

無線式列車制御システムへのビームフォーミング技術の適用

北野 隆康* 岩本 功貴** 中村 一城**

Application of Beamforming Technology to Radio Train Control Systems

Takayasu KITANO Koki IWAMOTO Kazuki NAKAMURA

Recently, radio train control system has widely been introduced in urban areas. Since the shortage of frequency channels is concerned in sections with high dense lines such as urban areas, it is necessary to establish a method to control multiple lines with a small number of frequency channels. Therefore, we propose a method of transmitting information to multiple trains using a small number of frequency channels for radio train control system by applying beamforming technology in which base stations cooperatively control the directionality of transmitter.

キーワード：無線式列車制御，ビームフォーミング，MIMO，基地局連携

1. はじめに

近年、柔軟な運行制御や地上設備の削減などを目的として無線式列車制御システム¹⁾²⁾の導入・開発が進んでおり、複数の路線が併走するような区間への導入拡大も検討されている。現在、国内で実運用されている無線式列車制御用の無線通信システムでは、基地局ごとに周波数チャンネルを設定し、隣接する基地局同士で異なる周波数チャンネルを割り当てることで、基地局間の干渉を防いでいる。しかし、複数の路線が併走する環境を想定すると、隣接する基地局間のみならず併走する線区の基地局についても、それぞれが干渉しないように周波数チャンネルを割り当てることとなり、多くの周波数チャンネルの確保が必要になる可能性がある。また、保安装置と基地局が密接に関わるシステム構成となっており、列車が基地局間をわたって走行する場合には、非保安装置である基地局を保安装置である車上装置で切り替えるハンドオーバー処理を実施するなど、無線式列車制御システムに対応した専用の無線通信システムが必要となる。

一方、国内で無線式列車制御システムが開発された当初³⁾の時代に比べて無線伝送の技術が飛躍的に発展しており、高速大容量伝送や周波数の利用効率を向上させる手法⁴⁾⁵⁾⁶⁾が多く提案されている。

現在、国内で実用化されている無線式列車制御システムが使用している400MHz帯は、周波数がひっ迫している帯域であることから、限られた電波資源を有効に活用するために、周波数利用効率を向上させる技術が期待されている。そこで、本稿では、周波数利用効率の向上に関係する技術であるビームフォーミング技術に着目

し、無線式列車制御システムに適用することで得られる効果を整理するとともに、適用する機能・ネットワーク構成、および、伝送方式について検討し、適用可能性を提示する。

2. 無線式列車制御システムにおける課題

2.1 無線式列車制御システムの概要

無線式列車制御システムは、自列車位置を車上で認識するとともに、列車制御に関わる情報の地上—車上間での伝達に無線伝送を活用することで、柔軟な列車運行と運転保安に関わる地上設備の削減を図っている⁷⁾。システムを構成するための重要な要素として、図1に示すように、車上で認識した列車位置を地上装置に伝達すること、地上装置にて構成された進路と列車位置に従って各列車の防護範囲を認識して停止限界を設定すること、設定した停止限界あるいは停止パターンなどの制御情報

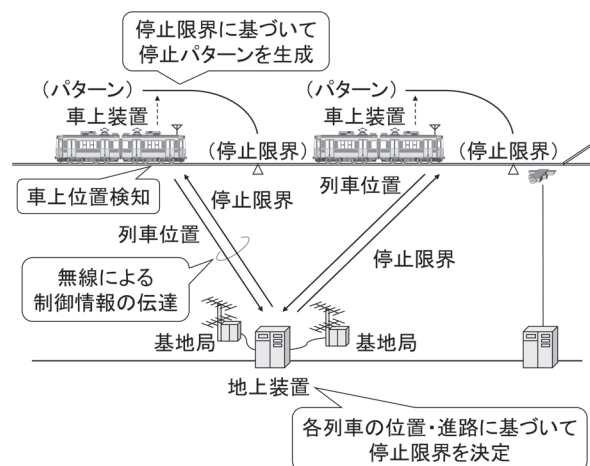


図1 無線式列車制御システムの概要

* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

を車上装置に伝達すること、地上装置から伝達された制御情報に従って列車を制御することなどがあげられる。

2.2 無線回線設計の課題

2.2.1 無線エリアの設計

無線式列車制御システムでは、必要なタイミングで制御情報を受信できない場合は停止制御を行うなど安全側制御となる機能が設けられる(図2)。これは安全を担保する観点では重要な機能であるが、停止制御は列車運行の安定性を阻害する可能性があるため、確実に制御情報を伝達できるように無線エリアを設計する必要がある。無線伝送は、周辺環境の変化による強度変動や、同じ周波数帯の電波による干渉、雑音などによって伝送品質が劣化するため、情報伝達の確実性を高めるためには、箇所ごとに所望の電波が広範囲に到達するように無線基地局の配置やアンテナの指向性・利得などの諸元を定める必要がある。一方、制御に必要な範囲を超えた箇所はまだ電波が到達する場合(オーバーリーチ)は、その電波が干渉源となり、制御電文の受信を妨害することになる。また、オーバーリーチへの対応が適切でない場合は、異なる地上装置との間で情報伝送を行ってしまい、制御不能となる可能性がある。

このため、無線式列車制御システムの設計においては、制御範囲内の列車に対する情報伝達の確実性を高める無線エリアの設計が重要な要素となっている。

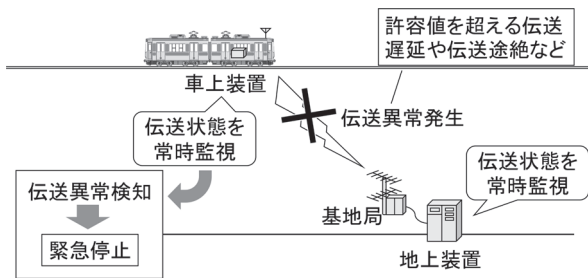


図2 安全側制御（停止制御）の例

2.2.2 周波数チャンネルの設計

現時点で国内で運用されている無線式列車制御システムは、近傍の無線基地局同士の電波が互いに干渉しないように、それぞれ異なる周波数チャンネルを割り当てることで対応している(図3)。しかし、使用できる周波数チャンネルには限りがあるため、所定の距離離れた箇所にも、同じ周波数チャンネルを割り当てて繰り返し使用している。そこで、あらかじめ電波伝搬試験などを実施して電波の到達範囲を確認し、電波が届かない箇所や不要な電波が過剰に受信されて干渉源となる箇所がないように設計している。そのため、無線式列車制御システムの導入において、必要十分な電波強度を得るための適切な基地

局配置の設計は容易ではない。

また、周波数チャンネルの割り当てについては、1つの路線のみに無線式列車制御システムを導入する場合には十分なチャンネル数であっても、複数の路線が併走する場合には、周波数チャンネルが不足する可能性がある。

仮に、必要な周波数チャンネル数を確保せずに併走する路線が増えると、同じ周波数チャンネルの基地局同士が近接する可能性が高くなり、基地局の配置がより困難になる。また、基地局配置と周波数チャンネルが適切でない場合は、列車運行の安定性を阻害する可能性がある。

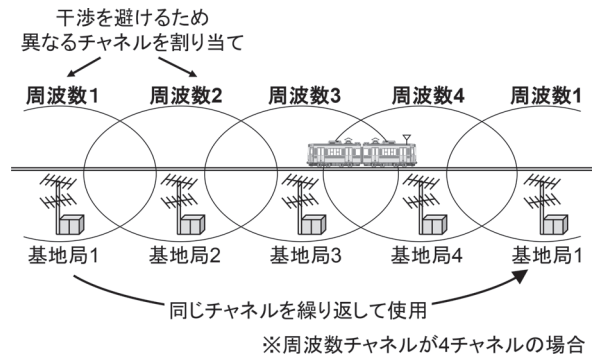


図3 周波数チャンネルの割り当ての例

2.2.3 ハンドオーバーに関わる制御

ハンドオーバーとは、基地局の境界付近を走行中の列車の車上装置が、これまで接続していた基地局から次の基地局に接続先を切換えることである。多くの無線式列車制御システムでは、列車の走行位置に応じて、次に接続する基地局を車上装置にて明示的に判断してハンドオーバー制御する方法がとられている(図4)。ハンドオーバーの際に接続が確立できない場合は、停止制御するなどの安全側制御がなされる。これは、列車制御システムの地上装置の制御範囲と基地局の無線エリアが対応するようなシステム構成であれば直ちに課題とならない。しかし、信号保安装置である地上装置と無線伝送装置ではライフサイクルが異なることから、将来的な装置の老朽取換えの際には、地上装置の制御範囲または無線エリアを考慮

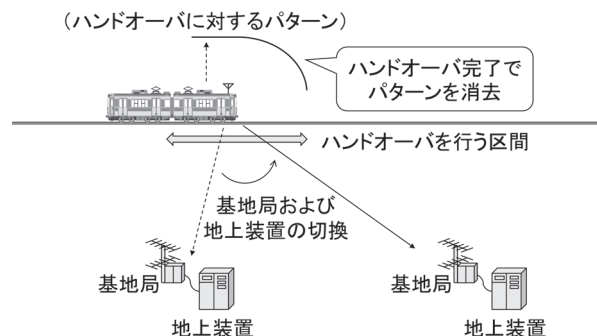


図4 明示的なハンドオーバー

する必要が生じ、課題となる可能性がある。

3. ビームフォーミング技術の適用シナリオ

3.1 ビームフォーミング技術の概要

ビームフォーミングとは、複数のアンテナを用いて指向性を制御する技術である。指向性を制御する技術としては、アンテナに給電する際の位相制御により指向性を制御するフェーズドアレイアンテナなどのアンテナ技術による手法があり、既に移動体通信やレーダーなどで実用化されている。しかし、これらの技術は実装が容易であるという利点があるものの、同一周波数では同じ情報しか伝送することができず、複数の移動局に対してそれぞれ異なる情報を伝送することができない。そこで、近年、無線LANなどでは、図5のように多重伝送技術を活用し、複数アンテナを前提とした信号処理により指向性を制御する手法であるMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) が提案されている⁴⁾⁵⁾。これをさらに拡張し、複数の基地局が連携して指向性制御を行うことも提案されている⁶⁾。複数の基地局が連携することで、基地局間での電波の干渉を抑えることや、無線エリア境界での伝送品質を改善することが可能となる。

本稿では、無線式列車制御システムに対して、複数基地局を連携して多重伝送を行う技術を活用した指向性制御を適用する手法とその構成について提案する。

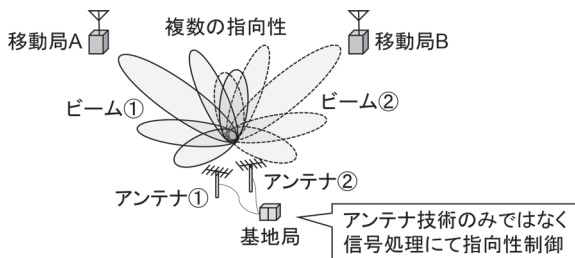


図5 ビームフォーミング技術の概要

3.2 指向性制御適用の利点

無線式列車制御システムに対して3.1節にて述べた技術を適用すると、周波数利用効率の向上と基地局の境界を意識しない地上一車間伝送（ハンドオーバーレスの無線伝送）が実現できると見込まれる。導入によって期待される効果を以下に述べる。

3.2.1 周波数利用効率の向上

情報ごとに異なるビームを形成することで、複数の列車に対して異なる情報を同一周波数で同時に伝送（多元接続）することができる（図6）。同じ基地局から各列車に対してそれぞれ異なる情報を送信するが、不要な列車にはビームを向けないように指向性を制御する。これにより、複数路線が併走する区間においても、同じ周波

数チャンネルを使用する異なる線区の列車に対して情報を受信させないことができる。

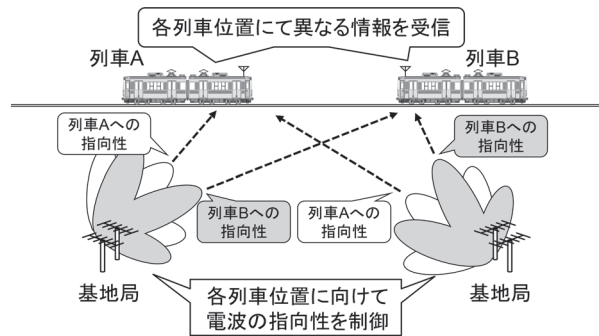


図6 同一周波数での同時接続

3.2.2 基地局の境界を意識しない情報伝送

列車に対して隣接する基地局が連携して指向性制御を行うことができれば、列車側で基地局の切換を意識することなく、継続した無線伝送が可能となる（図7）。これにより、保安装置の機能として列車位置に応じて明示的に基地局を切換えることなく、地上一車間間で継続した情報伝達が可能となる。

また、同一周波数において複数の基地局が連携して指向性制御しているため、現状の通信システムではオーバリーチによって干渉を引き起こす要因となっていた不要な電波を積極的に活用することができる。指向性制御のために連携している複数の基地局に、オーバリーチする電波の送信元の基地局を組み込むと、不要な列車への干渉を抑えることができるのみならず、伝送品質の向上が見込まれる。そのため、これまで課題となっていたオーバリーチが解消され、無線回線設計の検討が容易になる。

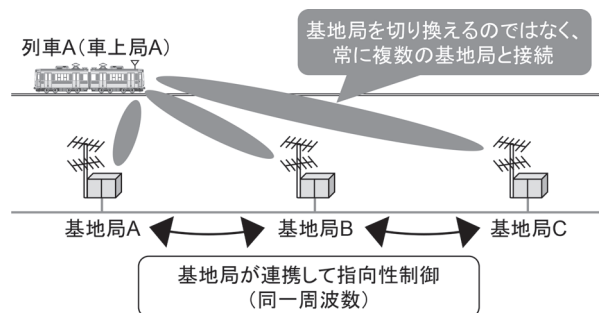


図7 基地局の境界を意識しない情報伝送

4. ビームフォーミング技術を列車制御システムに適用する構成の提案

4.1 適用する伝送手法の概要

本稿にて適用を想定するビームフォーミングの伝送方式の基本原則であるMIMO 伝送⁴⁾⁵⁾について述べる。

ここでは、地上・車上の無線局およびその間の伝搬路を図8のように表現する。送信側にて、送信する複数の情報（ビット）を変調した変調信号 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ に対して重み付けベクトル \mathbf{W}_T を送信信号にかけあわせておく事前処理（以降、これを事前処理 \mathbf{W}_T と呼ぶ）を行った後、 $\mathbf{S}(t)$ として伝搬路に送信する。なお、事前処理 \mathbf{W}_T が本稿で対象とするビームフォーミングの送信側指向性制御であり、変調信号 $\mathbf{X}(t)$ に対して、それぞれ異なる指向性を持たせることができる。

受信側でも同様に、伝搬路 \mathbf{H} を経て受信した受信信号 $\mathbf{R}(t)$ に対して重み付けベクトル \mathbf{W}_R をかけあわせる信号分離処理（以降、信号分離処理 \mathbf{W}_R と呼ぶ）を行って、所要の偏重信号 $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$ を抽出する。上記の関係は式(1)のように表現できる。

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}_R \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{W}_T \cdot \mathbf{X}(t) \quad (1)$$

ここで、伝搬路の応答 \mathbf{H} を送信側が事前に把握できるという前提で、事前処理 \mathbf{W}_T と \mathbf{H} と信号分離処理 \mathbf{W}_R の関係が式(2)のように対角行列化できる場合、 $\mathbf{X}(t)$ と $\mathbf{Y}(t)$ を1対1に対応させることができる。

$$\mathbf{W}_R \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{W}_T = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

この方式の適用にあたっては、情報伝送を行う前に送信局側で伝送路の応答 \mathbf{H} に対応する事前処理 \mathbf{W}_T を用意して指向性制御を行う必要がある。

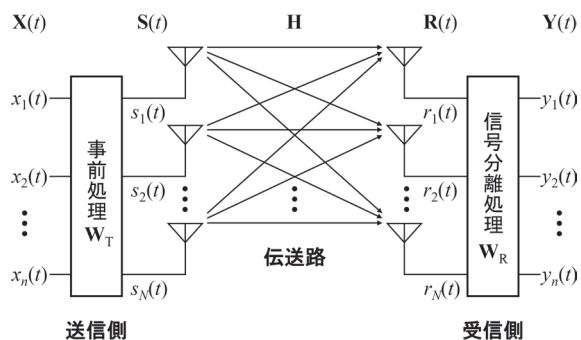


図8 MIMO 伝送のモデル

4.2 鉄道環境へのビームフォーミング技術適用の課題

4.1 節に示したように、本稿で採用するビームフォーミングの方式は送信局側で情報伝送を行う前に事前処理 \mathbf{W}_T を決定する必要がある。情報伝送の直前に受信側で伝搬路の応答 \mathbf{H} を測定して送信側に通知することが一般的である。帯域幅が広く端末の移動が少ない無線LANなどの環境では、この処理に要する時間が短いため実装が比較的容易であり、実用化されている。しか

し、この処理に長い時間を要すると伝搬路が変化して所望の指向性制御が実施できない。特に鉄道で広く使用している周波数帯（400MHz帯）の場合は、帯域幅が狭く、かつ、端末側である列車が高速で移動するため、該当する事前処理 \mathbf{W}_T の適用下で伝送できる伝送量が少なくなることに加えて伝搬路や事前処理 \mathbf{W}_T の把握に割り当てることができる時間が短くなる。そのため、現在の鉄道で広く用いられている帯域が狭い無線通信システムにそのまま適用することは困難である。

そこで、次節以降では、400MHz帯を用いている無線式列車制御システムへのビームフォーミング技術の適用を目的として、適用手法とシステム構成を提案する。

4.3 列車制御と情報伝送の機能的な独立性の確保

国内におけるこれまでの無線式列車制御システムの開発においては、当時の技術的な背景や必要な信頼性の確保のために、運転保安機能を有する列車制御装置と地上・一車上間の情報伝送を行う無線伝送装置を一体として開発してきた。しかし、ビームフォーミングのように基地局で完結する伝送技術を適用するには、無線伝送装置を保安機能から独立させ、列車制御装置の動作に影響を与えないことが重要である。保安機能の観点でも、無線伝送装置に依らず列車制御装置にて安全を担保する必要がある。また、列車制御装置と無線伝送装置では装置の更新周期や技術の進展のスピードが異なるため、装置の老朽取換えや更新のタイミングが異なる。さらに、列車制御装置は無線伝送装置に比べて鉄道事業者や線区ごとに異なる取扱いに依存する部分もあり、機能を統一することが困難である。以上の理由により、導入拡大の効率化の観点では、列車制御装置の構成にかかわらず無線伝送装置を設計できることが望ましい。

そこで、列車制御装置が担保する機能（列車制御に関わる機能）と無線伝送装置が担保する機能（情報伝送に関わる機能）を明確に分け、それぞれの機能を独立させる構成を提案する（図9）。

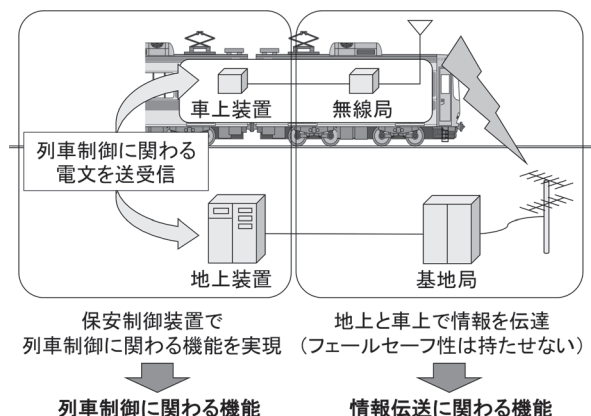


図9 列車制御と情報伝送の機能的独立

4.4 ビームフォーミング技術を適用する無線式列車制御システムの構成

ビームフォーミング技術において必要な、送信側での事前処理 W_T の把握については、その都度伝搬路を推定する方法と、事前に測定した伝搬路をデータベース化して使用する方法が考えられる。前者については、4.2 節に示した伝搬路推定に関わる課題を解決するために伝送パラメータの調整が必要となるが、多様な環境に対応できることが利点である。一方、後者については、列車が走行する箇所が特定できることが条件となるが、伝搬路推定が不要となることが利点である。鉄道環境では線路上の列車の走行位置が把握できることから、後者の事前に測定した伝搬路をデータベース化して使用する方法が可能である。そこで、本稿では、無線式列車制御システムで一般的である列車位置認識とデータベースを活用する手法を提案する（図 10）。なお、この場合は、事前に電波伝搬測定試験などを実施して、列車位置に応じた事前処理 W_T および信号分離処理 W_R を測定しておき、データベースに登録しておく。列車が走行する際は、基地局および車上局の両方でデータベースを参照し、登録された値を用いて指向性制御を行う。

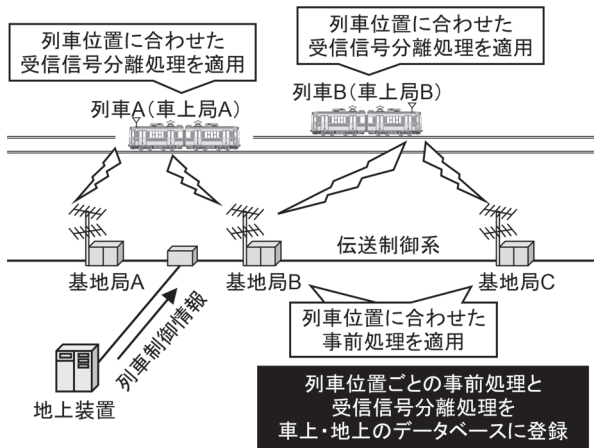


図 10 無線式列車制御システムの構成

5. 伝送品質の試算

無線式列車制御システムへのビームフォーミング技術の適用にあたり、伝搬環境について受信強度の変動を確率分布で表現した汎用的なモデルで表現したシミュレーションを実施し、伝送品質を試算した。

5.1 鉄道伝搬環境のモデル化

実際の鉄道環境の電波伝搬では、地上の基地局と車上局の間の伝搬の過程において、沿線構造物などの影響により反射、回折、散乱が発生する。また、列車の移動に伴って、電波の経路が変化するとともに、ドップラー効果

が発生する。伝搬の過程は周囲の環境に依存するため、伝搬の過程を統計的な分布に基づいてモデル化した周辺環境を特定しない汎用的なモデル⁸⁾ が広く用いられている（図 11）。このモデルは、反射、回折、散乱して到達する複数経路の電波をまとめて表現し、その信号振幅の確率をレイリー分布にて模擬するモデルである。基地局と車上局間に直接到達する直接波がない（見通し外）場合は、到達する波の信号振幅の確率がレイリー分布に基づくレイリーフェージングに、直接波がある（見通し内）場合は、直接波に加えてレイリー分布に基づいた波を足し合わせた波となり、信号振幅がライス分布に基づくライスフェージングとなる。

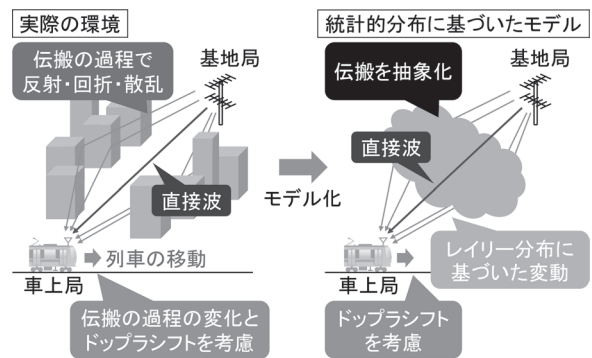


図 11 電波伝搬路のモデル化

5.2 シミュレーション条件

伝送品質を推定するシミュレーションの実施にあたっては、無線式列車制御システムで想定される無線伝送を適用した（表 1）。また、電波伝搬については、図 12 に示す環境を想定した。なお、車上局が隣接する基地局との間にある場合は見通し内であるとしてライスフェージング

表 1 無線伝送の諸元

周波数	400MHz
帯域幅	6.25kHz
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK

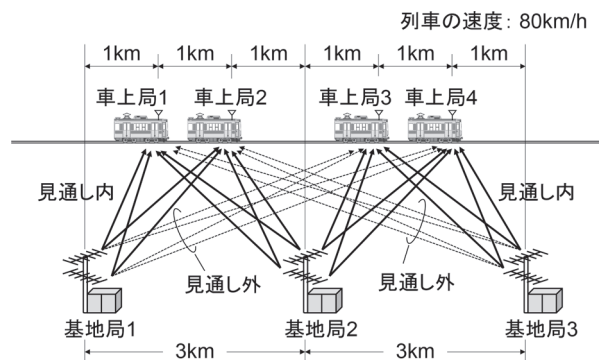


図 12 想定した電波伝搬環境

ング環境とし、車上局が隣接する基地局の間でない場合は見通し外としてレイリーフェージング環境とした。

5.3 ビット誤り率特性

無線伝送方式としての伝送品質を評価するため、誤り訂正符号を適用しない状態での信号電力対雑音電力比に対するビット誤り率特性を求めた（図13）。

図13の結果から、信号電力対雑音電力比が10dB以下の場合、誤り訂正符号を付加しない場合のビット誤り率が 10^{-2} 以下となっている。これは、誤り訂正符号を付加することで復号可能な誤り率であることから、良好な伝送が可能であるといえる。これにより、提案した構成にてビームフォーミング技術を適用できる可能性が示された。

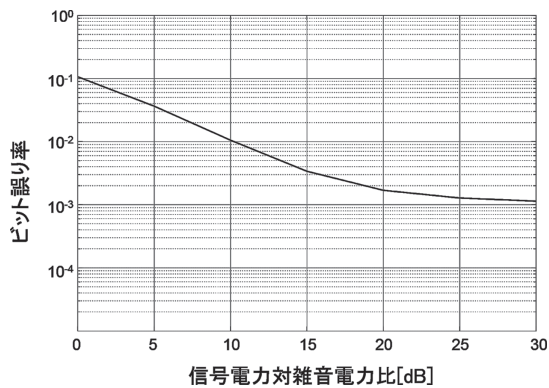


図13 伝送品質の推定結果（ビット誤り率特性）

6. まとめ

限りある周波数資源を有効に活用して無線式列車制御システムを導入・展開する手法の一つとして、複数基地局を用いて電波の指向性を制御するビームフォーミング技術の適用により単一周波数で無線伝送を行う手法に着目し、メリットと適用手法を検討した。

ビームフォーミング技術の適用で期待される効果を整理し、基地局の境界を意識しない情報伝送と干渉を低減させる指向性制御により周波数利用率の向上が見込ま

れることを確認した。また、地上一車上間の伝送方式に依らず、列車制御システムの安全性を担保する機能を維持するネットワーク構成を検討し、無線式列車制御システムへの適用構成を提案した。提案した適用構成にてシミュレーションを実施し、伝送品質を推定した。これらにより、ビームフォーミング技術の無線式列車制御システムへの適用可能性に対する見通しを得ることができた。

今後の課題として、無線式列車制御システムの動作やプロトコルを踏まえて特性を評価する必要があること、鉄道沿線の電波伝搬についてより具体的なモデルを構築して詳細な伝送品質を検証する必要があることがあげられる。これらの課題に対して、2023年度を目途に無線式列車制御システムの環境での特性評価手法を確立するとともに、確立した特性評価手法に基づいて、基地局の開発に向けた要求仕様をとりまとめる予定である。

文献

- 1) 八木圭介, 山口智敬, 内山大輔: デジタル無線を用いた列車制御システム (ATACS) の導入について, 計測と制御, Vol.55, No.05, pp.443-447, 2016
- 2) 宮本慎司, 山本慎, 間崎光一郎: 無線式 ATC の開発および和歌山線への導入, JREA, Vol.61, No.8, pp.23-26, 2018
- 3) 山本春生, 長谷川豊: 無線式列車制御のプロトタイプ CARAT, RRR, Vol.76, No.12, pp.24-27, 2019
- 4) エズィオ・ピリエリ 他著, 風間宏志, 杉山隆利 監訳: MIMO ワイヤレス通信, 東京電機大学出版局, 2009
- 5) 大鐘武雄, 小川恭孝: わかりやすい MIMO システム技術, オーム社, 2009
- 6) T. Ichikawa, K. Ishihara, T. Murakami, Hirantha Sithira Abeysekera, Y. Asai, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "High-speed Wireless LAN for Broadband Wireless Home Networks," NTT Technical Review, Vol.11, No.3, pp.1-6, 2013.
- 7) 北野隆康: 無線を用いた列車制御, RRR, Vol.73, No.4, pp.28-31, 2016
- 8) 唐沢好男: デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 2003