した保安速度パターンを超過した場合、その列車は自動的に減速を行う。

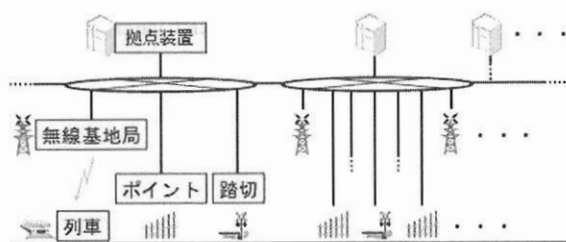


図1 無線式列車制御システムの構成イメージ

2.2 通信ネットワークの設計

無線式列車制御システムの構成は概ね図1のように表すことができるが、拠点装置を中心とする地上の通信ネットワークは、連動駅の数や沿線に存在する設備の数など、線区の規模によって種々の形態が存在する。拠点装置と各列車との間で安全に関わる制御電文を無線によって伝送するため、地上～車上間を結ぶ無線通信システムには高い伝送品質（サービスエリア、誤り率、伝送遅延など）が要求される。このような無線データ伝送回線を含む通信ネットワークの性能が劣化した場合、列車を即時停止させることによって安全性を確保することはできるが、それはアベイラビリティの低下をもたらすことになる。

したがって、所定の通信性能が確保できるように無線データ伝送回線を含む通信ネットワークを適切に設計する必要がある。特に、無線部分については、送信電力、通信距離、雑音、空間の伝搬損失などを考慮しながら採用する技術や方式、また基地局配置など無線システムに関するさまざまな仕様を決定する無線回線設計を行う。これによって決定される仕様は、無線回線を利用するシステムの目的や用途によって違いがあるうえに、同じシステムであっても導入する場所や線区の規模などによって異なる。また、まったく新しい無線システムを開発する場合、あるいは利用する無線周波数や環境の条件を変えてその導入を図る場合には、電波伝搬特性やデータ伝送品質の特性など基礎的なデータを収集したうえで無線回線設計を行う必要があり、無線システムの構築に至るまでには試作や試験に多くの時間とコストがかかる。

そこで、筆者らは、これらの無線データ伝送回線の設計に関わる負担を軽減し、かつ効率的な通信ネットワークの設計を支援できるようにすることを目的として、鉄道沿線における無線データ伝送品質を考慮した通信ネットワークの伝送品質をシミュレーションできるツールを開発することとした。

3. 通信ネットワークのモデル化とシミュレーションツールの構成

3.1 無線を含む通信ネットワークのモデル化

本シミュレーションツールに適用する通信ネットワークのモデルを図2に示す。無線式列車制御システム用の通信ネットワークモデルには、拠点装置、拠点LAN、現場端末、無線基地局、車上無線局、車上制御装置を用意し、1つの

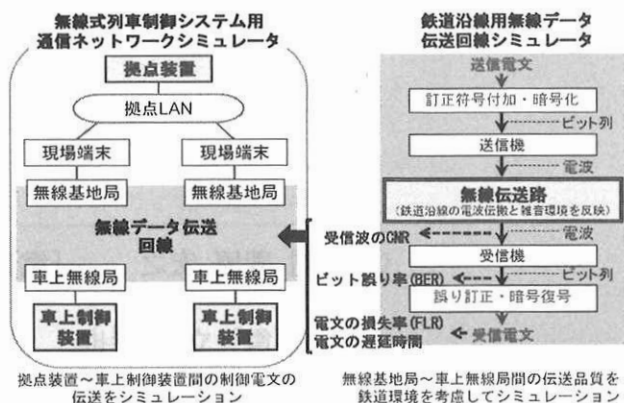


図2 通信ネットワークのモデル

拠点装置と複数の無線基地局とを接続する最も基本的な地上ネットワーク構成とした。この基本構成の地上ネットワークを接続していくことで、大規模なネットワークを構築でき、ツールを発展させるのも容易になるためである。

鉄道沿線用の無線データ伝送回線モデルは、鉄道の沿線で使用されるシステム全般に対応できるように、通信機能を階層構造に分割した OSI 基本参照モデルに準じて構成した²⁾。このモデルは、物理媒体にあたる無線伝送路サブモデル、物理層にあたる無線伝送回線サブモデル、そして、データリンク層にあたる無線伝送制御サブモデルの3階層で構成されている。無線伝送制御サブモデルと無線伝送回線サブモデルは、評価したいシステムに応じた符号化方式や変復調方式などをプログラム化することで、その動作を再現することができる。無線伝送路サブモデルは、無線の伝搬特性と雑音の混入を表現する部分であり、このサブモデルにおいて鉄道固有の環境に関する条件を反映する。

通信ネットワークモデルと無線データ伝送回線モデルは、それぞれを独立して扱い、モデル間でパラメータを共有させる構成にした。無線データ伝送回線モデルは、電波伝搬やビット・フレーム単位での伝送を扱う下位層に位置付けられるものであり、通信ネットワークモデルは制御電文を伝送する上位層に位置付けられる。このため、両者を単一のモデルに統一すると、異なる階層間に渡る複雑なモデルとなり、シミュレータの実装が困難になる可能性が考えられるためである。

このようにして、無線基地局～車上無線局間は無線データ伝送回線モデルを利用して制御電文を伝送しつつ、拠点装置～車上制御装置間は通信ネットワークモデルで制御電文を伝送することによって、鉄道沿線の環境を考慮した伝送品質を評価する。

3.2 シミュレーションツールの構成

本シミュレーションツールは、通信ネットワークシミュレータと無線データ伝送回線シミュレータの2つのシミュレータで構成され、通信ネットワークシミュレータは無線データ伝送回線シミュレータの結果を受け取って動作する。

(1) 無線データ伝送回線シミュレータ

無線データ伝送回線シミュレータは、通信回線モデルに

実績のある Scilab と呼ばれる行列計算ソフトウェアを使用し、図 2 の右側に示した各サブモデルの機能を関数として記述することによって構築した。シミュレータの実装にあたっては、鉄道特有の伝送環境条件として、列車走行に伴う電波伝搬への影響と、列車から放射される雑音の影響を考慮した。特に列車から放射される雑音は、列車の運転状態によって雑音の強度と発生頻度が大きく変動する。このため、シミュレータ上の雑音発生源（加法性白色ガウス雑音の発生関数）から出力される雑音の強度が、与えられたパラメータに応じて確率的に変化するモデルを考え、シミュレータに与える雑音に関するパラメータは実測によって把握することとした。

沿線において雑音の時間変化を実測した結果、地上側で受信する場合には、列車の通過に伴って無線基地局側で受信される雑音電力密度、および発生時間間隔と発生継続時間長が変化することが、また、車上側で受信する場合には、「停車」「力行」「力行・ブレーキ」の 3 状態において雑音強度が変動することが分かった。この測定結果から、雑音の発生を図 3 のようにモデル化し、各状態における雑音電力密度の値と、各状態の発生確率を無線伝送路サブモデル内の雑音発生源にパラメータとして与えることとした。

なお、電波伝搬損については、現行の回線設計で用いられている経験式による計算方法に加え、実測値や市販の電波伝搬シミュレーションソフトウェアの計算結果も反映できるように実装した。また、搬送波周波数と走行速度から、走行に伴う電波伝搬損の時間的な変動（フェージング）を考慮できるようにした。

さらに、複数基地局が存在する場合には、通信相手となる基地局の切り替えや、無線基地局から車上無線局における基地局間干渉も考慮できるようになっている。

このシミュレータでは、使用する無線通信方式（符号化方式、変調方式、搬送波周波数など）、基地局の条件（基地局位置、アンテナ高さなど）、列車走行条件（列車位置、走行速度など）を設定してシミュレーションを実行すると、伝送遅延時間の平均・分散、フレームロス率、ビット誤り率、見逃し誤り率などの統計値を列車の位置や速度ごとに出力する。

(2) 通信ネットワークシミュレータ

通信ネットワークシミュレータは OMNeT++ /

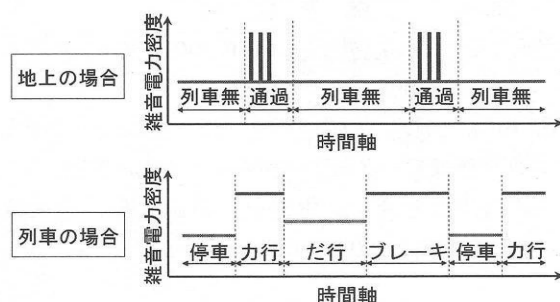


図 3 鉄道環境における雑音の発生モデル

OMNEST (以下、OMNeT と呼ぶ。)を使用して開発した。OMNeT は、離散事象型ネットワークシミュレータと呼ばれる汎用のシミュレーションソフトウェア環境である。図 2 の左側に示した各モデルを、OMNeT において具体的な機能を実現させるための部品であるモジュールとして定義しており、無線式列車制御システムの情報伝送に関わる機能を実装している。これは、地上・車上間でやり取りされる制御電文を生成する通信トラフィックの発生源、またはその中継装置としての機能であり、また、列車の走行パターンを与えて列車走行を模擬する処理や、無線基地局間を跨いで列車が走行する際に無線基地局を切り替えるハンドオーバーの処理も用意した。

シミュレーションは、制御電文の伝送順序、伝送エラーの有無、伝送のタイミングや遅延などの状況を記録する。そして、シミュレーション終了時には、これらの伝送状況出力する。

この結果を解析することで、鉄道の安全に関わる伝送システムの国際規格 IEC 62280 に定義されている 7 つのスロットのうち「なりすまし」を除く、「繰り返し」、「削除」、「挿入」、「順序入れ替え」、「書き換え」、「遅延」の 6 つのスロット発生の可能性を評価することができる。また、制御電文をシーケンスチャートに表して各装置がどのようなタイミングで送受信しているのかを確認することも可能である。これをもとにして無線式列車制御システムにおける制御遅延の状況を確認することも可能である。

4. シミュレーションの試行例

4.1 シミュレーション条件の設定

開発したシミュレーションツールにおいて、図 4 に示すような線区を設定してシミュレーションを実施した結果について述べる。これは、都市部として 4.7km の仮想的な線区を設定し、設定区間において A 駅 (0m) と B 駅 (2100m) 間を対象とした通信ネットワークを構築したものである。B 駅の機器室に拠点装置が設備され、ハブを介して A 駅および B 駅それぞれに設備した現場端末に接続されるスター型のトポロジーとした。そして、各現場端末は無線基地局

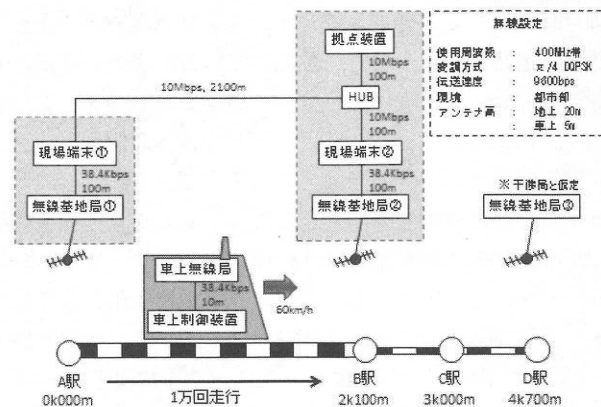


図 4 シミュレーション線区

と接続される。

無線データ伝送回線は、使用周波数を 400MHz 帯とし、 $\pi/4$ DQPSK の変調方式を用いた。伝送速度は 9600bps である。その他、伝送される制御情報にはフレームチェックシーケンスやリードソロモン符号などの符号化方式を適用した。また、無線基地局のアンテナ高さを 20m、車上無線局のそれを 5m とし、D 駅 (4700m) に干渉局を設置した。

まず、A 駅～B 駅間を 1 列車が 60km/h の等速で 1 万回走行させる内容で無線データ伝送回線シミュレータによる無線伝送シミュレーションを実施し、次に、その結果を通信ネットワークシミュレータに取り込んで同様に 1 万回走行させてネットワークのシミュレーションを実施した。

4.2 シミュレーション結果

このシミュレーションにより得られた無線基地局～車上無線局間のフレームロス発生率と、拠点装置および車上制御装置における通信断発生率の結果を図 5 に示す。図 5 より、駅間約 500m～1200m の区間で地上から車上への伝送におけるフレームロスが発生する状況が見られるが、拠点装置および車上制御装置においては、通信断の検知がなく、システムは安定して動作することがわかる。なお、このシミュレーションではフレームロスが連続 3 回発生するまで通信断と検知しないこととしている。

この結果を得るために要した時間は約 20 時間 (CPU=Core 2 Duo 2.5GHz, RAM=3GB) である。構築するネットワークの規模にもよるが、本シミュレーションツールを利用することにより、現車を用いた走行試験では実施が困難な試験条件でも容易に試行することができ、短時間で伝送品質の評価を実施できることが期待できる。

5. 今後の展望と課題

本稿で述べたシミュレーションは 1 つの拠点装置によるシンプルな通信ネットワーク構成であるが、実際の無線式列車制御システムでは複数の拠点装置が存在し、これら拠点装置間を結ぶ大規模な通信ネットワークが構築される。現在、本シミュレーションツールを発展させて複数拠点装置間の通信ネットワークをモデル化して、大規模な無線式列車制御システムのシミュレーションを実施できるように改修を進めている。また、独立している無線データ伝送回線シミュレータと通信ネットワークシミュレータとを統合して、鉄道事業者自身で扱うことができる通信ネットワーク評価システムへと展開していく予定である。さらには、汎用的な通信技術も適用できるようにシミュレータを構築すれば、無線式列車制御以外の通信ネットワークシミュレーションにも活用できる。これに伴う主な課題として、

- 下位層のプロトコルを充実させ、冗長構成などの様々なトポロジーの通信ネットワークを構築して検証できるようにすること
- ネットワーク上の障害発生およびその対策を検証できるようにすること

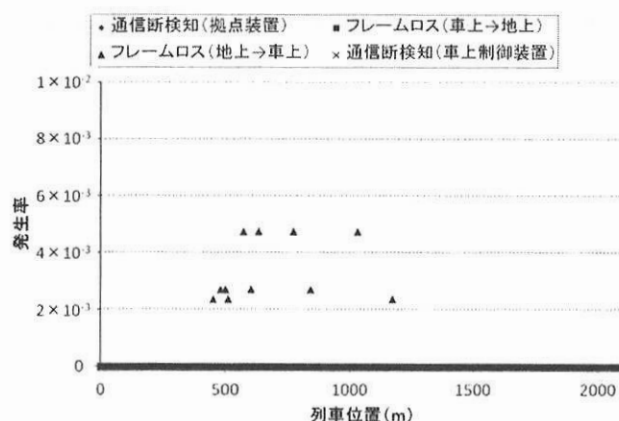


図 5 フレームロスおよび通信断発生率

- シミュレーション条件を容易に設定できるようにするとともに、ネットワークのパラメータを実稼働している無線式列車制御システムと連携できるようにすること
- 無線 LAN などの汎用的な無線通信技術と方式を適用した場合の動作について考慮できるようにすることが挙げられる。これらの課題を解決していくとともに、実際の無線式列車制御システムとシミュレーションツールとの比較を行い、シミュレーション結果の精度を高めていく予定である。

6. おわりに

本稿では、開発したシミュレーション手法と、1 つの拠点装置と複数の無線基地局とで構成した基本的な地上ネットワーク構成による通信ネットワークのモデル化と実装を行い、仮想的な線区を設定してシミュレーションした結果について報告した。今後の展開として大規模な無線式列車制御システムのシミュレーションを実施できる通信ネットワーク評価システムへと展開していく予定である。

無線式列車制御システムの導入前に、構築したい通信ネットワークの性能とそのシステムの挙動を予測できることの重要性が増してくるものと考え、本シミュレーションツールによって、鉄道事業者自身が導入したい線区全体の通信ネットワークの状況を確認できるようになり、システム開発における設計作業や試験にかかる負担の軽減に役立てられるものと考え、

参考文献

- 1) 財団法人 日本規格協会 : JIS E 3801「無線式列車制御システム」, 2009.
- 2) 関, 川崎, 加藤, 立石, 高荷, 宮木 : 回線設計を指向した対列車無線データ伝送回線のモデル化と実装, 第 15 回 鉄道技術連合シンポジウム演説文集, 論文番号 044-S7, pp.201~204, 2008.