

無線式列車制御システム用 通信ネットワーク性能シミュレータの開発

菅原 宏之* 川崎 邦弘**
中村 一城** 祇園 昭宏*

Development of Communication Network Simulator
for Train Control System Using Radio Communication

Hiroyuki SUGAHARA Kunihiro KAWASAKI
Kazuki NAKAMURA Akihiro GION

In order to support designing a suitable communication network on a train control system using radio communication, we have developed a communication network simulator for evaluating a transmission quality of communication network with due consideration on a quality of radio data transmission in a railway line environment. We have constructed a basic communication network, consisting of one ground equipment and two radio stations, and then evaluated the train control system performance of data transmission delay and a continuity of system operation. The result of development is reported in this paper.

キーワード：無線式列車制御システム，通信ネットワーク，シミュレータ，信頼性，性能評価

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、システムの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) 2)}。

無線式列車制御システムでは、地上と列車との間で安全に関わる制御情報を無線によって伝送するため、無線によるデータ伝送回線を含む通信ネットワークの性能がシステムの信頼性に直結する。通信性能が劣化した場合、列車を即時停止させることにより安全性を確保することはできるが、それはシステムのアベイラビリティ低下をもたらすことになる。そのため、構築される通信ネットワークには高い伝送品質が要求される。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が、鉄道環境を考慮して最適な設計を導くには多くの時間とコスト、経験等が必要となるうえ、現車試験による性能評価にも限界がある。このため、余裕を持たせた設計になってしまい、高コスト、高スペックの無線システムやネットワーク構成となってしまう可能性がある。

* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

そこで、筆者らは、無線式列車制御システムにおける無線データ伝送回線の設計、および通信ネットワークの設計を効率的に支援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も考慮した通信ネットワークの信頼性や安定性等の性能を評価することが可能なシミュレータを開発している。本稿では、開発したシミュレータの概要と、そのシミュレータを用いた通信ネットワークの評価手法について述べて、テストシステムを設定して基本的な通信ネットワークをシミュレータ上に構築した場合のシミュレーション試行結果について報告する。

2. 無線回線を含む通信ネットワークのモデル化

2.1 シミュレータ開発の範囲と前提条件

無線式列車制御システムの構成は、例として図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、線区の規模やシステムに対する要求仕様、あるいは沿線の環境に合わせて構築されるため、種々の形態が存在する。線区全体の通信ネットワークをモデル化するためには、それらの沿線環境や線区規模も考慮する必要があるため、一度に全体をモデル化することは困難であり、また、異なるネットワーク構成への変更も難しくなる恐れがある。そこで、無線式列車制御システムを構成する通信ネットワークの最も基本的な単位と考えられる拠点装置と車上制御装置間の通信ネットワークをモデル化した。この基本単位でシミュレーショ

特集：信号通信技術

ン実行環境を構築すれば、線区全体の通信ネットワークはこの拠点装置と車上制御装置間の通信ネットワークを複数接続することによって扱うことができ、容易に発展させることが可能となる。なお、シミュレーション実行環境の構築にあたっては、以下のような前提条件を設定した。

- (1) 無線式列車制御システムの基本構成は、JIS E 3801¹⁾ ²⁾ に定めるシステム構成に準じる。
- (2) 拠点装置は1台、列車は複数列車を扱う。
- (3) 拠点装置配下のネットワークには無線基地局のみが接続される。
- (4) 拠点装置配下のネットワーク構成は、通信プロトコルに依存しない。
- (5) 無線データ伝送回線のモデルは、既開発の無線データ伝送回線シミュレータ³⁾のモデルを活用する。

2.2 通信ネットワークモデルの構築

前節で述べた範囲と前提条件に基づいて構築したモデルを図2に示す。通信ネットワークのモデルを構築するにあたり、既開発の無線データ伝送回線シミュレータ

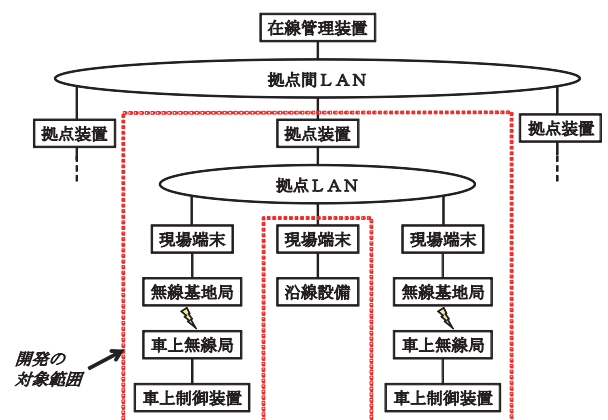


図1 無線式列車制御システムにおける伝送システムモデルの全体構成と開発対象範囲

を活用し、無線データ伝送回線の伝送品質のシミュレーション結果を通信ネットワークのシミュレーションに反映できるようにした。拠点装置、拠点LAN、現場端末、無線基地局、車上無線局、車上制御装置から無線式列車制御システムの通信ネットワークを構成し、無線基地局と車上無線局間の伝送部分は無線データ伝送回線シミュレータのモデルを利用する(図2右側)。無線データ伝送回線モデルは、電波伝搬やビット単位およびフレーム単位での伝送を扱う物理的な部分をモデル化したものであるが、拠点装置と車上制御装置間の通信ネットワークモデルは、制御電文の伝送を扱う論理的な部分をモデル化したものである。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ある。そこで、それぞれを独立したモデルとして構築し、モデル間でパラメータを共有させる方式とした。このモデルでシミュレータを実装したことにより、既開発の無線データ伝送回線シミュレータを発展的に活用することが可能となった。

3. シミュレータの実装と構成

3.1 通信ネットワークモデルに基づくシミュレータの実装

構築したモデルにしたがって通信ネットワークの性能を評価するためのシミュレータを実装した。この実装作業には、OMNeT++/OMNEST⁴⁾(以下、OMNeTと呼ぶ。)を使用した。OMNeTは、分散事象型ネットワークシミュレータと呼ばれるシミュレーション環境である。シミュレーション実行時のアニメーション機能や実行後のログからシーケンスチャートを作成するツールを持っており、送受信の様子を詳細に解析することが可能である。

実装したシミュレータの構成を図3に示す。無線式列車制御システムの仕様に基づいた通信ネットワークの

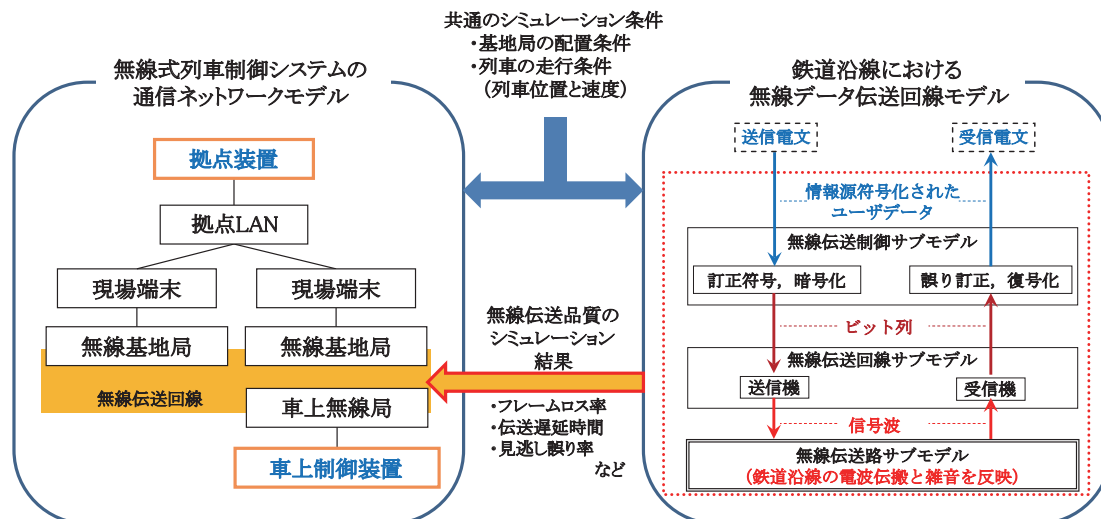


図2 通信ネットワークのモデル

シミュレーションを実施できるようにするため、拠点装置と車上制御装置間の伝送処理を行う機能に焦点をあててプログラムを作成した。各装置には、指定したタイミングにしたがって制御電文を送信する機能を持たせており、そのタイミングを指定するためのパラメータとして、伝送周期や装置内部での処理に要する時間を設定する。

また、装置間を接続するケーブル長を設定することで、伝送遅延時間を算出する機能を持たせている。これにより、装置間で送受信される制御電文の経過時間を記録する。なお、無線基地局と車上無線局間の無線区間の伝送は、無線データ伝送回線シミュレータの結果を利用して、制御電文の損失有無の判定や無線伝送における伝送遅延時間を取得する。

その他、位置、速度、時刻のデータによる走行パターンを用いて列車の走行を模擬する処理に加えて、無線基地局間を跨いで列車が走行する際に伝送を継続できるようにするため、無線基地局を切り換えるハンドオーバーの処理、後述する脅威による影響を把握するため、送受信時において制御電文に異常を発生させる機能も持つ。

通信ネットワークの構築は、ネットワークの構成を定義するシミュレーション条件を準備し、シミュレータに設定することで行われ、1つの拠点装置と複数の無線基地局とが接続される通信ネットワークを構築することが可能となっている。

シミュレーションを実行すると、シミュレーション時刻の進行に応じて車上制御装置が走行パターンから取得した位置と速度の情報で構成した制御電文を拠点装置に伝送し、拠点装置は列車を追跡して列車に対する指示情

報で構成した制御電文を車上制御装置に伝送する。走行パターンの終点まで到達した列車は即座に開始点に移って走行を継続する内容にしており、繰り返し走行するシミュレーションを実施できるようにした。

指定した時間に達するとシミュレーションは終了し、各装置における制御電文の送受信回数、損失の有無、送受信のタイミング等の伝送状況を出力する。

3.2 無線データ伝送回線シミュレータの改修

無線データ伝送回線シミュレータは、1つの無線基地局と1つの車上無線局の間を対象として、MATLAB 互換の行列計算ソフトウェアである Scilab⁵⁾ を用いて開発を行ったものである。これを複数の無線基地局と複数の車上無線局の間の伝送を扱うことが可能のように改修した。

表1に主な改修内容を示す。複数の無線基地局と複数の車上無線局は、列車の位置と走行速度を変えながら通信相手の無線基地局を切り替えていく処理を追加し、無線基地局から車上無線局への伝送は、複数の無線基地局間の干渉を考慮できるようにした。この他、変調方式やフレームフォーマットの拡充、走行速度を考慮した電波伝搬の変動を模擬する等、より現実に近いシミュレーションが実行できるように機能を拡張した。また、計算速度の向上も図った。

改修の結果、無線回線の設計のみを対象とする場合は、無線データ伝送回線シミュレータ単体でもシステム導入線区全線を対象としたシミュレーションが実施可能となった。また、列車制御システム以外の用途で狭帯域の無線システムを導入する場合にも適用が可能である。

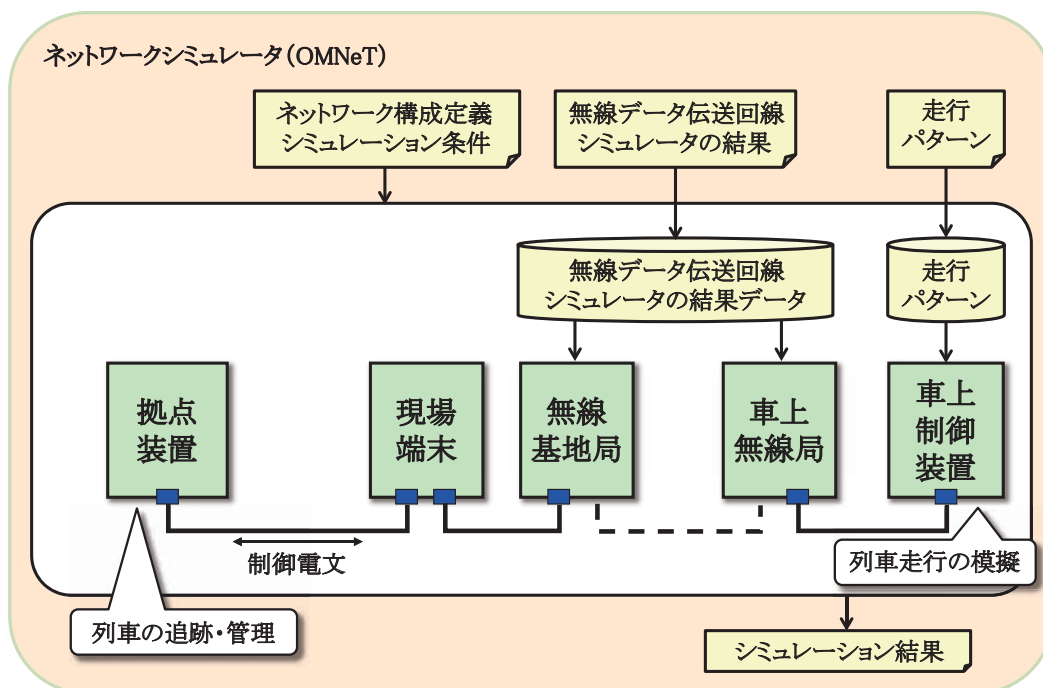


図3 無線式列車制御システム用通信ネットワークシミュレータの構成

特集：信号通信技術

表1 無線データ伝送回線シミュレータの主な改修内容

項目	改修内容
対応 基地局数	1局のみ配置 → 複数局の配置
列車走行 の模擬	無線基地局と車上局 間の距離のみ模擬 → キロ程に基づく置局配 置と列車走行を模擬
走行速度 の反映	速度に関係なく フェージングによる レベル変動を模擬 → 速度に応じてレベル変 動の早さを変化させて 模擬
変調方式	QPSK, 16QAM → QPSK, 16QAM, $\pi/4$ DQPSK, BPSK

4. 通信ネットワークの性能評価

4.1 評価手法の検討

4.1.1 IEC 62280 の概要

IEC 62280 は、IEC（国際電気標準会議）によって2002年に初版が発行された国際規格であり、鉄道の信号通信システムにおける保安伝送に関する基本的な要求事項と考え方を規定している。IEC 62280 は2つのパートから構成される。パート1は専用の有線回線（使用者が限定され、状態や流れる情報を完全に把握できる）を使用する場合を対象としており、障害事象の要因として情報の誤りや時間的な誤りを想定し、その対策に18の要求事項を定めている。一方、パート2では、列車無線・無線LAN・携帯電話などの無線伝送、有線の公衆網、インターネットといった使用者が限定できない伝送路を使用する場合を対象となっており、障害事象の要因として、次の7つのスレット（脅威）を想定している。

- (1) 電文の繰り返し (Repetition)
- (2) 電文の削除 (Deletion)
- (3) 電文の挿入 (Insertion)
- (4) 電文の順序入れ替え (Re-sequence)
- (5) 電文の書き換え (Corruption)
- (6) 電文の遅延 (Delay)
- (7) 電文のなりすまし (Masquerade)

無線データ伝送回線の多くは空間を伝搬する電波を使用するため、使用者が限定できないケースもありうる。そこで、パート2に準じて、脅威が発生する確率や、脅威が発生した場合におけるシステムの挙動を評価する手法について検討した。

4.1.2 対象とする評価指標と評価手法

対象とする評価指標は、IEC 62280 のパート2に定義されている7つの脅威のうち“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つの脅威を考慮して、表2に示す項目を設けた。

①の制御電文の順序性の評価は、地上・車上間で伝送される制御電文が正しい順序でやり取りされるかどうかを見るものである。各装置にIDを設定し、制御電文を

送信するときに送信元として自装置のIDを、宛先に送信先装置のIDを付加する。そして、受信側装置においてこれらのIDを見て信憑性を確認する。また、制御電文には通番を用意し、各装置が制御電文を送信する毎に1つ値を増加させる。そして、受信側装置において通番の順序を監視する。拠点装置および車上制御装置における制御電文受信時の通番を記録し、かつ今回受信時の通番と前回受信時の通番との差も記録して、制御電文の受信順序を把握する。この評価を行うことにより、“繰り返し”、“挿入”、“順序入れ替え”の3つの脅威に対応する。

②の制御電文の廃棄率の評価は、地上・車上間で伝送される制御電文が無駄なくやり取りされるかどうかを見るものである。各装置が送信する制御電文の数、および受信する制御電文の数を記録しており、制御電文が装置内で廃棄されたか、伝送路上で廃棄されたかを把握する。これにより、装置の制御処理上の問題となるか、伝送路上での問題なのかを切り分け、廃棄されてしまう制御電文の状況を確認する。この評価を行うことにより、“削除”、“書き換え”の2つの脅威に対応する。

③の伝送遅延の評価は、地上・車上間で伝送される制御電文がどの程度遅れるかを把握するものである。装置が制御電文を送信するときにシミュレーション上の時刻を付加しており、受信側装置において制御電文を受信したときのシミュレーション時刻との差を求める。さらに、装置の処理周期を考慮した時間も加味する。通信ネットワークシミュレータでは、拠点装置が送信した制御電文が車上制御装置に到達して、その応答としての制御電文が帰ってきて制御に使われるまでの時間を計測・記録し、これをターンアラウンドタイムのヒストグラムとして作成することで、システムの応答性能を評価する。この評価を行うことにより、“遅延”の脅威に対応する。

④のシステム動作継続性の評価は、システムが安全側動作に遷移せずに、通常動作を続けるかどうかを把握するものである。拠点装置と車上制御装置には、規定された回数以上連続して制御電文の受信がない場合に、通信断として検知する処理を持たせた。この通信断検知の発生を記録することにより、システムが安定して動作するかどうかを把握する。通信ネットワークシミュレータでは、無線基地局と車上無線局の間におけるフレームロスの発生状況と、拠点装置および車上制御装置における通信断の発

表2 評価指標と対応する脅威の例

項目	手法	対応する脅威
① 制御電文の順序性	通番の順序を記録	繰り返し, 挿入, 順序入れ替え
② 制御電文の廃棄率	送受信数を記録	削除, 書き換え
③ 伝送遅延	送受信の時刻を記録	遅延
④ システム動作継続性	通信断の発生確率を算出	—

生状況を列車位置に対する発生確率として表示する。

5. シミュレーションの試行

5.1 目的

ここでは、前章までに構築・開発したシミュレータ、および検討した通信ネットワークの評価手法の有効性を確認するため、テストシステムを設定して基本的な通信ネットワークをシミュレータ上に構築し、そのシステムに対して要求される仕様を想定して、それが満たせるか否かの評価を試行した。

5.2 対象とするシステムの通信ネットワーク構成

想定したテストシステムの通信ネットワークは、拠点LANにイーサネットを使用することを想定して図4のように構成した。拠点装置と現場端末との間はスイッチングハブを介してスター形に接続し、装置間の設置距離が離れている場合は、メディアコンバータを介して光電変換することにより伝送距離を確保することを想定した。なお、このスイッチングハブとメディアコンバータは伝送遅延のない理想的な機器として扱った。

装置間の距離は、想定線区のキロ程に基づいて設定したが、同一キロ程に設置される場合は、イーサネットの100BASE-TXなどに使われるツイストペアケーブルの最大伝送距離（100m）で設定し、車上無線局と車上制御装置間は車内であることを考慮して10mとした。

5.3 要求仕様の想定

テストシステムの要求仕様を以下のように想定した。

- (1) 地上・車上間無線伝送周期 = 1 秒
- (2) システム制御遅延許容時間 = 3 秒以内
- (3) 制御電文損失許容回数 = 連続 2 回（3 回連続して制御電文を損失した場合、通信断を検出する。）
- (4) 無線のカバーエリア：全線の 100%
- (5) 無線における許容フレーム損失率： 10^{-3}

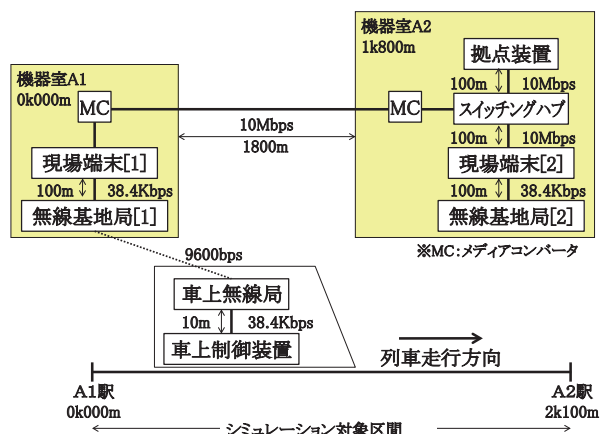


図4 テストシステムのネットワーク構成

5.4 シミュレーションシナリオと条件

無線式列車制御システムの特徴は地上・車上間で無線を用いて安全に関わる制御情報を交信するものである。このため、シミュレーションを実施するシナリオは無線通信の部分に着目し、

シナリオ①：両無線基地局が正常な場合

シナリオ②：無線基地局 [2] が故障した場合

によって、制御電文の伝送遅延およびシステム動作継続性を評価する。このシナリオに適用したシミュレーションの条件を表3に示す。

表3 シミュレーション条件

項目	設定値
対象区間	A線区（A1駅～A2駅） 0k000m～2k100m
拠点装置数	1
拠点LAN	イーサネットを想定
現場端末数	2
無線基地局数	2
列車数	1
ハンドオーバー地点	0k400m
走行パターン	A1駅発→95km/h等速→A2駅停車
走行回数	1万回
誤り訂正方式	RS
変調方式	$\pi/4$ DQPSK
変調速度	9600bps
ダイバーシチ方式	最大比合成
搬送波周波数	300MHz帯
アンテナ高さ	地上：10m, 車上：5m
沿線の雑音環境	郊外地（雑音少なめ）
電波伝播モデル	フェージング：仲上ライス分布 シャドウイング：対数正規分布 パスロス：EGLI式

5.5 シミュレーション試行結果

伝送遅延を評価するために、拠点装置が制御電文を送信してから応答としての制御電文が返ってきて制御に使われるまでのターンアラウンドタイムを求めた。さらに、システム動作継続性を評価するために無線基地局と車上無線局の間で発生したフレームロスの発生確率と、拠点装置および車上制御装置間で発生した通信断検知の発生確率を整理した。これらのグラフを図5～図8に示す。

伝送遅延は両シナリオともに、1～2秒の遅れで制御する状況となっている。この遅延時間は、列車の運行密度や緊急停止等の制御に影響することになるが、問題ない遅延時間だと考えられる。なお、3秒以上の遅延がなく、要求仕様を満足する結果となった。

システムの動作継続性について、シナリオ①ではハンドオーバー地点付近において、シナリオ②では故障した無線基地局 [2] が設置されている付近で地上から車上方向への伝送にフレームロスが発生している。これは、無

特集：信号通信技術

線伝送距離が長くなることによる伝送品質の劣化から生じているものであるが、このようにフレームロスが発生していても、拠点装置および車上制御装置には通信断が発生しておらず、システムは安定して動作する結果となった。制御電文の損失許容回数を小さくすると頻繁に列車が停止する状況となり、多くすると制御電文の送受信が無くても列車は動き続けることが可能になるため、通信ネットワークの構成とともにシステムの仕様を適切に設定することが重要である。

6. まとめ

無線式列車制御システムにおける無線データ伝送回線の設計、および通信ネットワークの設計にかかる負担を軽減し、かつ効率的にこれらのネットワーク設計を支援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も考慮した通信ネットワークの信頼性や安定性等の性能を評価することが可能なシミュレータを開発していることを述べた。これにより、無線式列車制御システムの1つの拠点装置と複数の車上制御装置間の通信性能をシミュレーションし、通信性能の劣化による列車制御への影響を評価することが可能となった。本成果により、安全性やコスト、電波法などの制約により現車試験では実行できないような条件下での試行が可能である。また、本成果を利用して通信ネットワークを設計することにより、仕様の最適化や試験項目の削減等、システム構築にかかるコストの低減が期待できる。なお、無線データ伝送回線シミュレータについては、システムを導入する線区全体を対象とした伝送品質のシミュレーションが可能な汎用的なツールとなっている。これにより、列車制御システムに限らず、狭帯域無線を鉄道に導入する際の無線回線の設計や評価の支援にも活用が可能である。また、広帯域無線伝送への展開も検討している。

今後は、実際のシステムとの比較を行ってシミュレータの精度を高めつつ、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システムのシミュレーションを実施できるようにシミュレータを拡張する予定である。

文献

- 1) JIS E 3801-1「無線式列車制御システム—第1部：一般要求事項及び機能要求事項」
- 2) JIS E 3801-2「無線式列車制御システム—第2部：システム要求仕様」
- 3) 中村一城, 川崎邦弘, 関清隆：鉄道沿線における無線伝送回線シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.47-52, 2010
- 4) <http://www.omnest.com/>
- 5) <http://www.scilab.org/>

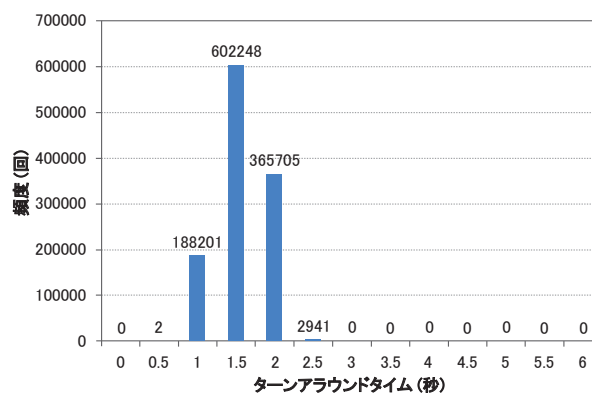


図5 シナリオ①の伝送遅延状況

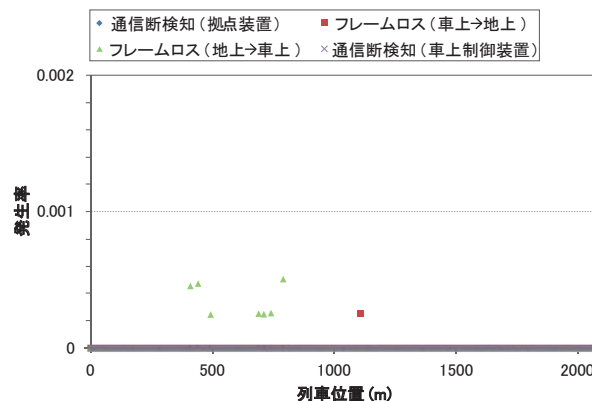


図6 シナリオ①のフレームロス, 通信断発生状況

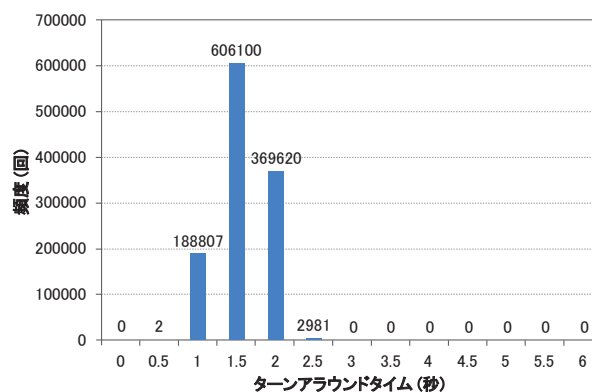


図7 シナリオ②の伝送遅延状況

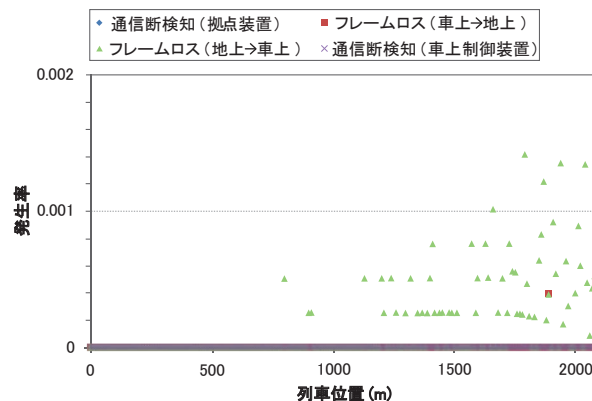


図8 シナリオ②のフレームロス, 通信断発生状況