

次期首都圏在来線列車無線の試作試験



山下 真弘*¹



井上 学*²



堀 勇太*³



領木 慎一*⁴



洞井 裕介*⁴



長坂 雄一*⁵

Prototype test of next-generation metropolitan area conventional line train radio

Masahiro YAMASHITA*¹, Manabu INOUE*², Yuta HORII*³, Shinichi RYOKI*⁴, Yusuke DOHI*⁴, and Yuichi NAGASAKA*⁵

*¹ Principal Researcher, Signal and Communication Technology Maintenance Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

*² Chief, Communication Technology Management Center, Technology Management Department, Electrical System Integration Office, JR East

*³ Researcher, Signal and Communication Technology Maintenance Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

*⁴ Assistant Chief Researcher, Signal and Communication Technology Maintenance Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

*⁵ Senior Researcher, Signal and Communication Technology Maintenance Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

We prototyped the next-generation metropolitan area conventional line train radio equipment using a new modulation method and technology to suppress interference between the same frequency zones without changing the current radio frequency bandwidth. As a result of running tests using this prototype, we confirmed that it was possible to double the transmission capacity while maintaining the same line quality as the current system.

●**Keywords:** New modulation method, Technology to suppress interference between the same frequency

*¹JR東日本研究開発センター 信号通信技術メンテナンスユニット 主幹研究員

*²JR東日本 電気システムインテグレーションオフィス 技術管理部 通信技術管理センター チーフ(元 JR東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センター 副主幹研究員)

*³JR東日本研究開発センター 信号通信技術メンテナンスユニット 研究員

*⁴JR東日本研究開発センター 信号通信技術メンテナンスユニット 副主幹研究員

*⁵JR東日本研究開発センター 信号通信技術メンテナンスユニット 上席研究員

1. 緒言

列車無線は、列車の乗務員と輸送指令員の連絡や輸送指令からの通告の伝達に用いられており、安全安定輸送に欠かせない通信システムである。当社では、2007年以降首都圏の主要線区に導入した在来線デジタル列車無線システム(以下、「現行システム」という)が、使用開始から15年以上経過し、設備の更新時期を迎える。更新に向けて検討しているシステム(以下、「次期システム」という)は、新機能や現行機能強化の実現のために伝送容量の増加が必要である。使用できる無線周波数帯域には限りがあり、現行システムと同じ帯域幅のまま伝送容量を増加させるには変調方式の多値化が不可欠であるが、そのトレードオフとして耐干渉性能が低下する課題がある。

現行システムは、複数の基地局により一つの通信エリア(以下、「ゾーン」という)を形成している。ゾーン内では、複数の基地局から同一周波数で同一信号を同時送信する「複局同時送信」が行われており、隣接する異なるゾーンでも同一周波数で複局同時送信が行われている。このように、現行システムでは同一線区の複数ゾーンを一つの周波数でカバーし、効率的に周波数を運用するシステムと言えるが、一方、ゾーン境界付近では電波干渉によって通信ができない不感地帯が発生する課題がある。

そこで、本研究開発では、これらの課題を解決しつつ伝送容量を増加させることを目的として、以下を行った。

- ・新たな変調方式を採用することで、限られた伝送フレーム内のビットをどこまで情報データ領域に割り当て可能か検討し、伝送容量の倍増化を図った。
- ・伝送容量倍増化によって生じる耐干渉性能の低下を極力回避するための干渉抑圧技術を検討した。
- ・上記検討した技術を実装した無線局(基地局および移動局)を試作し、現地試験により機能検証を行った。

2. 伝送方式の検討

2・1 伝送容量の倍増化

2・1・1 変調方式の選定

前述のとおり、無線周波数帯域幅を変更せずに伝送容量を増加させるためには、変調方式の多値化が必要である。多値化に適した変調方式を選定するため、位相変調 (PSK: Phase Shift Keying)、直角位相振幅変調 (QAM: Quadrature Amplitude Modulation)、相対空間マッピング変調方式¹⁾の3方式について、信号点間距離および列車走行に伴うフェージング環境下の所要 CNR (Carrier-to-Noise Ratio: キャリア対雑音比) を、計算機シミュレーションにより比較した。その結果、信号点間距離が比較的大きく、フェージング環境下における所要 CNR が低い相対空間マッピング変調方式を、本研究開発では採用することとした (図1)。

本変調方式は2シンボルを1ブロックとし、ブロック毎に送信ビットを割り当てる。各シンボルは位相変調であるが、シンボル毎に振幅を変え、その振幅の大小の組合せにもビットを割り当てるのが本方式の特徴である。振幅の大きなシンボルでは多値数の大きい位相変調とし、振幅の小さなシンボルでは多値数の小さい位相変調とすることで、同等の伝送容量の位相変調に対して信号点間距離を拡張し、無線特性を改善できる。

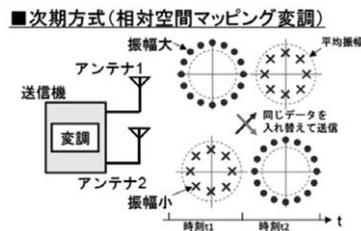


図1 相対空間マッピング変調方式

2・1・2 無線特性の更なる改善

本研究開発では、より良い無線特性を得るために、相対空間マッピング変調方式と同様の方法により送信ダイバーシチ利得を得ることができる符号化方式として、時空間ブロック符号 (STBC: Space Time Block Coding) を検討した。STBCは復調時に無線伝送路情報が必要となるが、差動時空間ブロック符号 (DSTBC: Differential Space Time Block Coding) を適用することで、無線伝送路情報が不要となり、受信機の構成を簡易化できる。そこで、相対空間マッピング変調方式と差動時空間ブロック符号を組み合わせた方式を検討した。2本の送信アンテナを用いた場合、各送信アンテナからは異なる信号を送信するため、受信点において逆位相で合成されて信号が消失するビート干渉は発生せず、現行システムで適用している「遅延送信ダイバーシチ」と同様の効果がある。さらにDSTBCの適用により、送信アンテナと受信アンテナ数の組合せでできる無線伝送路数が、現行システムと同じになるため、複局同時送信時のビート干渉対策としても、現行システムと同様の効果がある。

2・2 同一周波数干渉抑圧技術

現行システムでは、ゾーン境界付近において列車が在線しているゾーンのA to B (基地局→移動局)の無線信号が隣接するゾーンに届かないように、一般的には漏洩同軸ケーブル (LCX: Leaky Coaxial cable) を用いてゾーンの分割を行っている。しかしながら、ゾーン間の無線信号の漏れ込みを完全に防ぐことは困難であり、2つのゾーンで同一周波数を用いる場合、ゾーン境界付近では少なからず干渉が発生し、伝送誤りが生じる可能性がある (図2)。

ゾーン境界付近における干渉による伝送誤りを低減するため、次期システムでは、移動局の復調部に干渉抑圧処理を導入することを検討した。本処理のイメージを図3に示す。隣接する二つのゾーンの基地局からは、各々異なるシンクワード (SW: Sync Word) 系列および情報ビット系列が送信される。移動局では、受信信号のSWから推定した基地局・移動局間の無線伝送路情報を用いてMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 信号処理を行うことで、受信信号に含まれる干渉信号を抑圧しつつ、所望信号を抽出することが可能となる。なお、MIMO信号処理方式は、最小平均二乗誤差 (MMSE: Minimum Mean Square Error) 型を採用した。

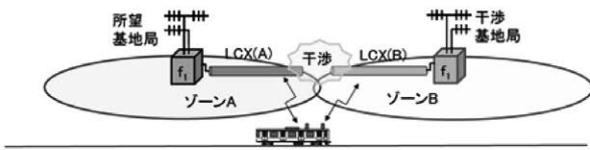


図2 ゾーン境界付近における干渉発生イメージ

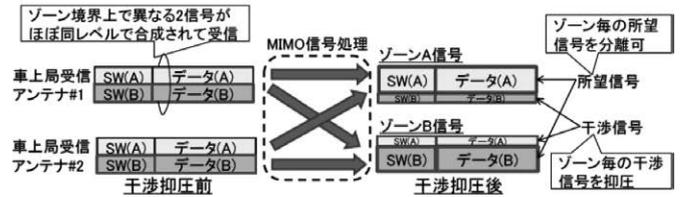


図3 移動局の復調部における干渉抑圧処理のイメージ

2・3 伝送方式の諸元

前節までの検討内容を含む、伝送方式に関する現行システムと次期システムの諸元の比較を表1に示す。次期システムの誤り訂正符号は、実用化されている中で誤り訂正能力が高いとされるLDPC符号を採用した。

表1 伝送方式諸元の比較 (現行と次期)

項目	現行システム	次期システム
無線周波数帯	400MHz 帯	変更なし
無線帯域幅	5.8kHz	変更なし
フレーム長	40ms	変更なし
伝送容量	9.6kbps	19.2kbps
情報ビット数 (1フレームあたり)	224 ビット	448 ビット
送信アンテナ数	2	変更なし
送信ダイバーシチ方式	遅延ダイバーシチ	DSTBC
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK 変調	相対空間マッピング変調
誤り訂正方式	RS 符号	LDPC 符号

3. 現地試験

3・1 現地試験概要

製作した試作機を用いた現地試験を2022年11月から2023年1月に横浜線で実施した。試験構成は、地上 (基地局) 側、車上 (移動局) 側ともに、現行装置の空中線を共用する構成とし、同じ環境で現行システムと次期システムの特性を比較した。移動局側は、軌陸車を用いた定置試験 (0km/h) および低速走行試験 (30km/h未滿)、在来線試験車両 (通称:MUE-Train) を用いた中速走行試験 (約60km/h) を実施した。在来線試験車両を用いた場合の現地試験構成図を図4に示す。軌陸車を用いた場合の試験構成も同様である。

試験は、伝送容量の低下や電波干渉が起きやすい基地局の中間付近を中心に実施した。実施箇所は、LCXゾーン境界区間 (ゾーン間。当社では同一周波数のゾーン境界はLCXによる突合せ構成が一般的)、および八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) で各々行った。また試験機は、「現行機」、「次期機干渉抑圧有」、「次期機干渉抑圧無」の3つで測定結果を比較した。実施場所と試験機、実施パターンは表2のとおりである。

表2 現地試験実施パターン

	定置試験 (0km/h)	低速走行試験 (30km/h未滿)	中速走行試験 (約 60km/h)
LCX ゾーン境界区間 (ゾーン間) 試験 [横浜線 町田・古淵間]		次期機干渉抑圧有	次期機干渉抑圧有 次期機干渉抑圧無 現行機
八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) 試験 [横浜線 成瀬・町田間]		次期機干渉抑圧無 現行機	

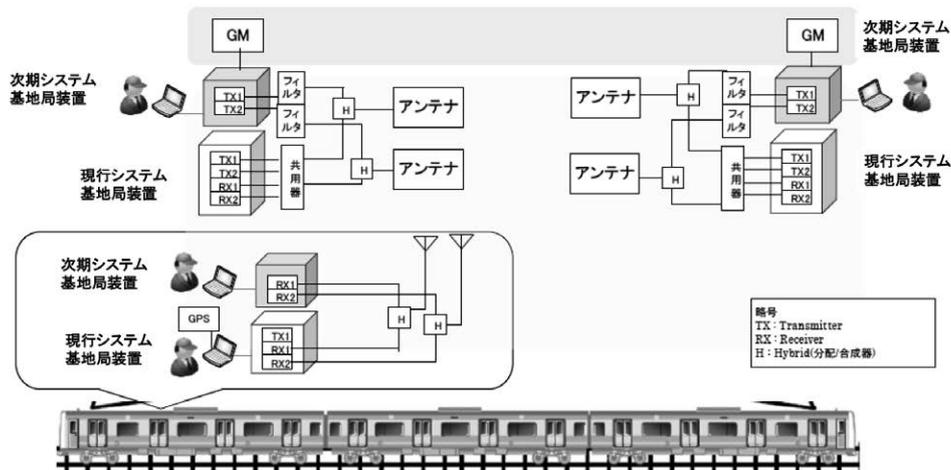


図4 現地試験構成図 (在来線試験車両)

3・2 現地試験結果

3・2・1 LCXゾーン境界区間 (ゾーン間) 試験

(1) 軌陸車定置試験 (0km/h)

軌陸車を測定ポイントで停車させ、LCXゾーン境界における静止時の無線特性を測定する試験であり、図5に示すとおり、測定ポイントはゾーン間干渉の影響が大きいLCX無し区間内を10m間隔で7地点、その他、町田局の電波と古淵局の電波が強い地点を含め合計12地点を選定した。

本試験のスループット特性を図6に示す。横軸は試験区間のキロ程 (km)、縦軸はスループット (kbps) を示す。図6より、現行機はゾーン境界のLCX無し区間 (24k139m~24k189m) でスループットが低下するが、次期機干渉抑圧有では、#6 (24k159m) の地点を除きスループットの低下はなく、19.2kbpsを維持できることが分かった。また、本試験のフレーム誤り率 (FER: Frame Error Rate) は、現行機ではフレーム誤りがゾーン境界 (LCX無し区間) 全体で発生したが、次期機干渉抑圧有では、#6の地点を除きフレーム誤りがなく、干渉抑圧技術の効果を確認した。

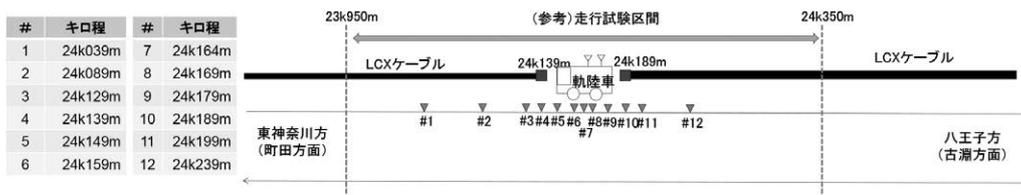


図5 LCXゾーン境界区間 軌陸車定置試験 概要図

(2) 軌陸車走行試験 (30km/h未満)

軌陸車を用いて、LCXゾーン境界における低速走行時の無線特性を測定する試験であり、ゾーン境界付近の400mで実施した。本試験のスループット特性を図7に示す。図7より、現行機はゾーン境界のLCX無し区間でスループットが大きく低下するが、次期機干渉抑圧有では、スループットの低下はほぼ無かった。また、本試験のCRC誤り検出結果は、現行機の85フレーム誤りに対して、次期機干渉抑圧有ではフレーム誤り0であり、LCXゾーン境界における干渉抑圧技術の効果を確認した。

(3) 在来線試験車両走行試験 (約60km/h)

在来線試験車両を用いて、LCXゾーン境界における中速走行時の無線特性を測定する試験であり、区間は町田・古淵間である。本試験のスループット特性を図8に示す。図8より、現行機はゾーン境界のLCX無し区間でスループットが最大約35%低下するが、次期機干渉抑圧有では、町田局ゾーン区間で最大約9%、古淵局ゾーン区間で最大約3%の低下に抑えられていた。また、本試験のCRC誤り検出結果は、現行機の12フレーム誤りに対して、次期機干渉抑圧有では1フレーム誤りであり、(2)項と同様にLCXゾーン境界における干渉抑圧技術の効果を確認した。

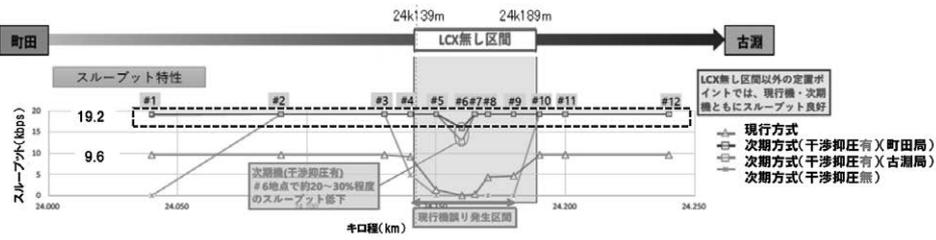


図6 LCXゾーン境界区間 軌陸車定置試験 スループット特性 (移動速度：0km/h)

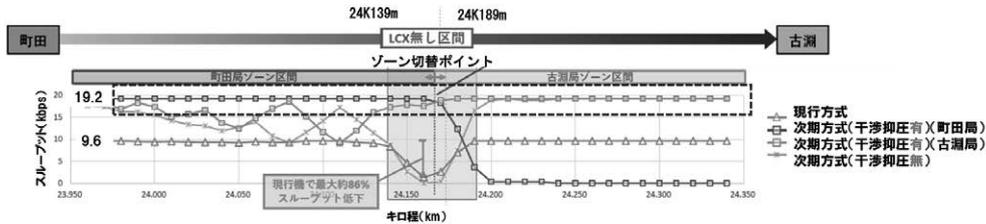


図7 LCXゾーン境界区間 軌陸車走行試験 スループット特性 (移動速度：30km/h未満)

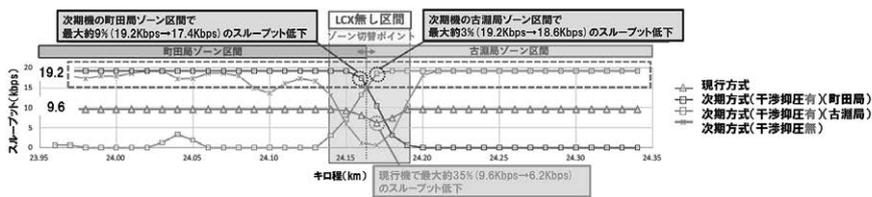


図8 LCXゾーン境界区間 在来線試験車両走行試験 スループット特性 (移動速度：約60km/h)

3・2・2 八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) 試験

(1) 軌陸車定置試験 (0km/h)

軌陸車を測定ポイントで停車させ、八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) における静止時の無線特性を測定する試験であり、概要を図9に示す。本試験の測定結果として、DUR (Desired to Undesired signal power Ratio、希望信号対干渉信号電力比) 分布とFERを図10に示す。DUR分布の横軸はキロ程 (km)、縦軸はDUR (dB) を示す。図10より、ビート干渉が発生しやすい区間 (DUR=0dB付近) において、次期機干渉抑圧有・無ともにフレーム誤りは発生していないことを確認した。

(2) 軌陸車走行試験 (30km/h未満)

軌陸車を用いて、成瀬・町田間の八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) の低速走行時の無線特性を測定する試験であり、成瀬・町田間21k000m~21k900mの900mの区間で実施した。測定結果は、現行機と次期機干渉抑圧有ともに、ビート干渉が発生しやすい区間 (DUR=0dB付近) において、フレーム誤りが発生していないことを確認した。

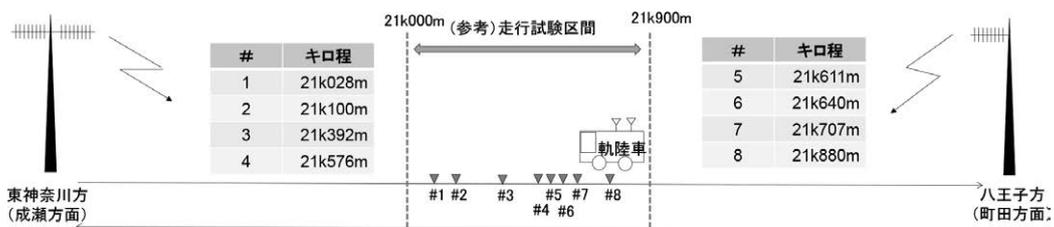


図9 八木アンテナ突合せ区間 軌陸車定置試験 概要図

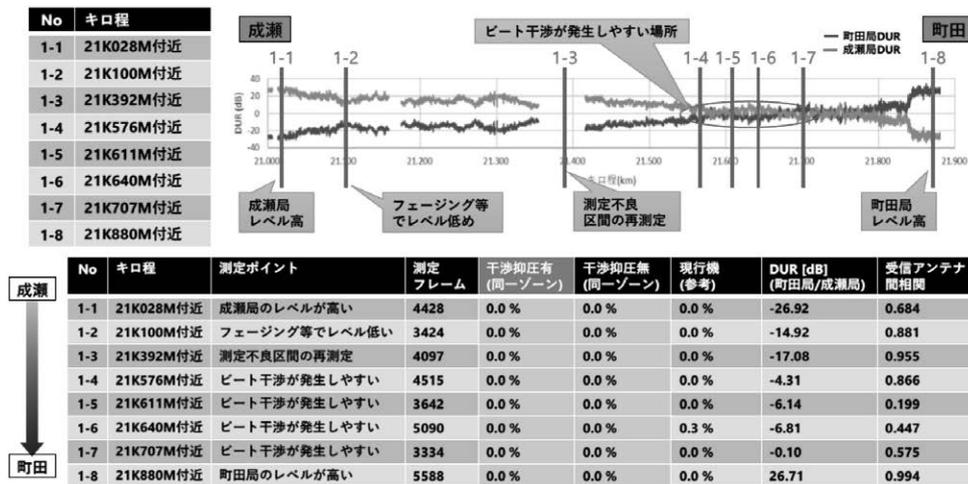


図10 八木アンテナ突合せ区間 軌陸車定置試験DUR分布およびFER特性結果

3・2・3 評価

(1) LCXゾーン境界区間 (ゾーン間) 試験

3.2.1項の結果より、現行機よりも次期機干渉抑圧有の受信性能が優れており、フレーム誤りが改善したことから、干渉抑圧技術の効果が大きいことを確認した。このため、現行システムのアンテナをそのまま利用して次期システムを導入しても、無線特性を劣化させることなく伝送容量倍増が可能であると考えられる。

(2) 八木アンテナ突合せ区間 (ゾーン内) 試験

3.2.2項の結果より、ゾーン内においても、次期システムによる伝送容量倍増が可能であると考えられる。

(3) 評価のまとめ

上記 (1)(2) から、ゾーン境界およびゾーン内において、現行システムと同等以上の回線品質を維持しつつ、伝送容量倍増が実現可能であることを確認した。実用化に向けた課題として、干渉抑圧処理を適用する場合は、移動局にゾーンを自動的に切り替える機能を実装する必要があり、その実現方法を継続して検討していく。

4. 結言

本研究開発では、在来線列車無線システムの現行システムの無線周波数帯域幅を変更することなく伝送容量倍増を実現するために、相対空間マッピング変調方式とDSTBCを組み合わせた方式を検討した。この方式により伝送容量は向上するが、同一周波数ゾーン境界付近において干渉区間が拡大し無線特性が劣化するため、干渉抑圧技術の導入を検討した。試作機を用いた現地試験により、移動局においてゾーン自動切替機能を実装する必要があるという課題は残るものの、伝送容量を倍増できることと、現行システムと同等以上の干渉抑圧技術の効果を確認した。今後は、将来更新予定の首都圏在来線デジタル列車無線システムへの次期方式適用に向けて検討していく。

参考文献

- 増田進二、佐野裕康、能田康義他、“送信ダイバーシティに適用する相対空間マッピング変調方式,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol.J98-B, No.3, pp.244-254, 2015/3.
- 井上学、山下真弘、長坂雄一、“次期首都圏在来線列車無線の試作試験,” 第60回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集611, 2023/11.