

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 中村 英夫

（副査） 教授 泉 隆 専任講師 望 月 寛

高度な列車制御機能実現を目的とした信号システムの開発が行われてきたが、いずれも地上対車上の情報伝送量の拡大がポイントとされてきた。一方、列車という移動体との情報通信は何等かの無線系の利用が不可欠であるが、無線系の安定動作のためには、無線系の持つ電磁環境問題の克服が求められる。

本論文では、先端的な ATC (Automatic Train Control) であるデジタル ATC を旧来のアナログ ATC をベースに構築するという新たな取り組み (デジアナ ATC の開発)、そして、無線式列車制御システムの一つである CBTC (Communication Based Train Control system) を無線ネットワークなどで利用する汎用の 2.4GHz の周波数帯域で実現する取り組みにおいて、提出者が行った「雑音に対する無線系の評価」を目的としてシミュレータを駆使して行った研究成果を論じたものである。電磁雑音ではあるが、デジアナ ATC での対象は、レールと受電器という近接アンテナ間に飛び込むレール雑音対策が重要になる。一方、2.4GHz の汎用無線帯域を利用した CBTC 用無線系では、併存する無線 LAN や電子レンジなどからの電磁雑音を対象とせねばならなくなる。この 2 つの列車制御用無線系では扱われる雑音や電磁環境が異なるものの、提出者は共通のアーキテクチャで評価が可能なることに着目し、実雑音データをシミュレータに組み込むことにより事前の評価を可能とし、それぞれのシステムの実現に大きく貢献した。本論文は、その詳細を述べたものであるが、序論からまとめまで 5 章から構成されている。以下、論文の章立てに沿って、研究の意義や審査判断の内容を報告し、論文審査の結果の要旨とする。

1 章は、序論であり、研究対象が列車制御用無線系の評価に関するものであるが、通常無線系評価用のシミュレータでの限界を述べ、意図するシミュレータの必要性をわかりやすく紹介している。すなわち、通常無線系のシミュレータは、AWGN (Additive White Gaussian Noise) を背景雑音として付与することが多く、無線基地局の配置等の吟味では一定の有効性を持つものの、特定のノイズが支配的であったり、特殊な電磁環境下で安定伝送が要求されたりする提出者のアプリケーションへの適用には限界があることを述べている。

2 章は、「列車制御用無線系評価シミュレータの基本概念」として提出者の研究対象が、軌道回路を用いた近接無線での伝送を行う ATC と、2.4GHz の汎用無線帯域を用いた CBTC に関するものであると述べている。そして、ATC にはアナログ ATC とデジタル ATC あることを紹介し、それぞれの特徴を簡単に説明している。さらに、提出者が開発に参画したデジアナ ATC を紹介し、既存のアナログ ATC を利用している線区をデジタル ATC に移行させるには、逼迫した周波数帯域利用という課題が克服できるデジアナ ATC が有効であることを論じている。一方、2.4GHz の汎用無線帯域を用いた CBTC については、この周波数帯域が無線 LAN や Bluetooth などの通信のほか電子レンジなどにも用いられているため、その影響の吟味が必要なことを述べている。この 2 つのテーマに用いるシミュレータとして提出者はいずれも同じ構成で評価できることを説明している。さらに、シミュレータに組み込む背景雑音として、通常無線系のシミュレータで用いている AWGN に加えデジアナ ATC の場合には、フェージングやマルチパスといった移動体無線特有の雑音ではなく、レール雑音を組み込むべきであり、CBTC では 2.4GHz 帯域の利用状況を詳細に分析して組み込む必要があるとして両者の違いを論じている。

3章では、「デジアナ ATC システムのための伝送シミュレータ」としてデジアナ ATC において提出者が行った研究成果を論じている。既存のアナログ ATC に QPSK 変調によるデジタル電文を重畳させるという研究は、提出者も参加して長期にわたる検討の結果実用化水準まで到達した技術である。提出者は、システムの可能性を評価する課題に取り組み、基本回路を製作しシミュレータを用いて行うこととした。

無線系の評価にシミュレータを用いることに新規性はないが、通常のシミュレータは白色雑音を背景雑音とすることが多い。一方、デジアナ ATC は、受電器から混入する車載器のモータ系やパワーエレクトロニクスを発生源としたレール雑音の影響を受ける。このため提出者は、シミュレータにレール雑音の観測値を組み込むこととした。さらに、シミュレータを用いた評価に不可欠な送信機、受信機が製品としてはまだないため、DSP を用いて送受信機を開発した。デジアナ ATC 送信機は、デジタル ATC の QPSK 変調波を、アナログ ATC のサブキャリアで AM 変調したデジアナ信号を生成する回路である。このデジアナ信号を、電磁環境シミュレータを挟んで取り込み、アナログ ATC 信号とデジタル ATC 電文に分離するものが DSP を用いて開発したデジアナ ATC 受信機である。試験用デジアナ ATC 送信機・受信機を開発するなどの成果は、提出者が自立した研究に不可欠な技術力を有していることの証でもある。

送受信機の試作回路及びシミュレータを用いた評価の結果、デジアナ ATC はアナログ ATC としての性能を満足すること、さらにデジタル ATC としては、アナログ ATC の変調度とビット誤り率との関係を詳細に明らかにし、実用化への貴重な情報を得た。

4章は、無線式列車制御システムのための伝送シミュレータについて述べている。CBTC システムが利用する 2.4GHz 帯は、汎用の無線 LAN や電子レンジ等で利用する帯域でもあるため、無線系としてはこれら電磁環境に対する耐性の確保が必須となる。提出者は、フィールドにおける電磁環境について詳細な計測を行い伝送シミュレータの背景雑音として織り込むことにした。開発したシミュレータをもとに提出者はパケット衝突率及び伝送エラーレートについて詳細な評価を行っている。その中で、周波数ホッピングの効果として、疑似乱数を用いたホッピングパターンを用いるならば、一定間隔で周波数ホッピングさせる方式に比べ、10 倍近くパケット誤り率が改善できるなど貴重な知見も得ている。

また提出者は、CBTC の変調方式に OFDM (直交周波数分割多重) 方式の採用を前提として変復調方式の選定を行った。変調方式としては直並列変換後にインターリーブを行う方法や、インターリーブを直並列変換前に実施する方法など変調方法は複数存在する。検討の結果バースト誤り対策として用いられるインターリーブの操作とビット誤り率との関係を吟味している。さらに提出者は、OFDM 方式における誤り訂正の性能改善を目的として、周波数 (サブキャリア) 方向、時間 (シンボル) 方向に十分分散させる新たなインターリーブ手法を提案し、最適化についての評価の結果、サイクリックシフト量 1 の時が多様な条件に対しても性能が向上していることや、OFDM の I チャネルと Q チャネルのそれぞれにインターリーブをかけると効果が大きいなどの貴重な知見を得ている。

5章はまとめであり、提出者の研究内容とその成果を簡潔に論じている。

提出者は、都市圏交通の列車制御システムとして導入が期待されるデジアナ ATC の開発に参画し、システムの可能性評価という重要な研究に携わった。その中で ATC 特有の電磁環境すなわちレール雑音の影響を事前に明らかにすべきとの立場から、地上のデジアナ ATC 送信機、車上のデジアナ ATC 受信機を開発するとともに、レール雑音を背景雑音として組み込んだシミュレータを開発し、総合的な評価を行った。提出者の開発研究を通じデジアナ ATC の有効性が明らかとなった。

一方、提出者は、汎用の無線 LAN で用いている 2.4GHz 帯域を利用する CBTC の無線系の評価に取り組んだ。提出者は、この帯域の電磁環境データを計測・分析し、シミュレータの中に組み込んで無線システムの評価を行った。その結果、周波数ホッピング方式の最適化や OFDM 方式におけるインターリーブの在り方などについて実用上の貴重な情報を知得している。

これらの研究成果は、それぞれのシステムの最適設計に寄与したほか、関係技術領域への貴重な知見ともなっており、提出者の研究水準の高さを物語っている。また開発にかかわったシステムは、い

ずれも今後首都圏や海外の鉄道の列車制御システムの近代化に寄与し、鉄道の安全・安定輸送に大きく貢献することが期待される点も見逃せない。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年2月 18日