

# 論文の内容の要旨

氏名：小 篠 大 輔

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：実雑音データを組込んだ列車制御用無線系評価シミュレータの研究

## 1. 序論

列車制御システムの高度な制御には無線系が利用されている。保安制御の最も代表的なシステムが自動列車制御装置（Automatic Train Control: ATC）であるが、このシステムも地上システムが車上システムに対して、レールを媒体とした無線通信を行っている。ATC の安定処理のためには、レールに流れる帰線電流に起因したレール雑音の影響を克服する必要がある。特に、先に提案されたデジアナ ATC においてはアナログによる列車制限速度信号の伝送に加えて、デジタルによる符号伝送を行っており、レール雑音をシミュレータに組み込んだ評価が必要であると考えた。

一方で近年、注目されている無線式列車制御システムとして CBTC（Communication Based Train Control）システムがある。CBTC システムの多くは、無線 LAN などでも多用されている 2.4GHz 帯を利用して列車制御情報の送受信を行っている。したがって、無線 LAN などの機器から発生する雑音の影響を克服する必要があり、筆者は実雑音をシミュレータに組み込み、設計段階で雑音の影響を評価解析することとした。

以上より、本論文では、デジアナ ATC システムや、CBTC システムなどの無線式列車制御システムといった新たな列車制御システムの開発に用いられる、「無線通信方式に対する耐雑音性などの評価・検証のためのシミュレーション手法」の在り方とその有効性を研究することを目的とした。

一般的な伝送シミュレータでは、その背景雑音として白色雑音（Additive White Gaussian Noise: AWGN）を挿入し、また、フェージングと呼ばれる反射やドップラー効果の影響を考慮する必要がある。ただし、高い安全性が要求される列車制御システムにおいては、これらに加えて列車特有の伝送特性や雑音にも配慮する必要があるため、筆者はこの特性を考慮した伝送シミュレータの仕様について明らかにした上で、実際のシミュレータを開発し、実雑音に対する評価・検証をする必要があることを示した。

## 2. 列車制御用無線系評価シミュレータの概念

軌道回路を用いた列車制御システムでは、地上から車上へレールを介して信号を伝送している。本章では始めに、地上から車上へのデータの伝送方法について明らかにし、アナログ ATC システム、デジタル ATC システム、デジアナ ATC システムについて、伝送方式と特徴を詳しく説明をした。

続いて、無線式列車制御システムの中でも近年注目されている CBTC システムでは、通常、無線 LAN などが利用している 2.4GHz 帯を用いて通信を行っている。本論文では、この帯域における伝送シミュレータを開発し、CBTC システムの高信頼化、高性能化の評価・検証を行うことが必要であることを示した。

以上を踏まえて、筆者はデジアナ ATC システムや無線式列車制御システムといった研究段階にある列車制御システムにおいて、その実用化に向けて実環境を想定した評価・検証を行うために、伝送シミュレータにどのような仕様が要求されるかについて明らかにした。

まず、軌道回路伝送を用いたデジアナ ATC システムにおいては、軌道回路と列車が持つ受電器との距離は非常に短いことに着目し、一般的な伝送シミュレータで考慮するフェージングや白色雑音の影響は小さいと考えた。ただし、軌道回路には列車制御用の信号の他、列車駆動のために帰線電流が流れており、それに起因したレール雑音が大さいという特徴があるため、このレール雑音をシミュレータに反映させる必要があると考えた。

一方、無線式列車制御システムにおいては、前述の通り、周波数帯が無線 LAN などでも用いられている 2.4GHz 帯が多いことから、先の軌道回路伝送とは異なり、レール雑音など列車特有の伝送特性の影響を受けないと考えた。また、受信側である列車が走行しており、地上無線装置と車上無線装置

の距離は常に変化するため、移動体通信のシミュレータと同様であると考え、フェージングと白色雑音を含んだシミュレータとする必要があることを明らかにした。ただし、一般的な移動体通信とは異なり、高い安全性が要求される列車制御システムにおいては、干渉波の影響についても考慮する必要があるため、この実雑音データをシミュレータに組み込んだ構成が必要であることを明らかにした。

### 3. デジアナ ATC システムのための伝送シミュレータ

本章では伝送シミュレータを用い、筆者も研究に参加したデジアナ ATC の評価手法の確立に関する成果を述べた。

まず、デジアナ ATC では、従来のアナログ ATC とデジタル ATC の両方を処理可能な装置が必要であるため、デジタル ATC 送受信用の送受信器を新たに開発する必要があった。今回、組み込みデバイスの一つである DSP (Digital Signal Processor) を用いて、デジアナ信号を生成可能な送信器、及びアナログ信号成分を除去可能なデジタル ATC 用受信器を開発した。

また、デジアナ ATC ではアナログ信号の振幅変調度によってデジタル信号の SN 比 (signal-noise ratio) が常に変動するため、鉄道特有のレール雑音下における伝送性能の評価が不可欠となる。ここで、このレール雑音は列車走行などに依存して時間変動するため、今回は実雑音データの解析を経て、雑音シミュレータを構築した。そして、雑音シミュレータによって得られたスペクトル分布などを明らかにし、デジアナ ATC への評価に用いることを述べた。

以上、これらを踏まえてデジアナ ATC のための伝送シミュレータの開発、及びこのシミュレータを用いた評価を行った。

まず、アナログ伝送による列車制限速度信号の受信特性については、既存のアナログ ATC を再現可能な受信器を PC 上に構築し、筆者が開発したデジアナ送信器から発生したデジアナ信号を用いても、既存のアナログ ATC と同様に正しい列車制限速度信号を受信できることを明らかにした。

一方、デジタル伝送の評価では、開発した送受信器にレール雑音を挿入した BER 測定を行った結果、振幅変調の変調度によって BER が変動することを明らかにし、実用化設計時のベースとなる貴重なデータを得た。

以上より、開発段階にデジタル ATC システムとしての要求性能と、従来のアナログ ATC システムとしての受信性能の評価が可能となり、デジアナ ATC の開発に大きく貢献することができた。

### 4. 無線式列車制御システムのための伝送シミュレータ

本章では、無線式列車制御システムの評価手法として、電波環境観測データを用いた伝送シミュレータを開発した。

始めに、筆者が提案する伝送シミュレータに必要な、2.4GHz 帯の電波環境測定を実施した。電波環境測定では、2.4GHz 帯を広帯域に収集する計測装置を用意し、さまざまな場所で電波環境測定データの収集を行った。収集した電波環境測定データを解析すると、無線 LAN や Bluetooth、電子レンジからの妨害波などが含まれていることを示した。

今回開発した伝送シミュレータでは、背景雑音としてこれらの電波環境測定データを組み込み、無線式列車制御システムを評価した。まず始めに、2.4GHz 帯で干渉波を回避するために利用されている、周波数ホッピング方式の効果について評価を行った。ここでは、周波数ホッピングを行う方式と、常に同一帯域を使う方式の2種類を比較した。この結果、電波環境にもよるが、周波数ホッピングを適切に行うことで、大幅なパケット誤りが改善できることを明らかにした。

さらに、この伝送シミュレータを用いて、伝送品質向上策の有効性を検証した。その中で筆者が提案したインターリーブ方式によって、無線 LAN が使っているインターリーブ方式と比べパケット誤りが大幅に改善できることを明らかにした。

これらの結果より、筆者が開発した伝送シミュレータが無線式列車制御システムに採用する高信頼・高品質な伝送方式の評価・検証に有効であることを明らかにした。

### 5. 結論

以上、本論文においては、新たな列車制御システムの評価を目的として列車制御用無線系評価シミュレータの研究について、その成果を明らかにした。まず、デジアナ ATC システムで用いられる軌道

回路伝送と無線式列車制御システムで用いられる無線伝送の特性や考慮すべき雑音について明らかにした上で、それぞれのシミュレータに要求される仕様について明らかにした。

次に、この仕様に基づき、実際に実雑音を組込んだシミュレータ開発を行った。デジアナ ATC システムでは、開発したデジアナ ATC 送受信器、及びレール雑音の実データに基づいた雑音シミュレータを用いて、アナログ ATC システムの列車制限速度信号の受信特性や、レール雑音に対するデジタル ATC システムの BER 特性などを評価する手法を明らかにした。

一方、無線式列車制御システムでは、2.4GHz 帯での干渉波の電波環境測定によって得られた実雑音データを組込んだシミュレータを開発し、干渉波の回避策や伝送品質向上策などを評価する手法を明らかにした。

最後に、高い安全性が要求される無線式列車制御システムでは、実フィールドにおける検証を頻繁に行うことが困難であるという制約から、筆者が開発した伝送シミュレータが、今後、新たに研究開発が進む列車制御システムの評価・検証に対しても貢献できることを示し、本論文の結論とした。