

列車制御における 2.4GHz 帯無線の適用について

—IT-ATP システムにおける無線系検証試験報告—

四釜 康治* 木村 純司

記虎 正幸 田名網 茂幸 (株式会社京三製作所)

The application of 2.4GHz radio communication system to train control

Shikama Koji*, Kimura Junji,

Kitora Masayuki, Tanaami Shigeyuki, (Kyosan Electric Manufacturing Co.,Ltd.)

Recently, train control systems that called CBTC are paid attention at foreign countries, and Japan. Our company also working on development and verification of the CBTC system that conformed to the IEEE Std 1474.1™ -2004. In this paper, the outline and the verification of the communication system between onboard and wayside by the use of 2.4GHz wireless system are described.

キーワード : CBTC, IT-ATP, 仮想閉そく, LCX, メッシュネットワーク

(Keywords: CBTC, IT-ATP, logical block, Leaky Coaxial Cable, Wireless Mesh Network)

1. はじめに

近年、保守性の良さや、導入コストの軽減といった観点から、CBTC(Communications Based Train Control) システムを始めとした軌道回路方式に依らない列車制御システムの導入・実用化が、海外を中心に活発になっている。また、国内においても、その動向が注目されている。

弊社においても、IEEE Std 1474.1™ -2004 規格で定義された CBTC 規格に準拠した、無線を利用した列車制御システムである、IT(Information Technology)-ATP(Automatic Train Protection)を開発した。本列車制御システムの概要や検証については、過去に発表を行った[参考文献(1)~(5)]。

IT-ATP システムの無線システムは、対象とする線区ごとに、置換えることが可能であるが、本稿では、国内外を問わず、一般に開放されている 2.4GHz 帯を使用した汎用の移動体向け無線通信システムを使用し、LCX (Leaky-

Coaxial Cable) を地上側の無線アンテナ設備として軌道に沿って敷設したシステムについて述べる。

IT-ATP システムの開発プロセスには、各設計段階における各機能に対して、信頼性(Reliability)、アベイラビリティ(Availability)、保守性(Maintainability)、安全性(Safety)に着目した検証プロセスを踏む RAMS 手法を取り入れた。地上-車上間の伝送システムに対しても、RAMS 手法に基づく検証を実施した。

その中で、安全性の検証は、地上側、車上側双方にフェールセーフな制御装置を使用し、制御装置間において IEC62280-2 に基づいた通信制御を行うことでクリアした。

2.4GHz 帯無線を使用した地上-車上間の伝送システム

であるため、近年広く普及した無線 LAN や Bluetooth などの妨害や干渉により、地上-車上間の通信が抑圧され、列車制御が不能となる、アベイラビリティの低いシステムとなることが懸念される。

そこで、本稿では、IT-ATP システムの地上-車上間の伝送システムの概要と、伝送システムのアベイラビリティに着目した検証について述べる。

2. IT-ATP システムの概要

〈2-1〉 IT-ATP システムの機器構成

IT-ATP システムは、ATS(Automatic Train Supervision)装置、連動装置、ATP 地上装置からなるセンター装置と、軌道沿線に設置される基地局、車両に搭載する車載無線機、ATP 車上装置からなる図 2-1 に示す装置で構成される。ただし、ATS 装置と連動装置については、図中では ATP 地上装置の上位装置として記述する。

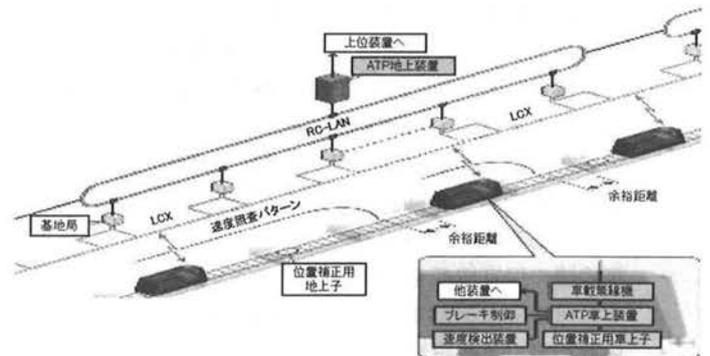


図 2-1 IT-ATP システム構成図

〈2・2〉地上一車上間の伝送システム

車両は、無線伝送部（車載無線機-地上基地局間通信）及び、RC(Radio-Control)-LAN を経由して、ATP 地上装置と双方向通信を行う。地上一車上間では、列車制御に必要な在線位置情報や列車制御情報などを送受信し、ATO 機能搭載時には、駅制御情報も電文に含む。

〈2・3〉列車位置検知

車両速度検出装置と必要に応じ地上に設けた位置補正地上子により、車上側で自列車位置を検知する。

〈2・4〉列車在線確定

車上側で検知した自列車位置情報を ATP 地上装置へリアルタイムに通信し、線区上の全車両の在線位置を確定する。また、その情報を線区内の各車両に通信する。在線判定には、従来の連続検知式チェックイン/チェックアウト方式の考えを踏襲している。

〈2・5〉前列車との適正な列車間隔制御

ATP 車上装置は、ATP 地上装置から受信する列車制御情報により、前方列車位置を把握し、自列車位置から前方列車位置との距離に基づき、余裕距離を確保した速度照査パターンを生成し、列車間隔制御を行う。

3. 地上一車上間の伝送システムの特長

〈3・1〉メッシュネットワーク技術の適用

IT-ATP システムでは、無線伝送部に、2.4GHz 帯を使用した移動体向け無線通信システムの一つである、メッシュネットワーク技術を応用した汎用無線機を使用する。メッシュネットワーク技術は、IEEE802.11s でも規格化されているが、本無線伝送部に使用する無線システムは、高速ハンドオーバーの実現や通信の秘匿性を高めるために、メーカーの独自規格に基づく。メッシュネットワーク技術を用いた本無線システムの特長を以下に挙げる。

- ・ 複数の無線端末を経由し、送信データを所望の宛先に送る、マルチホップの無線ネットワークを構築。
- ・ 集中制御装置を経由することなく、各無線端末がリアルタイムに最適なネットワークを自動形成する。
- ・ リアルタイムにノード障害/輻輳を検出し、自律分散的に最適なネットワークを自動形成する。
- ・ 高速ハンドオーバー処理により、高速移動通信が可能。
- ・ 周波数ホッピングにより、通信用の周波数チャンネルの切替えを行い、耐障害性に優れる。
- ・ スペクトラム拡散を使用し、耐ノイズ性能が高い。
- ・ 従来の鉄道信号用回線と比較し、高速データ通信が可能である(最大 3Mbps)。
- ・ 無線機の保守情報を管理可能。
- ・ 車載無線機は振動規格として、MIL810-F 対応。
- ・ 免許不要 (工事設計認証取得)。

〈3・2〉LCX の使用

LCX は、一般的な同軸ケーブルの外部導体に、図 3-1 に示すように、長さ方向に定周期にスロットと呼ばれる開口部を持ち、そこから電波が漏れる構造になっている。一般

的に、給電点付近が最も放射電界強度が大きく、給電点から遠ざかるに従い、LCX の伝送損失が増大するために、放射電界強度が小さくなる。ケーブル径が太いほど、伝送損失は小さく、LCX の延長可能距離は長い。

LCX を使用するメリット/デメリットを以下に挙げる。

【メリット】

- ・ 地上一車上間の通信回線品質（主にレベル、耐ノイズ性能）が安定。
- ・ 空間波方式に比べ、地上側の基地局間の距離を延ばす(約 1km)ことができ、基地局数を低減できる。
- ・ 周囲の環境変化（トンネル等）に、電波伝搬が影響されにくい。
- ・ 無線回線設計が空間波方式に比べ容易。
- ・ アンテナの調整などが不要で、メンテナンスが容易。
- ・ 2.4GHz 帯向け LCX は、無線 LAN のアクセスポイント用アンテナとして普及し、比較的、入手性が良い。
- ・ 従来のループコイルの敷設などと比べ、コストが低い。

【デメリット】

- ・ 全線に渡って、LCX を敷設する必要がある。
- ・ LCX と正対する位置に車載アンテナの実装が必要。

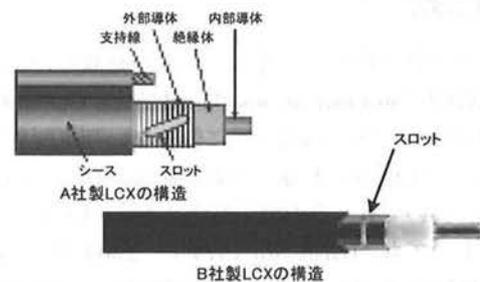


図 3-1 LCX の構造

〈3・3〉地上一車上間の伝送システムの冗長性

〈3・3・1〉地上一車上間の伝送システムの構成

IT-ATP システムの地上一車上間の伝送システムの構成を、図 3-2 に示す。本システムはセンターの機器室に設置される ATP 地上装置と、軌道沿線に設置する地上側無線基地局をリング状に有線で接続し構成される「RC-LAN」と、地上側の無線基地局と車載無線機の間で形成される「無線伝送部」により構成される。

以下に、これら 2 種類の回線が持つ特長である、冗長性について述べる。

〈3・3・2〉無線伝送部の冗長性

IT-ATP システム無線伝送部の干渉源となり得る、2.4GHz 帯を使用した無線 LAN や Bluetooth などの機器は、あらゆる場所に普及し、使用されている。そこで、常に外部から受ける妨害や干渉による、通信断の発生や通信誤り率の上昇が懸念され、その対策を考慮する必要がある。

また、車両の移動により、車載無線機が接続する基地局を切替えるハンドオーバー時に発生する、一時的な通信遅延や通信断に対する対策を考慮する必要がある。

これらの対策として、無線伝送部の通信回線に冗長性を持たせている。無線伝送部の冗長性について、以下に挙げる。

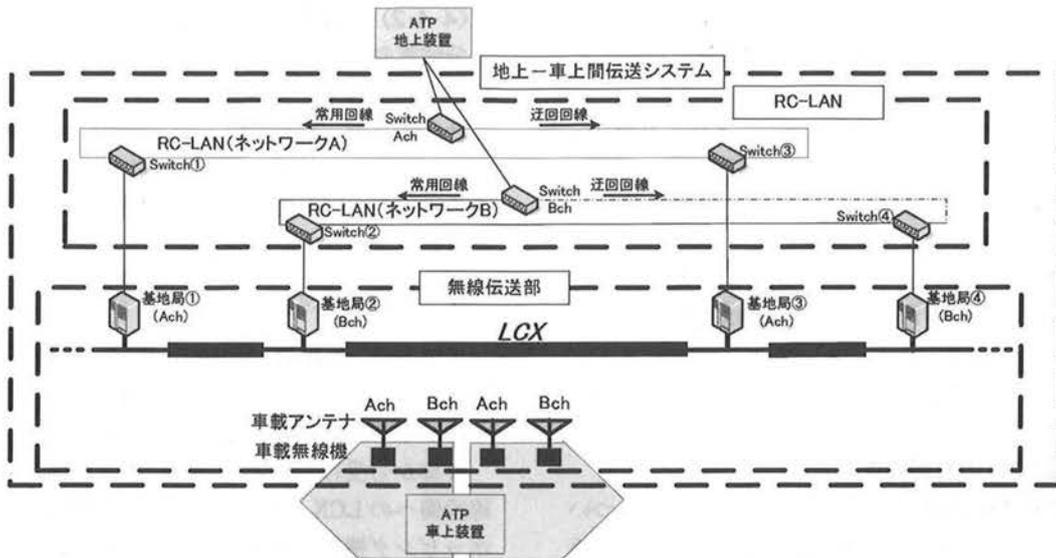


図 3-2 地上-車上間の伝送システムの構成

① 無線ネットワークの冗長

無線ネットワークを A チャンネル(Ach)と B チャンネル(Bch)の 2 回線を用意し、ネットワーク自体に冗長を持たせ、一つのネットワークに故障が発生しても通信断にならないようにしている。また、図 3-3 に示すように基地局を配置することで、それぞれの回線のハンドオーバー地点をずらし、片方のチャンネルでのハンドオーバー時にも、他方の回線で通信を維持する。

② 車載無線機/アンテナの冗長

車載する指向性アンテナと車載無線機を 1 編成あたり、ATP 車上装置の 1 系/2 系にそれぞれ 2 台ずつ実装し、それら 2 台の車載アンテナの設置位置を物理的に離したり、設置角度にばらつきを持たせたりすることで、同一方向からの干渉波による通信断が発生しない設計としている。

〈3・3・3〉 RC-LAN の冗長性

① 常用回線と迂回回線

図 3-2 に示すように、RC-LAN のリング状の回線は、故障がない状態では、右回り/左回りのどちらかを常用回線として使用するが、故障発生時には、必要に応じて迂回回線を使用する。

② RC-LAN 回線の冗長

〈3・3・2〉項で述べた、無線ネットワークの A チャンネルと B チャンネルのそれぞれに、RC-LAN を用意することで、回線自体の冗長構成をとる。

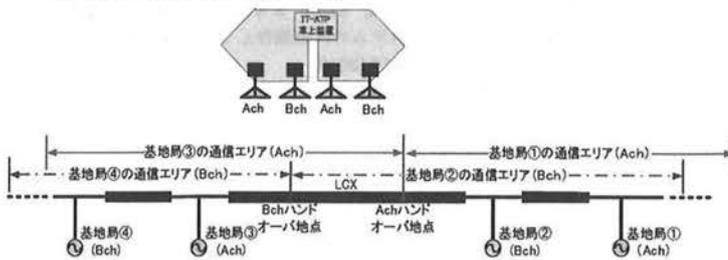


図 3-3 基地局の配置と A/Bch 無線ネットワークのハンドオーバー地点

4. 地上-車上間の伝送システムの検証

〈4-1〉 検証の概要

3 章で挙げた、IT-ATP システムが受ける、外部からの妨害や干渉波の影響、伝送設備の故障による影響等について検証を実施した。本章では、実車による走行試験結果の内容を含む検証結果について述べる。

〈4-2〉 ハンドオーバー時通信特性について

ハンドオーバー処理時の回線品質が IT-ATP システムに与える影響について検証するため、屋内での模擬試験及び、実車での走行確認試験を実施した。

実車を使用した走行試験では、ハンドオーバー処理時に、1~2 パケットのロスが発生することがあった。

また、模擬試験では、最高 120km/h 程度の走行を想定した検証試験を実施し、ハンドオーバー処理 1 回当たりに発生するパケットロス、平均すると約 0.11[パケット/回]であることを確認した。

地上-車上間の通信が不通になることで列車に停止制御を行うのは、〈3・3〉項で述べた、A/B チャンネルの両ネットワークにおいて同時に、12 パケット以上連続したパケットロスが発生した場合である。A チャンネルと B チャンネルのハンドオーバー地点が設計上、400m 以上離れることを考慮すると、ハンドオーバー時の回線品質の低下によって、列車に停止制御が行われることはないことを確認した。

また、ネットワーク機器の故障等により、A/B チャンネルどちらか一方の回線のみで運用する場合であっても、IT-ATP システム下の列車運行に影響を与えることがないことを確認した。

〈4-3〉 妨害や干渉波による影響調査

〈4-3-1〉 イミュニティ特性の調査

IT-ATP 無線システムの影響電波に対するイミュニティ特性について検証を行った。

試験内容は IEC61000-4-3 (JISC61000-4-3) 規格に準じ、80MHz~2.0GHz の周波数範囲において、1kHz80%AM の妨害波を LCX 及び、車載アンテナに照射した。また、規格

範囲外であるが、IT-ATP システムでは 2.4GHz 帯無線通信を使用するため、2.0GHz~2.7GHz の周波数帯についても実施した。

その結果、本無線システムのインバンドにあたる 2.4GHz 帯周辺では、一部の帯域において通信が抑圧され、不通となることを確認した。それ以外のアウトバンドの帯域においては、通信に影響がないことを確認した。

ただし、〈3・1〉項で挙げたように、使用する無線機の特長である周波数ホッピング機能により、通信用の周波数チャンネルを、妨害波の影響が小さいチャンネルに切替えることで、通信が再開し、妨害波の影響は限定的であることを確認した。

〈4・3・2〉無線 LAN の影響調査

前節では、1kHz80%AM の妨害波を照射した場合についての検証を述べたが、本節では、IT-ATP 無線システムのチャンネル帯域と重複し、一定の帯域幅を持つ無線 LAN 機器 (IEEE802.11g 準拠) を、IT-ATP システムの周辺で使用する状況を模擬し、その影響について検証を行った。

その結果、IT-ATP システムで使用する無線機に、無線 LAN 機器から放射される電力レベルが一定のレベル以上で印加されると、無線 LAN 機器側で通信帯域を最大で使用した状態 (最大 54Mbps) では、IT-ATP システム側の通信が抑圧されることを確認した。

2.4GHz 帯を利用した汎用機器が、軌道周辺で利用されることを想定した場合、基地局ではアンテナ利得の低い LCX を使用するため、通信が抑圧されるほどの妨害波レベルにならないことを確認した。一方、車載無線機に接続する車載アンテナは利得が高く、妨害波も高いレベルで受信するため、IT-ATP の通信が抑圧され易いことを確認した。

実車を使用した走行試験でも、軌道脇に敷設した LCX の直近で無線 LAN 機器を使用した状況下において、車両の通過時に車載無線機側が干渉波を受信し、IT-ATP システムの無線通信が抑圧されることがあることを確認した。しかし、〈3・3〉項で挙げたように、伝送システムの冗長構成をとることにより、4 台の車載無線機全てが同時に抑圧されることはなく、IT-ATP システム下での地上-車上間の通信を確保し、伝送システムの冗長の有効性を確認した。

〈4・4〉その他検証項目

〈4・4・1〉LCX 故障発生時の影響調査

LCX に切断やコネクタ抜けなどの、故障が発生したときに、故障部分での反射により、故障部周辺では、地上-車上間の通信に悪影響を及ぼすことが懸念される。しかし、検証の結果、LCX やコネクタ部での故障が発生した場合でも、回線設計上のマージンの範囲内に収まる程度のレベル変動しか発生せず、IT-ATP の通信に与える影響がないことを確認した。

また、保守性を向上させるため、常時、隣接する通信機間の受信レベルを監視するモニタ装置をセンター側に設置し、受信レベルの低下を検出することで、故障発生時には、アラーム、故障箇所の特定制を行うシステムとする。

〈4・4・2〉分岐部での干渉の影響調査

分岐部や複線区間においては、LCX を分岐し、各軌道に LCX を敷設する。このとき、平行に敷設された LCX が干渉し合うことで、レベル低下や、通信への影響が考えられる。しかし、検証の結果、回線設計上のマージンの範囲内に収まる程度のレベル変動しか発生せず、IT-ATP の通信に与える影響がないことを確認した。

5. おわりに

本稿では、2.4GHz 帯無線を使用した IT-ATP システムの地上-車上間の伝送システムの概要と、伝送システムのアベイラビリティに着目した検証結果について述べた。

外部から受ける妨害や干渉による影響に対して、地上無線設備への LCX の導入や、使用する無線システムの周波数ホッピング機能、各種回線に冗長性を持たせることで回避するシステムとしている。

実際の運行や無線設備の設計に際しては、導入する線区周辺の無線環境や線区特有の状況を十分に配慮する必要があるが、比較的的外乱影響の少ない地下鉄や閑散線区では、高いアベイラビリティを確保することが可能なシステムであることを確認した。

また、都市線区への導入についても、LCX、車載アンテナの取付けに際し、車載アンテナに直達する外乱や干渉の影響を小さくするような対策を施すことで、高いアベイラビリティを確保することが可能である。

今後は、IT-ATP システムの実用化を目指すと共に、本無線伝送システムの規模が拡張し、回線負荷が増大する場合についての検証等を実施し、信号と通信の共存についての可能性を検証し、鉄道システムとしての通信の在り方を確立していく。

謝辞

本システムの開発・検証に際し、適切なご指導・ご協力を賜った関係各位に深く謝意を申し上げます。

文 献

- (1) 大嶋他：「無線式列車制御システム(K-CBTC 3形)」, 京三サーキュラー, Vol.59, No.2 pp.4-9 (2008)
- (2) 板垣：「仮想化固定閉そく式 ATC(ITATC)」, 第 45 回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号 627 (2008)
- (3) 水野他：「仮想閉そく方式を用いた無線式列車制御システム(K-CBTC)の開発」, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会 3-25(2008)
- (4) 高田：「IT-ATC」, JREA, 51 巻, 8 号 pp.33580-33582 (2008)
- (5) 高梨他：「IT-ATP システムの試験報告」, 第 47 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文番号 616 (2010)
- (6) 「IEEE Std 1474.1™ -2004」
- (7) 「IEC 62278, 62280」
- (8) 「IEEE 802.11g, 11s」
- (9) 岸本、佐々木：「LCX 通信システム」, 電子通信学会, コロナ社(1982)
- (10) 日本工業標準調査会：「JIS C 61000-4-3:2004」(2004)
- (11) 電波産業会：ARIB STANDARD RCR STD-33, STD-T66