

## 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

○ [電] 関 清隆      [電] 川崎 邦弘      [電] 加藤 佳仁 (鉄道総合技術研究所)  
立石 幸也      [電] 高荷 洸      宮木 圭介 (東日本旅客鉄道)

Modeling of wireless data transmission lines between trains and ground orienting  
radio circuit design and its basic implementation

○Kiyotaka Seki, Kunihiro Kawasaki, Yoshihito Kato, (Railway Technical Research  
Institute)  
Yukiya Tateishi, Ko Takani, Keisuke Miyaki, (East Japan Railway Company)

In this paper, we propose a model of wireless data transmission lines between trains and ground which is thought to be useful for radio circuit designs of railway systems including radio train control systems. This model consists of three sub-models and is designed to represent various real systems by replacing components of the model. We also show an implementation of the model to simulate characteristics of a wireless data transmission lines and results of simulations..

キーワード：無線伝送回線，モデル化，無線列車制御システム，電波伝搬，シミュレーション

**Key Words** : Wireless transmission line, modeling, radio train control system, radio propagation, simulation

## 1. まえがき

無線を通信路として利用するシステムを構築する場合、システムとしての要求仕様（設計条件）を満足するように無線通信回線を構成する要素の仕様、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行われる。列車制御システムのようなシステムの要求仕様は、システムの目的・用途によって異なるのは言うまでもないが、同一システムであっても導入される場所や線区の規模などによっても異なってくる。既存の無線通信システムの回線設計については、設計論や設計手法がある程度確立されていることが多いが、全く新たなシステムを開発する場合や、利用する無線周波数や環境条件を変えてシステムの導入を図る場合などには、過去の経験や類似の事例等を参考にしてアドホックに行われていることが多い。そのため、設計に当たっては専門家の多大な労力を要するのみならず、精度の高い設計が行えないことがある。さらに、無線通信システムとしての最適設計が行えない可能性もある。

このような問題を解決するために、われわれは効率的な無線回線設計に資する無線データ伝送回線のモデル化を試みている。本稿では、下位層のモデル化の構成と、基本構成をシミュレータ上に実装した結果について報告する。

## 2. 無線データ伝送回線のモデル化

### 2.1 基本的な考え方

#### (1) モデル化の考え方

従来から伝送システムのモデル化は多くの場面において行われてきている。無線伝搬路、雑音等では、複雑な物理現象を説明し簡単で精度の高い推定値を得るための多数のモデルが提案されており、符号理論等においては単純化した通信路モデルを使った性能評価が行われてきている<sup>1)2)</sup>。しかし、これらのモデル化は特定の技術分野の解析・評価等の目的で行われることがほとんどで、鉄道で使用される実システム全体の性能や設計法を評価するために複数のモデルを有機的に結合することは必ずしも十分には行われていなかった。本稿で述べる無線回線設計を指向したモデル

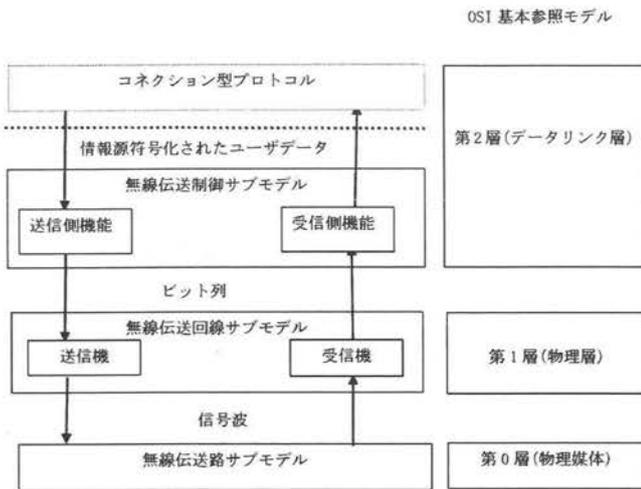


図 1 無線データ伝送回線モデルの全体構成

化では、既存の設計手法において回線設計に必要なデータの算出を支援することとともに、将来的には回線設計やシステム設計をより最適化できるよう設計手法そのものの検討を支援するような、無線データ伝送システム全体を包含するモデルを構築することを図る。

(2) モデル化の前提条件

モデル化に当たっては、以下のような前提条件を設定した。

(a)対象とするシステムは、鉄道の沿線で使用されるシステム全般とする。特に、今後導入・発展が期待される、無線を用いた列車制御システムに対し、システム構成の検討に資する方式となりうるようにする。無線を用いた列車制御システム的具体例としては、ATACS が既に実用化段階に入っている<sup>3)</sup>が、そこに採用される技術を比較・評価し、よりよいシステム構成の実現を支援できるようにすることを目標とする。

(b)対象とするプロトコル階層は、データリンク層以下とする。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までを対象とする。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。

(c)伝送システム全体のうち、無線区間(基地局~車上局)間を対象とし、その前後(地上の有線伝送路、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、本モデルには含めない。

(d)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。

(e)当面は、狭帯域デジタル無線を対象とし、周波数帯域も UHF/VHF 帯を対象とする。

2.2 無線データ伝送回線モデル

上記の前提条件を考慮して構築する無線データ伝送回線モデルの全体構成を図1に示す。本モデルは、3階層構造としており、下位層から順に物理媒体、物理層、データリンク層の一部に対応している。

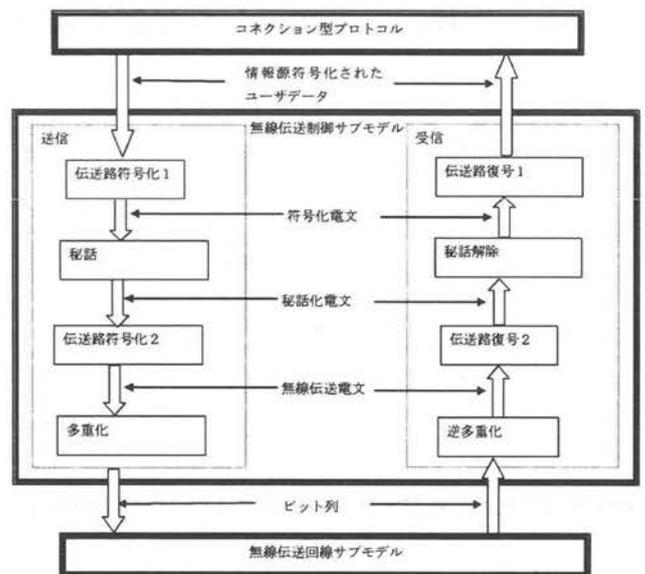


図 2 無線伝送制御サブモデル

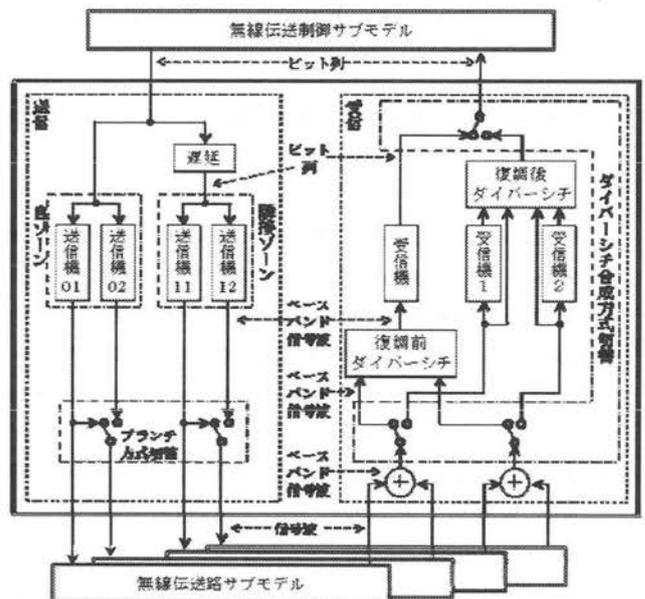


図 3 無線伝送回線サブモデル

2.3 サブモデルの概要

(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2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、複数の論理チャンネルを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、暗号化の前後に符号化機能を設定している。たとえば、伝送路符号化1及び伝送路復号1では誤り検出符号が、伝送路符号化2及び伝送路復号2では誤り訂正符号が採用されることを想定している。

(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3に示す。無線伝送回線サブモデルには、変復調機能、ダイバーシチ機能等が含まれる。本モデルでは、各種のダイバーシチ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。

(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4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、この部分で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。特に鉄道沿線における雑音は、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、本モデルでは、発生する雑音をガウス性雑音と想定し、その特性（平均値 $\chi$ と雑音電力 $\sigma^2$ ）を列車の運転状態に応じて切り替えることによって、列車からの雑音の混入を模擬している。

2.3 モデルの特徴と用途

本モデルは、具現化システムを構成する技術要素や自然現象を1つの構成部品として構築している。そのため、構成部品の入出力インタフェース部において、ビット誤り率、SN比、フレーム誤り率、伝送遅延等の基本的な伝送特性が対応付けられており、構成部品の内部にプローブを埋め込むなどプログラムに手を加えることなくそれらの特性を評価することができる。

本モデルは、以下のような使用法に対応できる。

(1) システムの導入環境等が変化する場合の特性予測

ある線区で導入されているシステムを別の線区に展開する場合や、システムが導入されている周囲の環境条件が変化した場合に、無線伝送路サブモデルの構成要素の特性を変えることで、無線データ伝送回線の特性の変化を推定する。

(2) システムの仕様を変更する場合の特性予測

実績のあるシステムに対し、変調方式や誤り訂正符号等の技術、無線周波数や送信出力等のパラメータを変更した場合の特性の変化を推定する。特に、複数の構成部品の仕様を同時に変更して、無線データ伝送回線としての総合的な特性を評価する。

3. 基本構成の実装

2章で述べたモデルを用いて具体的なシステムの性能を評価できるよう、シミュレーション環境を構築した。

3.1 基本的な考え方

2章で述べたサブモデルを構成するブロックを1つのモジュール単位とし、各モジュール内では部品となる基本アルゴリズムを呼び出すようにする。基本アルゴリズムを実現するプログラムの入出力インタフェースは共通化し、呼び出すプログラムの名称を変えるだけで異なるアルゴリズムによる動作ができるようにする。

シミュレーション環境の構築には、通信回線モデルに実績のある Scilab を採用した。ただし、電波伝搬特性のシミュレーションについては、既に様々な手法が確立されており、鉄道環境にも適用しうる有用なプログラムが存在する。

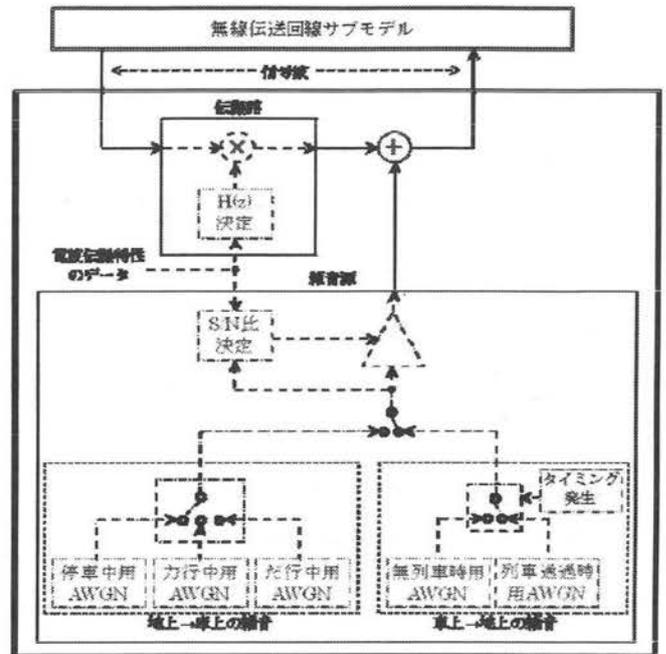


図4 無線伝送路サブモデル

このため、無線伝送路サ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、電波伝搬特性の計算機能を実装するのではなく、外部から与えられ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こととした。具体的には、ある伝搬パス数  $n_p$  ( $n_p \geq 1$ ) を仮定して求められた伝搬パスごとの伝送損  $L_i$  と直達波からの伝搬遅延時間  $\Delta t_i$  もしくは行路差  $\Delta l_i$  (いずれも  $1 \leq i \leq n_p$ ) を使って受信信号強度を計算する機能としている。これにより、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、実測データ等も使うことが可能となる。

3.2 モジュールの仕様

モジュールの主な入出力仕様及び動作を規定するパラメータを表1に示す。

3.3 簡単な実行例

実装したシミュレータの動作を確認するために、簡単な構成でシミュレーションを実行した。設定条件を表2に示す。入力された 368 ビットのユーザデータ全体に対し 16 ビット FCS を生成・付加して 384 ビットとし、その全体に対して DES 暗号化を施してから RS(64,48)符号で 128 ビットの冗長符号を付加して 512 ビットの送信フレームを生成させた。

AWGN を発生する雑音源の分散を変化させて  $E_b/N_0$  を変化させた場合のビット誤り率及びユーザデータのフレームロス率を図5に示す。図5より、ビット誤り率は理論値とよく一致し、この時のフレームロス率を同時に求められることが分かる。

表 1 モジュールの主な仕様

(1) 無線伝送制御サブモデルのモジュール

モジュール	入力	出力	パラメータ
伝送路符号化 1	情報源符号を表す {0, 1} 上の $n_1$ 次元ベクトル	符号化されたビット列を表す {0, 1} 上の $n_2$ 次元ベクトル	アルゴリズム (例: FCS)、生成多項式
伝送路復号 1	受信した符号化ビット列を表す {0, 1} 上の $n_2$ 次元ベクトル	復号されたビット列を表す {0, 1} 上の $n_1$ 次元ベクトル	アルゴリズム (例: FCS)、生成多項式 復号処理結果 (例: 誤り検出の有無)
秘話	秘話化前のビット列を表す {0, 1} 上の $n_3$ 次元ベクトル	秘話化後のビット列を表す {0, 1} 上の $n_3$ 次元ベクトル	アルゴリズム (例: DES)、暗号鍵
秘話解除	受信した秘話化後のビット列を表す {0, 1} 上の $n_3$ 次元ベクトル	秘話解除されたビット列を表す {0, 1} 上の $n_3$ 次元ベクトル	〃
伝送路符号化 2	符号化対象のビット列を表す {0, 1} 上の $n_4$ 次元ベクトル	符号化されたビット列を表す {0, 1} 上の $n_5$ 次元ベクトル	アルゴリズム (例: RS 符号) 符号長、情報長、生成多項式
伝送路復号 2	受信した符号化ビット列を表す {0, 1} 上の $n_5$ 次元ベクトル	復号されたビット列を表す {0, 1} 上の $n_4$ 次元ベクトル	アルゴリズム (例: RS 符号) 符号長、情報長、生成多項式 復号処理結果 (例: 誤り訂正不可)

(2) 無線伝送回線サブモデルのモジュール

モジュール	入力	出力	パラメータ
送信機	変調対象となる {0, 1} 上の $n_6$ 次元ベクトル	ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	変調方式 (例: QPSK)
受信機	受信ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	受信信号を復調後の {0, 1} 上の $n_6$ 次元ベクトル	〃
復調前ダイバーシチ	ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	合成方式 (例: 選択合成)
復調後ダイバーシチ	復調後の {0, 1} 上の $n_6$ 次元ベクトル	{0, 1} 上の $n_6$ 次元ベクトル	〃

(3) 無線伝送路サブモデルのモジュール

モジュール	入力	出力	パラメータ
伝搬路	送信ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	受信ベースバンド信号を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	搬送波周波数、伝搬パス数、伝送損、伝搬遅延時間または行路差など
雑音源	—	ベースバンドでの雑音電圧を表す $n_7$ 次元複素数ベクトル	地域 (都市・郊外)、伝送方向 (地上→車上・車上→地上)、搬送波周波数、搬送波送信出力、伝搬経路上での雑音強度の平均値、雑音電力、列車の状態など

表 2 シミュレーションの実行条件

パラメータ	設定値	記事
情報源符号長 ( $n_1$ )	368 ビット	
伝送路符号化 1 アルゴリズム	FCS16	$n_2=n_3=n_4=400$
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)	$n_5=n_6=512$
変調方式	QPSK	$n_7=256$
多重化	なし	
伝搬路モデル	レイリーフェージング	
雑音モデル	AWGN	
ダイバーシチ	選択合成	

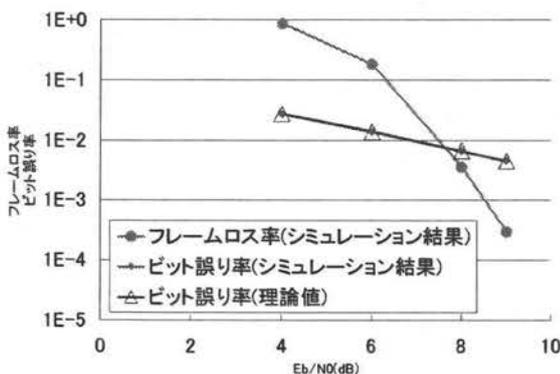


図 5 シミュレーション実行結果例

4. あとがき

回線設計に有益なデータを算出できること等を目的として、物理伝送路から伝送路符号化までを含む無線データ伝送回線モデルを構築し、シミュレーションの基本構成を実装した。簡単な構成に基づいたシミュレーションを実行し、ビット誤り率、フレームロス率、等の基本的な評価指標を算出できることを確認した。

今後は、シミュレータを構成する部品の追加を行い、また実測値に基づく無線伝送路のモデルを採用した状態での伝送特性の評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 三瓶政一：デジタルワイヤレス伝送技術，ピアソン・エデュケーション，2002.
- 2) 池原雅章，島村徹也，真田幸俊：MATLAB マルチメディア信号処理 下，培風館，2004
- 3) 立石幸也，青柳繁晴，森健司，武子淳，齋藤信哉，鈴木康明，黒岩篤：無線を利用した列車制御システム (ATACS) の開発と試験結果，電気学会交通・電気鉄道研究会，No. TER-05-46，2005