

ミリ波技術の鉄道応用に関する動向

川崎 邦弘* 中村 一城*

Trend of the Development of Millimeter Wave Technology for Railway Applications

Kunihiro KAWASAKI Kazuki NAKAMURA

Nowadays, everybody can easily use various wireless communications and receive radio broadcasting services anytime and anywhere. But then, frequency spectrum allocations have been tightened because of the diversification of the utilization of frequency spectrums and the expansion of the usage of broad band communications. Therefore, Ministry of Internal Affairs and Communications has drawn up “Action Plan for Spectrum Reallocation”, and has been promoting various projects to open up new applications by using extra high frequency range and to develop new technologies for improving the usability of the frequency spectrum. The action plan mentions the radio communication systems used in railways. Thereupon, Ministry of Internal Affairs and Communications has started some research and development projects of railway application using a 40 GHz band and a 90 GHz band. This review article describes the trend of the development of applications by using millimeter wave technology, and the efforts of our institute in this field are also reported.

キーワード：ミリ波，対列車通信システム，レーダー，RoF，リニアセル

1. はじめに

近年，電波を利用した様々な放送・通信サービスを誰でも手軽に利用できるようになってきている。しかしその一方で，電波利用の多様化とブロードバンド化に伴い，周波数資源がひっ迫している。このため，総務省では，「周波数再編アクションプラン」を策定し，既存の周波数資源の有効利用と，ミリ波など新しい周波数資源の開拓を進めている。アクションプランでは鉄道も取り上げており，40GHz帯や90GHz帯を鉄道分野で利用できるようにするための研究開発が推進されている。本稿では，ミリ波帯の技術開発に関する動向を述べたのち，鉄道総研におけるミリ波に関する現在の取り組みを解説する。

2. ミリ波の概要

2.1 ミリ波の定義と特徴

ミリ波は，周波数が30GHz～300GHzの電波で，波長が10mm～1mmであることからミリ波と呼ばれる。現在，鉄道で多く利用されている150MHz帯や300MHz帯の波長は2m～1mである。波長はアンテナを設計するうえで最も重要な値で，波長が短いほどアンテナを小型化できる。

ミリ波には，①直進性が強い，②利用できる周波数幅が広い，などの特徴がある。①の特徴は，波長が短いこ

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

とによるもので，回折損が大きいため電波が遮蔽物の陰に回り込みにくいことを意味する。また，②の特徴は，周波数が極めて高いことによるもので，具体的に例を挙げると，350MHz帯では1chあたり数kHz幅～数十kHzの周波数幅を利用するのが一般的であるが，ミリ波帯では1chあたり数MHz～数GHzと1000倍以上広い周波数範囲を利用することができる。

ミリ波の最も身近な用途は，通信とレーダーであろう。通信・レーダー以外の用途としては，電波天文や物性研究などにおける計測用途（星間分子から放射される電波の観測，ミリ波の吸収特性を測定する，など），加熱・殺菌，エネルギー伝送などがある。通信への適用という面では，①の特徴により，電波の送受信方向を絞りやすいため，鉄道のようにサービスエリアが線状の場合には，沿線との混信・干渉を回避しやすく，送信電力を大きくできるというメリットがある。また，②の特徴から大容量のデータ伝送が可能である。レーダーへの適用という面では，①の特徴により電波を照射する範囲を狭くでき，②の特徴によって分解能を高められるため（レーダーの位置分解能は，使用する周波数幅が広いほど細くなる），高い位置精度でセンシングが可能となる。また，霧の中や布・板の裏など，光では見えない環境でもミリ波は透過できるため，悪条件の下でも物体の検知が可能である。ただし，レーダーが検知できる距離や物体の大きさは，物体の反射断面積（照射された電波をどのくらい照射方向へ反射しやすいかを表す量）に依存する。こ

特集：信号通信技術

のため、一般的には電波を反射しにくい物体の検知は困難とされている。

2.2 ミリ波を利用する際の課題

ミリ波の「波長が短く直進性が強い」という特徴は、ミリ波を利用する際の課題も発生させる。ミリ波では見通し外には電波が届かないため、見通し内での通信が基本となり、ビル陰等の見通しがとれない場所では、アンテナや反射板などを密に配置する必要が生じる。また、波長が短くなるに従って、伝搬媒体中の酸素分子や水分子によって電波が吸収される現象が無視できなくなり、さらに降雨による減衰量も大きくなる。ITU-R（国際通信連合—無線通信セクタ）が勧告している定義と計算法¹⁾によれば、乾燥大気中での減衰は60GHzと118GHz付近で最も大きくなっており、伝搬距離が他の帯域よりも短くなる。免許不要で利用できる一部の60GHz帯の無線システムは、この乾燥大気中での大きな減衰によって電波が遠くまで飛ばないという特性を混信防止に活かしており、近距離通信システムに利用されている。さらに、水分子(H₂O)による吸収減衰についても、周波数が高くなるに従って減衰量が増え、22GHz付近と183GHz付近で大きなピークが見られる。また、ITU-Rが勧告している降雨減衰量の予測法²⁾によれば、周波数が高くなるほど、また降雨強度(時間雨量[mm/h])が強いほど、kmあたりの減衰量が単調増加する結果が得られる(図1)。なお、降雨減衰量は、垂直偏波より水平偏波の方が大きいとされている。

3. ミリ波利用の歴史と動向

3.1 国内の概況³⁾

日本におけるミリ波の利用に関する研究開発の歴史は比較的早く、1950年代から35GHzや40GHz帯を用いた通信システムが開発されてきた。主に地上での固定局間通信への適用が主たるターゲットであったが、1960年代末頃からは衛星通信回線への適用検討が、また1970年代後半からはレーダーシステムへの適用検討

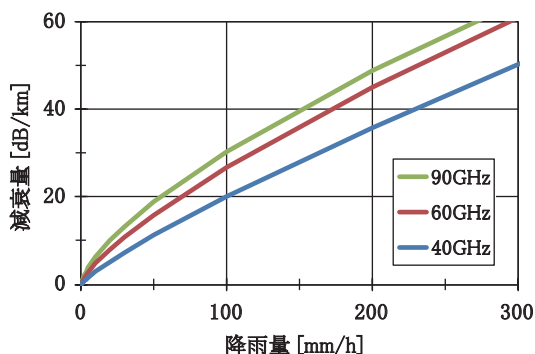


図1 ITU-R P.838-3 の手法で計算した降雨減衰量

が始まった。1980年代に入ると50GHz帯の利用が始まり、1983年には50GHz帯簡易無線局の制度が利用可能となった。1990年代には60GHz帯、76GHz帯が利用されるようになった。

ミリ波通信に関しては、38GHz帯(無線アクセスシステム)、50GHz帯(簡易無線システム)、60GHz帯(特定小電力無線システム)のほか、公共・一般業務用として、37GHz帯、44GHz帯、56GHz帯、70GHz帯、81~86GHz帯などが割り当てられており、比較的近距离で数十~数百Mbps以上のデータ伝送を行うシステムが利用されている。60GHz帯の無線LANも既に実用域に入っており、IEEE 802.11adとして規格化されている。また近年では、120GHz帯での10Gbpsの無線通信実験⁴⁾や、90GHz帯での40Gbpsの無線通信実験⁵⁾など、より高い周波数領域の開拓がすすめられている。ミリ波帯には通信用途に割り当てられていない帯域が多く残されており⁶⁾、今後の超大容量の無線データ伝送を行ううえで魅力的な帯域である。

しかし、ミリ波帯は将来の高速大容量の伝送媒体として期待されているものの、現状では普及が進んでいない。この理由として、コストの問題が指摘されている。ミリ波の発振・変復調・増幅に使用されるデバイスは高価なうえ、広いサービスエリアをカバーするために多数の無線局が必要となるため、トータルコストが非常に高くなってしまふ。この課題を解決するための一つの方法として、光ファイバ通信との融合が検討されている。高速・高性能のO/E変換(光-電気変換)技術とRoF技術(Radio on Fiber:無線信号を光ファイバで伝送する技術)、光スイッチング技術の技術を組み合わせることにより、図2に示すように、広いサービスエリアを少ないミリ波デバイスでカバーすることが可能となりつつある。

一方、レーダーに関しては、近年は主にITSにおける衝突防止や自動運転のためのセンシングの手段として技術開発が進められており、60GHz帯や76GHz帯のレーダーシステムが既に実用化されている。近年は、レーダーとカメラを組合せ、電波と可視光がそれぞれ得意とする

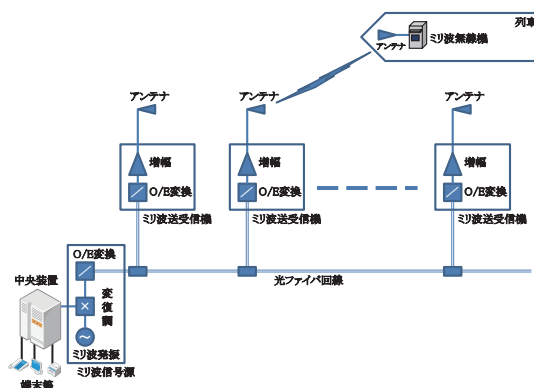


図2 RoF 技術を活用した列車無線の構成例

センシング範囲を受け持ち、より精度のよい物体検知を行う仕組みが開発されている。

3.2 鉄道分野における利用状況

鉄道においても、一部でミリ波が利用されている。通信に関しては、ワンマン運転時にホームにおける乗降客の様子などの監視画像を運転士へ伝送するシステムや、車内広告情報を更新するためのシステム、あるいは車両基地構内における入換作業を支援するための無線システムなど、近距離で大容量の情報を伝送する必要がある用途に60GHz帯の簡易無線システム等が利用されている。また、センシングに関しては、60GHz帯のレーダーシステムを応用した踏切支障検知システムが開発されている。

走行する列車と地上間で連続的に通信を行うためのミリ波システムについては、1980年代に50GHz帯の簡易無線システムが登場した頃から行われてきた。当時、LCXに代わる大容量の対移動体通信システムとして、鉄道環境における伝送特性の把握からシステム設計の提案まで、具体的な応用検討が行われた^{7) 8)}。

鉄道は通信エリアが線状に長く分布し、かつ通信相手である列車の位置を把握することができる。このため、列車が存在する方向だけに電波が集中するようビームを制御することができるミリ波は、対列車通信の伝送媒体として理想的と言える。さらにトンネル内では、電波がトンネルの壁面で反射しながら伝播することにより、明かり区間よりも長距離を伝送することが可能となる。

このようなミリ波による対列車通信システムが営業線において全線に導入・実用化された例は現時点では存在しない。導入に至っていない背景としては、先に述べたミリ波の特徴と、コストの問題が大きく影響している。しかし、近年、新しいミリ波デバイスの開発が進み、かつ図2に示したようなRoF技術の活用により、長距離の通信エリアを低コストでカバーできるシステムが実現できる可能性が高まっている。

4. 鉄道総研における取り組み

4.1 電波資源拡大に関する施策への対応

現在、列車無線や無線式列車制御システムなど鉄道用に割り当てられている周波数帯は、主に150MHz帯や300MHz～400MHz帯となっており、使用できる周波数幅は、最大でも数MHz程度である。将来、より安全で高度な列車制御、対列車乗務員向けなどの業務用通信、さらに乗客へのサービス提供などに無線を適用する箇所の拡大や、画像などの大容量データの通信に対する要求が高まることが想定される。この際に、高速通信と高信頼性の両立や新たな周波数資源の確保が課題となる。高速・大容量の無線通信を実現するためには、通信事業者

が提供するサービスを利用する選択肢もある。しかし、幹線系や都市圏における列車制御や業務用通信に関しては、常時安定した通信性能を得られることが必須であり、鉄道事業者が専用で使用できる無線通信ネットワークが必要になると考えられる。このためには、現在、鉄道に割り当てられていない周波数帯において、鉄道環境において高速・大容量通信が可能な無線通信技術の開発に取り組むことが必要である。

一方、総務省は、2003年に策定した「電波政策ビジョン」で掲げた戦略的な周波数の移行・再編サイクルに基づく「周波数再編アクションプラン」の中で、周波数利用拡大の研究開発を推進している。この施策の一つとして、ミリ波などの新しい周波数領域の利用拡大に関する公募型の研究開発の実施がある。

そこで、鉄道総研では、この総務省における研究開発活動に参画し、40GHz帯および90GHz帯ミリ波を鉄道に適用するための技術開発に取り組んでいる。

4.2 対列車通信システムへの応用研究

4.2.1 40GHz帯の活用

2010年度～2012年度に、40GHz帯の周波数を鉄道と航空に割り当てるための技術基準案を検討する委員会が総務省によって設置された。この委員会では、鉄道・航空に適用するための前提条件を整理したうえで、必要な周波数帯域幅（≒伝送容量）や送信出力等を検討し、通信距離や電波天文への影響を実験とシミュレーションによって検証した。鉄道総研も委員として参加し、鉄道特有の条件、実験・シミュレーションに関する技術的な提案・支援を行った。その結果、100Mbps以上の伝送を実現できることが実証され、技術基準案がまとめられた。

この委員会の検討結果を受けて、鉄道総研では2012年度～2014年度に実施した研究開発テーマにおいて、鉄道環境（軌道の種類による伝播特性の相違、アンテナ表面への着氷雪の影響など）を考慮した実験を行い、必要な無線機器の性能や、見込むべき損失などのパラメータ値を決定する無線回線設計に必要な要件を整理した。現在、実用化のために必要な鉄道用アンテナの開発と、設計施工標準案の策定に取り組んでいる。

4.2.2 90GHz帯の活用

先に述べた40GHz帯を用いた対列車通信システムでは、1列車あたり数百Mbpsオーダーの伝送容量を目指しているが、今後、トラフィックが更に増大することを考えると、いずれは容量が不足する可能性がある。また、将来、40GHz帯の対列車無線通信システムが、現行の列車無線に代わるシステムとして定着したのち、さらなる安全・安定運行のためにより多くの保安情報を伝送する必要が生じた場合にも、容量が不足する可能性もある。さらに、運転保安用と旅客サービス用とで使用帯域を分

特集：信号通信技術

離することが要求される可能性もある。

そこで、未使用の帯域が多い90GHz帯に着目し、200～300km/hの速度で走行する列車と地上間で1Gbps以上の伝送を実現するための研究に取り組んでいる。これは、総務省の公募型研究開発「ミリ波帯による高速移動用バックホール技術の研究開発」（日立製作所、情報通信研究機構、電子航法研究所、KDDI研究所、鉄道総研）において2014年度～2018年度の5年計画で実施しているもので、図2に示したような、最新のミリ波デバイス技術とRoF技術とを組み合わせた対列車通信システムを構築するための基盤技術の確立を目指している。鉄道総研は、システムの基本構成の検討・提案と、鉄道環境を考慮したシミュレーションや実測による品質評価手法の開発を担当しており、2018年度には1Gbpsの伝送が可能であることを実験によって実証する予定である。

4.3 線路内監視システムへの応用研究

4.1節、4.2節では、ミリ波通信技術の鉄道への応用について述べたが、鉄道総研ではミリ波レーダーを応用した線路内監視システムの開発にも取り組んでいる。この研究開発も、4.2.2節で述べた対列車通信システムの開発と同様に、総務省の公募型研究開発「90GHz帯リニアセルによる高精度イメージング技術の開発」（日立製作所、情報通信研究機構、電子航法研究所、鉄道総研）として2012年度～2015年度の4年計画で実施しているもので、90GHz帯のレーダー技術とRoF技術を組み合わせることによって、線路内の人や落石などを検知し、指令・列車に警報を送るシステムのプロトタイプを開発している⁹⁾。2014年度末には、鉄道総研の所内試験線に90GHz帯のレーダーとRoF回線を仮設して線路内に立ち入った人の検知実験を行い、数cm～十数cmの分

解能で複数の人の動きを分離して検知できることを実証した（図3）。

最終年度である2015年度は、曲線区間を含む所内試験線全線を使用し、障害物の検知と列車への警報伝達の実証実験を行い、鉄道への適用可能性を示す予定である。

5. おわりに

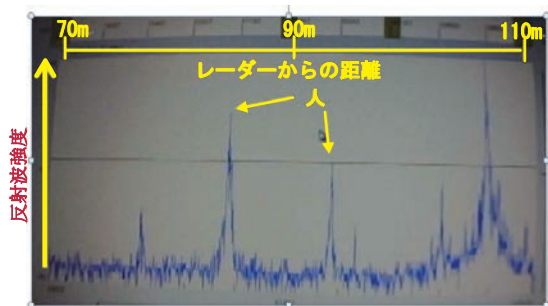
本稿では、大容量の伝送路としての活用が期待されるミリ波についてその概要を紹介し、鉄道における利用状況と開発動向について述べた。今後、高速大容量化だけではなく、高信頼化に向けたデバイス開発・通信技術開発への取り組みがなされることを期待する一方、鉄道においても、最新のデバイスや技術を活用して安全で魅力的な輸送機関を実現するための技術開発に取り組んでいくことが望まれる。鉄道総研では、これらの最新技術を鉄道事業に活用するうえで必要となる適用技術や設計支援技術、また測定評価手法等の開発に取り組んでいく予定である。

謝辞

本稿で述べた鉄道総研の取り組みのうち、90GHz帯を用いた線路内監視システムの開発と、対列車通信システムの開発は、総務省の電波資源拡大のための研究開発において実施しているものである。研究を実施するにあたり、ご協力、ご支援を頂いた関係各位に深く感謝する。

文献

- 1) ITU-R：ITU-R Recommendation P.676-10 “Attenuation by atmospheric gases,” 2013.
- 2) ITU-R：ITU-R Recommendation P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” 2005.
- 3) 手代木扶：新ミリ波技術，オーム社，1999
- 4) 永妻忠夫：120GHz帯を使用した10Gbit/s無線技術，NTT技術ジャーナル，2004年9月号，pp.36-39，2004
- 5) <http://www.nict.go.jp/press/2011/08/20-1.html>（参照日：2015年3月22日）
- 6) <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/index.htm>（参照日：2015年10月1日）
- 7) 山村 博：大容量ミリ波無線システム，鉄道総研報告，Vol.9, No.11, pp.37-42, 1995
- 8) 佐々木 伸：ミリ波による対列車通信，鉄道総研報告，Vol.3, No.5, pp.17-25, 1989
- 9) 中村一城，川崎邦人，竹内恵一，米本成人，河村暁子，ニッ森俊一：90GHz帯ミリ波の伝送特性と線路内監視システムへの適用検討，鉄道総研報告，Vol.28・No.4, pp.29-34, 2014



(a) レーダーによる人の検出波形



(b) レーダーから見た線路内の人の様子

図3 90GHz帯レーダーによる線路内の人の検知実験