

鉄道沿線における無線伝送回線シミュレータの開発

中村 一城* 川崎 邦弘* 関 清隆**

Development of Radio Transmission Line Simulator along a Railway

Kazuki NAKAMURA Kunihiro KAWASAKI Kiyotaka SEKI

When railway operators introduce and modify the radio communication systems for railways, it is necessary to design the radio circuits. The circuit design needs a great effort, and it is occasionally difficult to design with a high quality. In this paper, we report for developing the radio transmission line simulator along a railway to support the radio circuit design. First, we made a model that consists of three sub-models for radio transmission line. This model enables to consider the effect of the noise adjacent to the railway environment. Eventually, we developed a simulator based on the prepared model, and performed a basic simulation.

キーワード：無線伝送回線，シミュレータ，回線設計，モデル化，雑音，無線列車制御システム

1. はじめに

無線を通信路として利用する通信システムを構築する場合、無線通信回線を構成する装置に採用する技術・方式、置局や送信出力等を設計する無線回線設計が必要となる。既存の無線通信システムの回線設計については、その手法がある程度確立されていることが多いが、全く新しい無線通信システムを開発する場合や、無線周波数や環境条件を変えて無線通信システムの導入を図る場合には、過去の経験や類似の事例を参考にしてその都度回線設計を行うことが多い。しかし、実際に導入する環境に合った設計は難易度が高く、その作業には多大な労力を要する。そこで、実測等を含む無線回線設計にかかる労力を極力減らし、かつ、現実の導入環境の条件を考慮してより精度の高い無線回線設計を支援するための手段として、シミュレーション技術の活用が望まれている。

これまでにも、電波伝搬特性を推定するためのシミュレータが多数開発され、販売されている。鉄道総研においても、多波干渉モデルをベースとして、鉄道特有の条件（駅、トンネル、跨線橋などの構造物による伝搬損等）を反映できる鉄道沿線向け電波伝搬シミュレータを開発してきた^{1) 2)}。しかし、これらは電界強度の瞬時変動や距離特性を推定することを目的として開発されたものであり、無線によるデジタルデータの伝送品質を予測・評価する手法とは直接結びつけられていない。

そこで筆者らは、無線回線設計を支援するとともに、将来的には無線回線設計や無線通信システム全体の設計

をより簡易に最適化できるよう、伝送路から通信プロトコルまでを包含し、通信システム全体のエンドツーエンドにおける伝送品質を推定するシミュレータの開発を目指すこととした。本稿ではその最初のステップとしてデータ伝送回線を対象に開発した無線伝送回線シミュレータ（以下無線データ伝送回線シミュレータ）について述べる。

2. シミュレータ開発の前提条件

無線データ伝送回線シミュレータの開発に当たり、まず無線列車制御システムにおける伝送システムをターゲットとすることとし、当面の対象として以下のような前提条件を設定した。

- (1) 対象は、無線によるデータ伝送を行う部分（無線基地局～車上無線局間）とする（図1）。その前後（地上の有線データ伝送回線，車内ネットワーク等）は別のデータリンクとして扱うことができるため、本

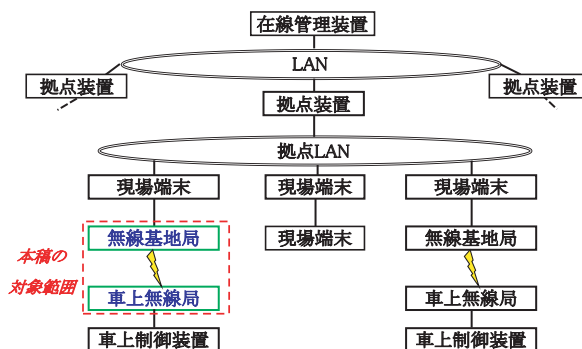


図1 無線列車制御システムにおける伝送システムモデルの全体構成と本稿の対象範囲

* 信号通信技術研究部（通信）

** 信号通信技術研究部

特集：信号通信技術

検討の対象には含まない。将来的には、無線列車制御システム全体のデータ伝送システム、さらに鉄道の沿線で使用される通信システム全体へ拡張することを目標とする。

- (2) 対象とするプロトコル階層は、データリンク層以下とし、ユーザデータは、すでに情報源符号化を施された上で本モデルに入力されるものとする。ただし、リアルタイム制御のための無線通信システムを主に対象とするため、コネクション型プロトコル(リンクの確立、応答確認等)は考慮せず、フレーミングやマルチプルアクセスを対象とする。また、モデル化に当たっては、OSI基本参照モデルに準じた構成とする。
- (3) UHF/VHF帯の狭帯域デジタル無線を対象とする。

3. 無線データ伝送回線のモデル化

2章で述べた前提条件を考慮して無線データ伝送回線のモデル化を行った。構築した無線データ伝送回線モデルの全体構成を図2に示す。本モデルでは、無線によるデータ伝送回線を、無線伝送路、無線伝送回線、無線伝送制御の3階層構造とし、階層ごとにサブモデルを構築することとした。これらの3階層はそれぞれ、下位層から順に、物理媒体、物理層、データリンク層に対応して

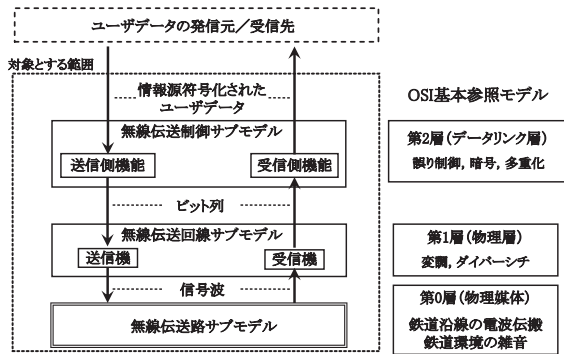


図2 無線データ伝送回線モデルの全体構成

いる。また、各サブモデルの内部には、伝搬路モデル、雑音モデルなどの構成要素レベルのモデルが含まれる。

3.1 無線伝送制御サブモデル

無線伝送制御サブモデルの構成を図3に示す。無線伝送制御サブモデルには、誤り訂正符号や誤り検出符号等の符号/復号機能、暗号化等の秘話機能、複数の論理チャネルを1つの物理フレームに統合する多重化/多重分離機能が含まれる。本モデルでは、無線列車制御システムを表現するために、暗号化の前後に符号化機能を設定している。たとえば、図3における伝送路符号化1および伝送路復号1では誤り検出符号が、伝送路符号化2および伝送路復号2では誤り訂正符号が採用されることを想定している。該当する機能が存在しないシステムについては、「ヌル」機能(何もしない機能)があるものとみなす。

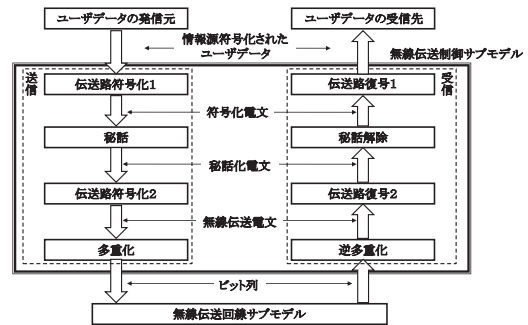
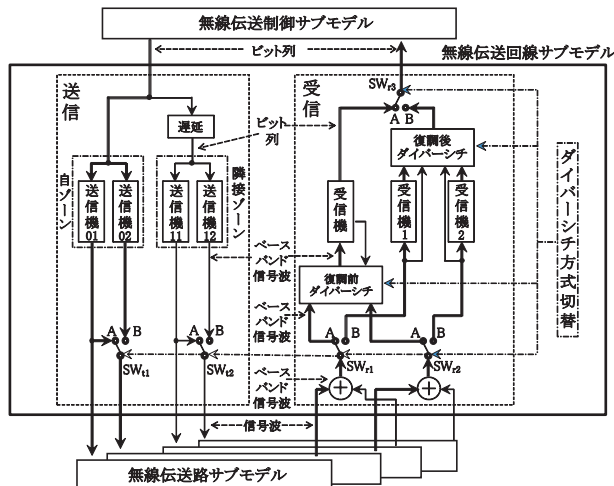


図3 無線伝送制御サブモデル

3.2 無線伝送回線サブモデル

無線伝送回線サブモデルの構成を図4に示す。無線伝送回線サブモデルには、変復調機能、ダイバーシティ機能等が含まれる。本モデルでは、各種のダイバーシティ方式を包含したモデルを表現するために、スイッチにより方式の選択を行えるようにしている。また、同一システム内での基地局間干渉を表現できるように考慮している(図4中の⊕)。なお、受信機内で発生する雑音も無線伝



ダイバーシティ方式	モデルの設定			
	送信機	受信機	復調前ダイバーシティ	復調前ダイバーシティ
空間・アンテナ選択式	A A	選択		
空間・合成式	A A	合成		
空間・復調後選択式	A B		選択	
空間・復調後合成式	A B		合成	
周波数・選択式	B B		選択	
周波数・合成式	B B		合成	
時間・選択式	B B		選択	
時間・合成式	B B		合成	

図4 無線伝送制御サブモデル

送回線サブモデル内で考慮することが基本となるが、次節で述べる無線伝送路サブモデル内の雑音発生源に転嫁することも可能である。

3.3 無線伝送路サブモデル

無線伝送路サブモデルの構成を図5に示す。無線伝送路サブモデルは、無線の伝搬特性及び雑音の混入を表現するものであり、このサブモデルにおいて鉄道固有の環境条件等を反映することになる。鉄道固有の環境条件としては、電波伝搬に関しては線路構造や駅舎等による影響が、雑音に関しては列車の走行に伴う放射の影響がある。特に鉄道沿線や列車上で受信される雑音は、列車の運転状態によって強度と発生頻度が大きく変動する。これらを考慮した雑音源のモデル化については、4章で詳しく述べる。伝搬路モデルについては、送受信点間の距離や周波数に応じた伝搬損を算出し、それを送信信号波に乗じて受信信号波を算出する構成とした。

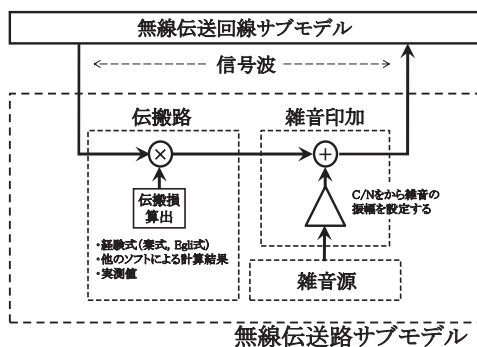


図5 無線伝送路サブモデル

4. 雑音レベルの把握とモデル化

データ伝送の品質をシミュレーションするうえで欠かせないパラメータの一つに雑音強度がある。データ伝送の品質は、受信機に入力される信号強度と雑音強度の比で決定される。このため、無線回線設計をする際には、信号強度を決定する伝搬損だけでなく、雑音強度の影響も考慮する必要がある。雑音強度を示す値としては、空間中における電界強度値や、受信アンテナに入力される雑音電力値があるが、無線回線設計やデータ伝送品質のシミュレーションに必要な値は雑音電力密度である。雑音電力密度は、受信機に入力される単位ヘルツ当たりの雑音電力を表す値であり、雑音の振幅分布が正規分布に従う場合、雑音振幅の分散 σ^2 が雑音電力密度に相当する。

鉄道環境では、列車の有無や運転状態によって雑音の発生状況が異なるため、図5に示した無線伝送路サブモデルにおける雑音源は、雑音電力密度が時間的に変動する雑音源として表現する必要がある。

そこで、鉄道沿線および車上における雑音電力密度値と発生頻度（＝雑音電力密度が定常的な状態よりも上昇

する割合）を実際に測定し、後述する雑音源の実装の際に反映することとした。測定は表1に示すような条件下で測定した。なお、表1中に示した都市線区、郊外線区とは以下のような区間をいう。

- ・都市線区：建造物や雑音源が多い都市部と、建造物や雑音源が少ない郊外部の双方を含む線区
- ・郊外線区：郊外部のみで都市部を含まない線区

表1 測定条件

伝送方向	・地上一車上（車上受信） ・車上一地上（地上受信）
場所	・都市線区（都市部、郊外部） ・郊外線区（郊外部）
周波数	・VHF帯（170MHz帯） ・UHF帯（350MHz帯/700MHz帯）
電化方式	・直流

※地上一車上の郊外線区はデータ未取得

4.1 測定結果

測定の結果、車上受信側は、列車の走行に伴って雑音電力密度が大きく変動しており、雑音の発生状態を電車の運転モードに依存した、停車、だ行、力行・ブレーキの3つに分類できること、VHF帯（170MHz帯）の方がUHF帯（350MHz帯）より雑音電力密度が高いことなどが分かった。また、郊外部と都市部とでは雑音電力密度に大きな差異がないことが分かった。これは、車上で受信される雑音が、周囲環境から到来するものよりも、自車から発生するものが支配的になっているためと考えられる。さらに、時間帯による明確な差異も見られなかった。

一方、地上受信側については、UHF帯（350MHz帯、700MHz帯）では列車通過に伴う時間変動が少なく、雑音電力密度がほぼ一定と見なせることがわかった。これに対しVHF帯（170MHz帯）では、雑音電力密度が列車通過中にパルス状に上昇することが分かった。さらに、雑音電力密度が上昇する時間の割合が、都市線区と郊外線区で異なることが分かった。そこで、170MHz帯での測定結果から、1列車が通過する時間を1とした場合に通過の最中に雑音が発生する割合の平均を求めたところ、都市線区で約0.7、郊外線区で約0.25であった。

これらの測定の結果から、鉄道環境で受信される雑音

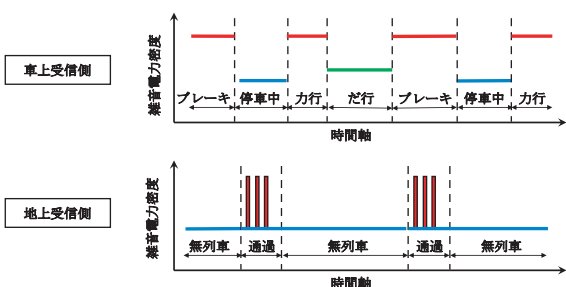


図6 測定結果に基づく雑音発生のモデル化

ブモデルの伝搬路モジュールをScilab上で構築するにあたっては、以下の考え方で実装した。

- (a) Scilabでプログラムを作成し、伝搬損を計算する際に計算方法を指定して呼び出す。
 ……上記(1)～(3)
- (b) 外部プログラムで計算した電波伝搬特性のデータをシミュレーションに反映させる機能を持たせる。
 ……上記(4)

具体的には、外部の電波伝搬シミュレーションソフトによって求められた、伝搬パス数と各伝搬パスごとの伝送損および直達波からの伝搬遅延時間もしくは行路差を使って受信信号強度を計算する。この方法により、様々なパスモデルによる電波伝搬シミュレーション結果が利用できるほか、遅延プロファイル等の実測データを使うことも可能となる。

5.2.2 雑音源の実装

雑音源については、図7に示した雑音源モデルに基づいて実装を行った。ただし、列車の状態を考慮した発生モデル以外にも、以下の条件も選択できるように実装した。

- ・雑音なしの場合
- ・常時「力行」または常時「だ行」の場合（地上一車上）
- ・「列車あり」または「列車なし」の場合（車上一地上）
- ・雑音電力密度をパラメータとして指定して白色ガウス雑音を発生させた場合
- ・振幅をパラメータとして指定して一様な雑音を発生させた場合

6. シミュレータを用いた計算例

6.1 無線回線設計に向けたシミュレーションの試行

無線回線設計を行う上で考慮すべき無線通信システムのパラメータは、次のようなものがある。

- (1) 伝送制御方式（誤り訂正方式、暗号化方式、データ長など）
- (2) 無線方式（変調方式、周波数、送信出力、ダイバーシチ方式など）
 ……ビット誤り率等の通信品質に影響
- (3) 伝搬路（アンテナ高、沿線環境）
 ……電波伝搬特性、雑音特性に影響

これらのパラメータの値を変えることで、さまざまな無線装置の仕様や環境での伝送品質を推定でき、新しい環境にシステムを導入する場合などの回線設計の際に注目すべき項目を抽出・予測することができる（図8）。ここでは、簡単な事例を使って、開発したシミュレータによる伝送品質の予測計算を試行し、無線回線設計におけるパラメータを変更した場合に伝送品質に現れる差異を、シミュレーション結果から示せることを確認する。

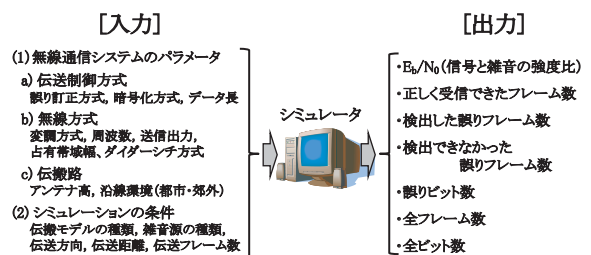


図8 実装したシミュレータの入力パラメータと計算出力

6.2 試行結果

無線通信回線の設計における重要な評価指標の1つである場所率の推定を例にシミュレーションの試行を行った。ここで扱う場所率とは、ある送信点からの距離における所望の品質を満たす割合を示す指標である。

鉄道の無線列車制御システムでは、エリア内のすべての区間で一定の場所率を満たしている必要がある。そこで、地上～車上間の距離(L)における短区間中央値を確率的に生成し、その時のビット誤り率(BER)やフレームロス率(FLR)を求めることを、Lを変えながら実行した。シミュレーションの実行条件を表2に示す。変化させたパラメータは、周波数、場所(周辺環境)、伝送方向である。シミュレーションの試行回数は、Lを100m刻みで変化させ、各L当たり50000回(1,000フレーム×50回)とした。毎秒1フレームの送信を行うシステムで

表2 場所率推定のためのシミュレーション実行条件

パラメータ	設定値
情報源符号長 (n_i)	368 ビット
秘話アルゴリズム	DES
伝送路符号化2アルゴリズム	RS (64, 48)
変調方式	QPSK
多重化	なし
長区間中央値変動	秦式
短区間中央値変動	対数正規分布 ($\sigma = 3\text{dB}$)
瞬時変動	レイリー分布
周波数	170MHz 350MHz 700MHz
伝送帯域	6.25kHz
ダイバーシチ	選択合成
雑音	だ行時(車上) 無列車時(地上)
地上アンテナ高さ	10m
車上アンテナ高さ	3m
無線出力	4W (地上) 0.3W (車上)
場所	市街地, 郊外地
方向	地上一車上 車上一地上

特集：信号通信技術

は、90km/hで走行する列車は100m走行する間に4フレームの送信を行うので、1日当たりの列車本数を250本とすると50日分の試行に相当する。試行結果における場所率は、50回の試行のうちフレームロス率（FLR）が 10^{-2} 以下となった回数 n から算出している（場所率= $n/50$ ）。

試行結果より、場所および方向が同じであれば、周波数が高くなるにしたがって同一距離における伝搬損は増大するが、雑音電力密度は低下することが分かった。例えば、郊外地における地上～車上伝送において、FLRが 10^{-2} 以下となる場所率が98%以上として回線設計を行うと、地上～車上間の距離を170MHzでは1200m、350MHzでは1300m、700MHzでは1700mとすれば良いことが分かる（図9）。一方、同一周波数で導入環境を変えた場合、郊外地では地上～車上間の距離を1200mとすれば良いが、市街地では600mにしなければならないことが分かる。これは、市街地のほうが雑音電力密度が大きくなる影響が結果に反映されていると考えられる（図10）。

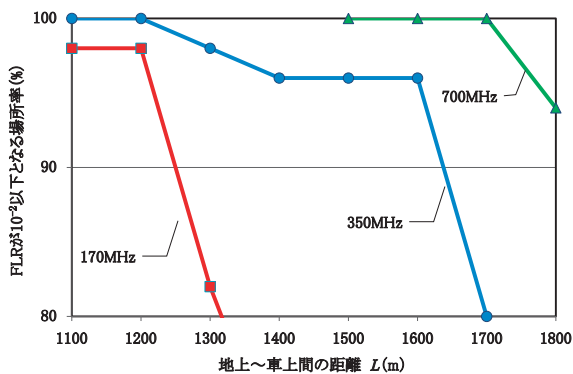


図9 周波数を変えた場合の試行例
(地上～車上 郊外地)

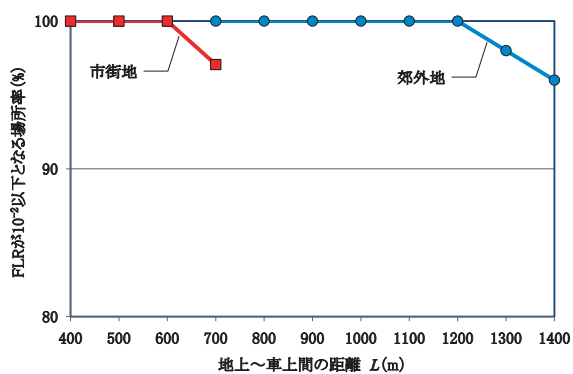


図10 導入環境を変えた場合の試行例
(地上～車上 350MHz)

また、同一条件下（地上～車上、350MHz、市街地）で、誤り訂正符号の訂正能力を落としてRS (56, 48) 符号を使用すると（この結果符号化率は0.75から0.86に向上する）、場所率が100%となる地上～車上間の距離の推定値が、300m程度短くなる結果が得られた（図11）。このように、伝送品質と場所率の関係を推定することも可能になる。

以上より、本シミュレータを用いれば無線通信システムのパラメータ（誤り訂正方式、周波数、使用環境など）を変えた場合に伝送品質に現れる変化を簡便に推定することが可能であることが分かった。

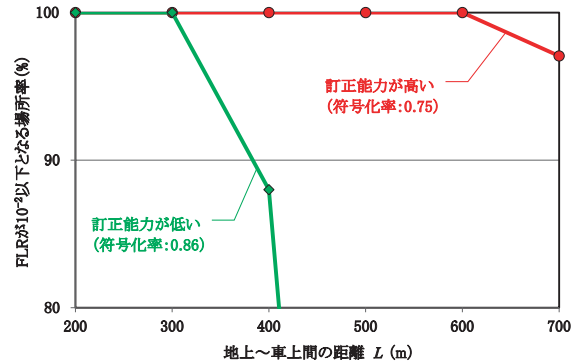


図11 誤り訂正能力を変えた場合の試行例
(地上～車上、350MHz、市街地)

7. まとめ

新たな無線通信システムを開発する場合や無線周波数や環境条件を変えて無線通信システムの導入を図る場合の無線回線設計の支援を目指した最初のステップとして、無線データ伝送回線のモデル化を行い、シミュレータの実装を行った。今回開発したシミュレータは、無線通信システムの誤り制御方式、変復調方式、電波伝搬路などを、それぞれモジュールとして実装しており、システムを構成する方式を変更した場合や、異なる環境に適用した場合のビット誤り率、フレームロス率等の基本的な伝送特性への影響を評価することができる。そのシミュレータによる試行の一例として、周波数や導入地域などのパラメータを変えた場合の場所率の推定例を示した。その結果、無線通信システムのパラメータ（周波数、使用環境、誤り訂正方式など）を変えた場合に伝送品質に現れる変化を計算できることが確認できた。

今後は、今回行ったシミュレーション結果の検証を行った上で、図1に示した無線列車制御システムにおける無線通信システム全体、さらには他の無線を含んだ通信システムの設計の支援を目的として、シミュレータの拡張を進めていく予定である。

文献

- 1) 桐山栄治, 西田賢史, 川崎邦弘, 進藤正昭：鉄道沿線における伝搬伝搬特性推定法の検討, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.33-38, 1999
- 2) 関清隆, 川崎邦弘, 中村一城：無線ネットワーク技術の鉄道システムへの適用, 鉄道総研報告, Vol.19, No.8, pp.41-46, 2005.8
- 3) <http://www.scilab.org>