

高速鉄道で大容量通信（最大 1 Gbps）を実現する ミリ波方式列車無線の開発

技術開発部 信号通信技術チーム チームマネージャー

田口 尚

技術開発部 信号通信技術チーム チームマネージャー（鉄道通信担当）

松村 善洋

1 はじめに

東海道新幹線の列車無線は、指令員と乗務員との間で通話できる専用電話として、1964年の開業当初から使用しています。当時の無線通信は、空間波方式でしたが、1989年の設備の老朽取替を機に、通信ケーブルとして漏えい同軸ケーブルを用いた LCX 方式に変更することで、トンネルや高層ビル群の間を走行するときでも安定した通信を実現し、周波数繰り返しを不要とすることで多チャンネル化をはかりました。これにより指令電話や公衆電話の回線数を増やすとともに、車両機器の動作状態や車内のテロップニュースなどのデータを伝送する機能を実現しました。その後、2009年にデジタル変調技術を導入したデジタル LCX 方式へ移行して通信品質をさらに向上するとともに通信容量の拡大(最大 3Mbps)を図り、現在に至っています。

近年、メンテナンスやセキュリティ向上を見据えた地上と車上とのさらなる大容量通信に対するニーズが高まってきたことから、大容量通信に適したミリ波の列車無線システムへの活用を目指して技術開発に取り組みました。ミリ波を採用するには様々な課題がありましたが、一つひとつをクリアすることでミリ波無線機の開発に成功し、最大 1 Gbps の大容量通信を実現するミリ波方式列車無線を東海道新幹線全線に導入することが決まりました。

本稿では、ミリ波無線機の概要と、最も大きな課題であった豪雨モードの開発、及び、ミリ波の特徴を生かしたリフレクタによる車両所構内の無線機数削減について紹介します。

2 ミリ波の性質

携帯電話（5G：第5世代）でも注目されて始めているミリ波は、周波数が 30～300GHz すなわち波長が 1～10mm の電波をさします。周波数が高いミリ波は、周波数が低い電波に比べて広い帯域幅を使用できるので同じ時間でより多くの情報を送ることができます。その一方で、ミリ波のエネルギーは、空気中の水分子や酸素分子に吸収されて減衰してしまうため、長距離通信には向きません。特に、降雨時には電波に乗せた信号が弱まって雑音に埋もれてしまい、信号を再生できなくなるという問題がありました。地上の無線基地局間隔をせばめて基地局を増やせば、大雨でも安定して通信できますが、無線機数が増えてしまいます。

また、ミリ波で遠方と通信するために指向性の高いアンテナを採用すると電波は拡がらず、車両基地のような広い範囲での通信には不利になり、留置線ごとに多数の基地局を設置する必要性がありました。

3 ミリ波無線機の概要

現行の LCX 方式と開発したミリ波方式の列車無線システムを比較したものが表 1 です。無線通信部分を構成するミリ波無線機は、地上および車上に設置し、地上に設置するものを地上局無線機、車上に設置するものを車上局無線機と呼びます。いずれの無線機も 1 台の IDU（In Door Unit）とそれに接続される複数台の ODU（Out Door Unit）で構成されています。最大伝送容量約 500Mbps の無線通信に必要な機能を IDU と ODU が分担しており IDU が変復調機能を、ODU は 40GHz 帯への周波数変換、増幅および、アンテナ機能をもってい

ます。なお、車上局は1号車と16号車に搭載し、2組の無線機で最大1Gbpsの伝送容量を実現しています。

表1 LCX方式とミリ波方式の特徴の比較

列車無線方式	LCX方式（現行）	ミリ波方式（次期）
使用周波数	400MHz（UHF帯）	40~50GHz（ミリ波帯）
伝送容量	約3Mbps	約1Gbps
設備の特徴	東京から新大阪まで 上下線に切れ目なくLCXを布設	東京から新大阪まで ミリ波無線機を一定間隔に設置
地上設備写真	 ※反対線路側にも布設されている	 ※一定間隔で設置される
車上設備写真	 ※車体側面カバーを外した状態	 ※先頭カバーを外した状態

3 基地局を削減する工夫

(1) 降雨減衰対策「豪雨モード」の開発

まず、過去12年間の東海道新幹線沿線での降雨の実績を調査したところ、10分間に最大で30mm程度（時雨量に換算すると180mm程度）が数回発生していました。この調査結果を踏まえて、10分間雨量30mmの雨が降り続いた場合であっても安定した通信を確保できるよう、ミリ波無線機の開発を進めることとしました。

ミリ波は空気中の水分子や酸素分子に吸収されて減衰することは先に述べましたが、10分間雨量30mmの降雨の中では、電波は1km先で晴天時の4500分の1になる

ことがわかりました。この状態でも一定の無線品質を維持するためには、地上局の設置間隔を狭めて多数配置すればよいのですが、導入コストが膨大となるため現実的ではありません。そこで、何らかの対策を検討することにしました。

電波が空気中で減衰すると、周囲の雑音と混在して信号を取り出すことが非常に難しくなります。雑音の中から信号を取り出す方法を検討するにあたり、情報によって決まった波形である信号とランダムな波形が混じりあっている雑音との違いに着目しました。電波が減衰したとしても、同じ信号を複数回にわたって繰り返し送信し、受信側でうまく重ね合わせれば、同じ波形が繰り返される信号は強調される一方で雑音はお互いに打ち消しあいます。一般にはシンボル合成とよばれる手法ですが、当社ではこの手法を「豪雨モード」と呼ぶことにしました。この手法をイメージ化したものが図1です。

大雨等により通信が途絶えると自動的に豪雨モードに移行して同じ信号を繰り返し送信します。受信側では電波の先頭部を見つけてうまく重ね合わせるのですが、この開発に大変苦労しました。

豪雨モードでの無線信号は45GHzの搬送波（情報を載せる波の意味）の位相（例えば45度を0、225度を1などに対応）に情報ビットを載せています（図2）。送信機の送信する45GHzのミリ波信号と、受信機の内部で発生する45GHzの信号は、少々はずれがあるのが一般的です。しかし送信機と受信機その僅かなズレが、図2における位相の回転に対応するため、正確に合わせる必要（同期）が必要です。豪雨モードになるとこの同期が正確でないと重ね合わせの効果が得られないことから、更に難しくなります。

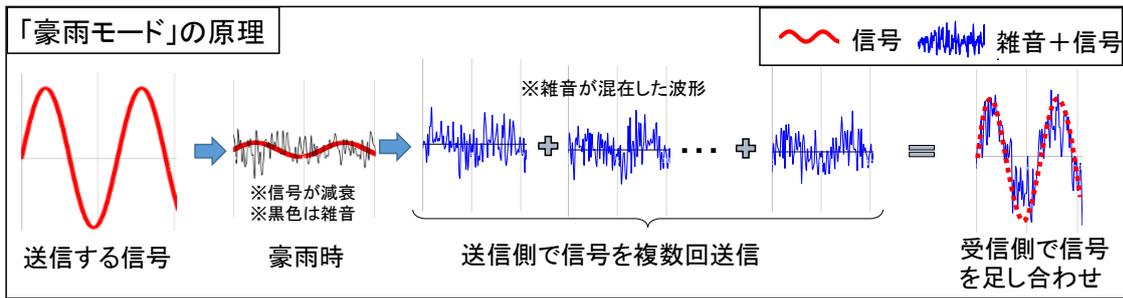


図1 豪雨モードにおけるシンボル合成のイメージ

最初に開発した豪雨モードでは、16回の繰り返し信号を受信している間に位相が回転してしまい、信号の合成効果が得られない状況でした。

号で AFC (自動周波数同期) 機能を実現しています。更に主信号に埋め込まれた参照信号の回転速度を観測する機能を実装することにより、豪雨時においての信号の重ね合わせ効果を得ることが出来ました。

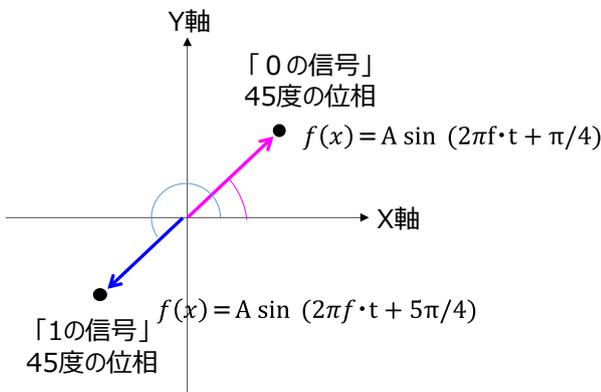


図2 位相に情報を載せるイメージ

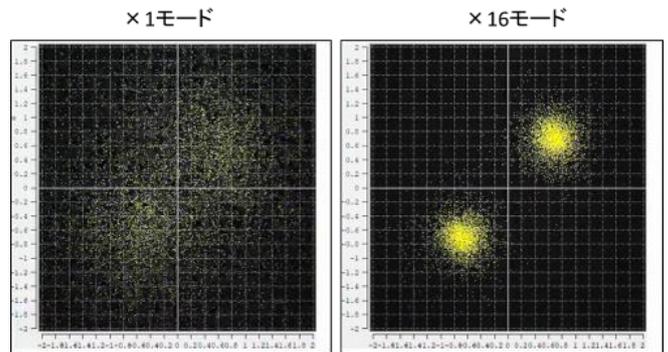
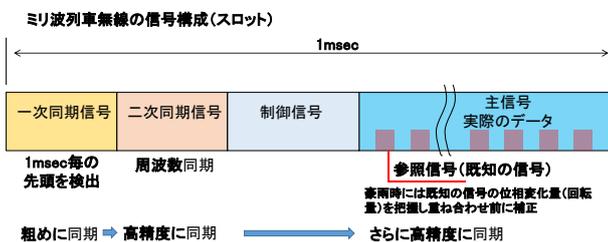


図3 豪雨モードの効果

対策として、電波の先頭を表す周期的な同期信号の正確なタイミングを、雑音に埋もれた中でも正しく読み取り、更に情報の中に埋め込んだ参照信号(既知の信号)の回転量を観測し補正する手法を考案し、実装に成功しました。

豪雨モードの効果を視覚的に表したものを図3に示します。ここでは、合成しないもの(×1モード)と16回合成したもの(×16モード)を示しています。図2の45度と225度に情報があると示しましたが、×1モードの場合は45度と225度の信号点が混ざってしまっているのが、×16モードではしっかり45度と225度の信号点が分離できているおり、情報ビットの0と1が区別できます。



この豪雨モードの開発により、地上局間隔を約1.3倍に拡大でき、地上局を2~3割削減することができました。

図3 豪雨モードで同期に使用するの同期信号、参照信号の位置と役割

(2) 車両基地内の地上局の削減

図3に豪雨モードにおける同期に使う信号の位置と役割を表します。一次同期信号でミリ波通信における最小通信単位である1msec毎の切れ目を判定し2次同期信

車両基地では、多数の車両が横並びの留置線に留置されており、それぞれの車両(車上局)が地上局と接続して通信する必要があります。先に述べたように車上局のミリ波無線機は指向性の高いアンテナを採用することで、

長距離通信を実現しました。一方、車両基地では複数の車両が横並びに留置されるため、それぞれの留置線の端部に車両と正対するように地上局のアンテナを設置する必要があります。その際、地上局のアンテナを車両から遠ざければ電波が拡がり地上局を少なくできますが、用地の制約から車両とアンテナとの間に距離をとれない箇所があります。

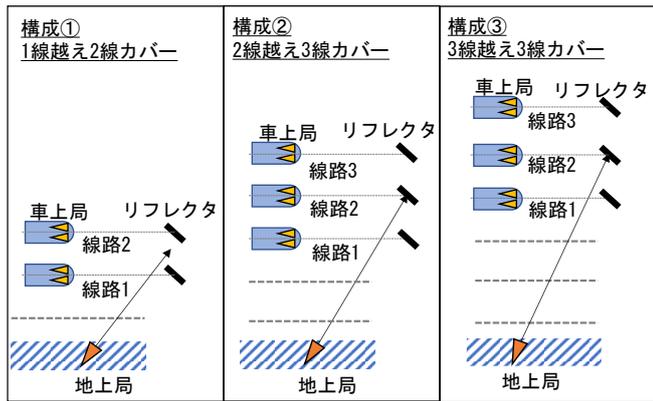


図4 3つの地上局構成案

一方で、留置線の形状が直線であること、車両は必ず同じ場所に留置することから、車両の停止位置から少し離れたところに電波を反射させるための板（以下、リフレクタ）を置いて、図4のように車上局と地上局の距離を稼ぎ地上局の数を減らすことにしました。実際に車両基地での試験やシミュレーションの結果から図4の3つの地上局構成を採用しました。

図4の構成②を例に配置の特徴を示します。この場合は2線を越えた先の3線にリフレクタを置きミリ波の電波を線路に向けて反射します。この配置を検討するにあたり、電波の放射方向にリフレクタが重ならない範囲でかつ、狭い放射方向の間に3つのリフレクタを配置しよう、工夫してリフレクタを配置しました。

リフレクタは、ミリ波の波長が短いという特徴を十分に生かしています。必要な反射板の大きさは波長に依存し、周波数が低いほど辺の長さが長くなるためミリ波の場合はある程度小さい反射板を利用することが可能です。今回は施工のしやすさも考慮し反射板の1辺を50cmとし、電磁界解析とレイトレースシミュレーションにより

その使用可能性を確認するとともに実測でも、使用可能であることを確認しました。直轄で分析したレイトレースシミュレーション結果の例を図5に示します。リフレクタにおける反射が車上局への到来電波の主たる成分を占めることが分かりました。また車両所構内においてこの無線機の配置を再現し、シミュレーション結果と実測の受信レベルを比較した結果を図6に示します。これにより実測とシミュレーション結果の傾向がほぼ一致することが分かりました。

図4の構成①、②、③を組み合わせて実際の車両基地に適用した場合、19ある留置線に対して、7つの地上局でカバーできることが分かり、その構成を採用することとしました。

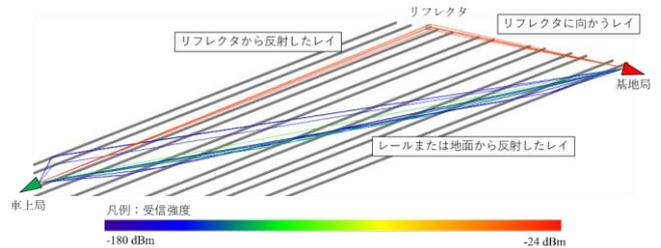


図5 レイトレースシミュレーションの例

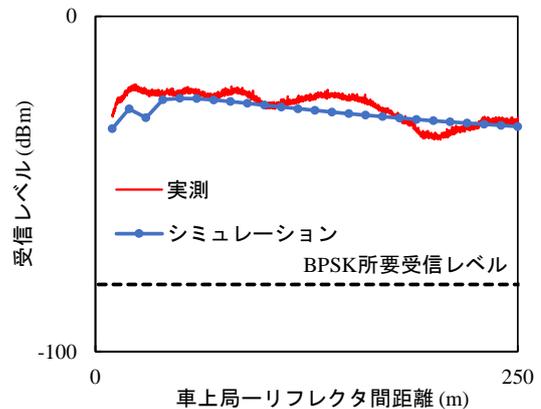


図6 シミュレーションと実測の比較

4 おわりに

本稿では、大容量通信による新しい東海道新幹線列車無線システムに採用したミリ波無線の開発の一部について紹介しました。

ミリ波列車無線は、2013年度から8年間の調査、開発

期間をへて、ミリ波無線機の小型化、低コスト化に成功し、東海道新幹線の次期列車無線システムに採用されることになりました。現在は、2027年初の使用開始にむけて、地上局の新設工事や車上局の改良工事（現行のLCXデジタル方式、アナログ方式無線機を改良し、ミリ波無線機を加えた3方式に対応する工事）が進められています。

今後は、今回完成した最大1Gbpsという大容量通信基盤を活用し、メンテナンスの革新をはじめとした様々なアプリケーションの開発に取り組んでいきます。

謝辞

本ミリ波列車無線の実用化に向けて開発に携わって頂いた、日本電気株式会社、三菱電機株式会社の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

松村善洋ほか「ミリ波の新幹線環境での活用を想定した45GHz帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔」2022年3月、信学論(B)，Vol.J105-B.no.3

白井大貴ほか「リフレクタによるミリ波方式列車無線の通信エリアの拡大」2022年4月、電子情報通信学会 無線通信システム研究会，信学技報 RCS2022-05



田口 尚
信号通信技術チーム
電気学会員

鉄道分野以外を見渡しても、ミリ波を使ったこれだけ大規模な移動体無線通信システムは、世界にありません。この開発で培った無線技術を、次代の鉄道システムに活かしたいと思います。



松村 善洋

信号通信技術チーム

工学博士、技術士（電気・電子）、電子情報通信学会会員、電子情報通信学会無線通信システム研究会専門委員、電気学会員

鉄道に無線通信技術は必須です。急速なモバイル通信技術の発展に追従するのは大変ですが、地上車上間通信を更に発展させ、お客様サービスを充実させる構想を実現すべく様々な検討を進めています。