

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

中村 一城* 川崎 邦弘* 竹内 恵一*
米本 成人** 河村 暁子** ニッ森 俊一**

A Radio Propagation Characteristics of 90GHz Millimeter-Wave in Railway Environment and Study on Its Application to Railway Line Monitoring System

Kazuki NAKAMURA Kunihiro KAWASAKI Keiichi TAKEUCHI
Naruto YONEMOTO Akiko KOHMURA Shunichi FUTATSUMORI

Attenuation of the 90GHz band millimeter-wave in the atmosphere is small compared with millimeter-waves of the other frequency bands. Moreover, wide range of this frequency band can be utilized. However, there have been no cases where it is used in the railway environment until now. In order to utilize the 90GHz millimeter-wave in railway environment, we carried out field tests and simulations regarding distance attenuation characteristics and rain attenuation characteristics on a railway line. Further we performed basic tests of an algorithm for detecting obstacles on a railway line using 90GHz band millimeter-wave radar.

キーワード：ミリ波，レーダー，イメージング，電波伝搬，降雨減衰

1. はじめに

1.1 鉄道におけるミリ波技術の活用

ミリ波は、直線性が強く広い帯域が利用できる特徴を有している。そのため、鉄道環境へのミリ波の導入を目指した各種取り組みが古くから行われている。海外では、1980年代前半に35GHz帯や58GHz帯を用いた鉄道沿線における電波伝搬特性等の研究が行われていた^{1) 2)}。国内においても1990年前後から、50GHz帯を用いた明かり区間やトンネル区間等の電波伝搬特性をはじめとした各種研究が行われてきた^{3) 4) 5)}。さらに、近年では40GHz帯の鉄道への活用を目指した研究も行われている⁶⁾。

実際の鉄道環境への導入事例としては、停車中に高速大容量通信を行う車上-地上間のデータ伝送システムや、踏切における障害物検知装置等がある^{7) ~ 10)}。

それらは主に40GHz帯や免許不要で利用できる60GHz帯により実現されている。

1.2 90GHz帯ミリ波の特徴

90GHz帯のミリ波は、他のミリ波帯の電波に比べて大気中の減衰が小さく¹¹⁾、優れた伝搬特性と広い帯域利用特性を備えている。さらに、波長が3mmと短いこと

から、レーダー等に活用した場合に高い位置検出精度でのセンシングが可能となる利点を有している。

1.3 鉄道における90GHz帯ミリ波の活用の検討

鉄道分野においては、これまでに90GHz帯のミリ波の活用に向けた取り組みが行われたことはなく、未知の周波数帯域である。

そこで、筆者らは、鉄道において90GHz帯ミリ波の位置検出精度の高さや伝搬特性の良さを生かせる場面の1つとして、これまで機械式のものと60GHz帯のミリ波で実現している線路内の障害物を検出するためのシステムへの活用を目指し、これまで検討を進めてきた¹²⁾。

本報告では、これまで筆者らが検討を進めてきた鉄道環境における90GHz帯ミリ波の電波の距離減衰特性や降雨減衰特性の測定結果と鉄道線路監視システムの構築に向けた基礎検討結果に加え、障害物検知アルゴリズムの検討結果を報告する。

2. 鉄道環境における90GHz帯の電波伝搬特性

2.1 線路上の電波伝搬特性

2.1.1 電波伝搬特性試験の概要

鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）が所有する構内実験線を使用し、距離減衰特性の測定試験を実施した。図1に示すように、送信側は、構内実験線の沿線に電子航法

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 独立行政法人電子航法研究所（監視通信領域）

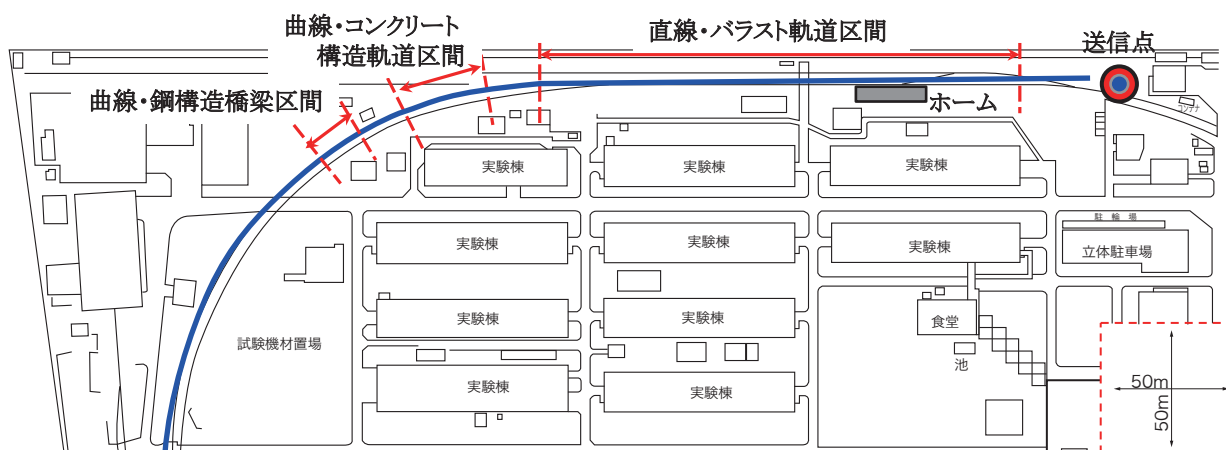


図1 実験箇所平面図

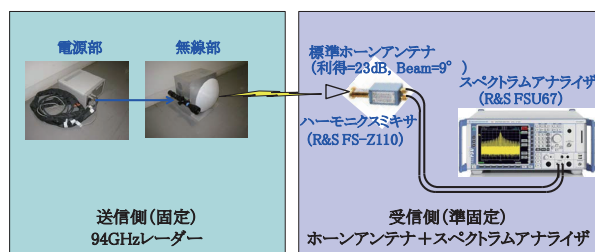


図2 距離減衰特性の測定実験構成

研究所が開発した 94GHz 帯の狭帯域レーダーを設置した。受信側は、軌道用トロッキオ上にスペクトラムアナライザとホーンアンテナを搭載し、送信側の位置とトロッキオの位置を離散的に変えながら、スペクトラムアナライザで受信レベルを測定した(図2)。測定パラメータは、送受信点間距離: 10m ~ 250m, 送受信アンテナ高: それぞれ 1m, とした。

2.1.2 シミュレーション

実験における測定条件 (アンテナの設置位置と高さ) の組合せの検討・設定, ならびに今後の無線回線設計等に活用することを目的として, 構内実験線における 90GHz 帯ミリ波の電波伝搬環境をシミュレーションでできるように, 鉄道総研構内実験線を対象にしたレイトリングモデルを作成した。モデル化区間には, 鉄道の特徴的な伝搬環境であるホーム付近, 直線区間, 曲線区間が含まれている。モデル化の対象は, 沿線の建物, レール, 架線 (トロッコ線), 架線支持物 (架線柱+支持金物) とした。モデル化対象の材質と形状の近似方法を表1に示す。また, レール, 架線柱, 支持金物, 架線のモデル図を図3に示す。沿線の建物とレールは鉄道総研構内平面図を基準に配置した。曲線区間は1区間 8.2 ~ 10.0m のセグメントに分割して直線近似した。架線柱と支持金物はレールからの距離を基準に配置した。架線は架線柱の位置において軌道中心となるように位置を合わせ, 径間を直線で近似した。レール面からは 5.1m, 支持金物からは 0.35m (振金具相当) の位置に配置した。以上の方法で近似した建物モデルの全体図を図4に, 今回使用

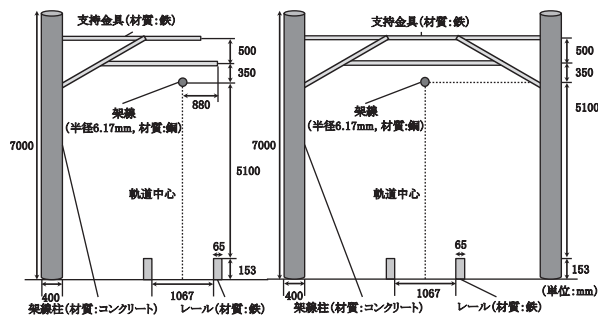


図3 レール, 架線柱, 支持金物, 架線のモデル

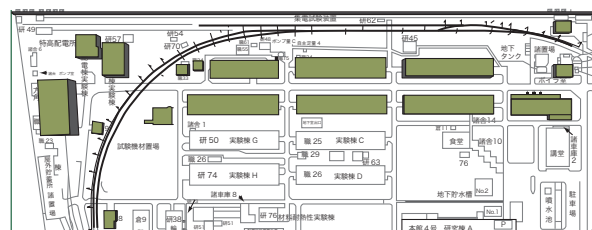


図4 建物モデルの配置状況

表1 モデル化対象の材質と形状

対象物	材質	形状
沿線の建物	コンクリート	直方体で近似
レール	鉄	50kgN レールを参考に断面を幅 65mm, 高さ 153mm の長方形で近似
架線柱	コンクリート	直径 400mm, 高さ 7m の円柱で近似
支持金物	鉄	断面を直径 100mm の円で近似、長さは架線柱とレールの間の距離に応じて調整
架線	Cu110	Cu110 (半径 6.17mm, 断面積 110mm ²) を参考に断面を半径 6.17mm の円で近似

した電波伝搬シミュレータ上に再現された実験線の様子を図5に示す。

2.1.3 試験およびシミュレーション結果の検証

構内実験線において 90GHz 帯ミリ波の距離減衰特性を測定した結果を図6に示す。なお, 測定結果は, 最短距離 (10m) を 0dB とし、相対的な減衰量 (伝搬損失) で示した。この結果より, 概ね距離の 2 乗に反比例し

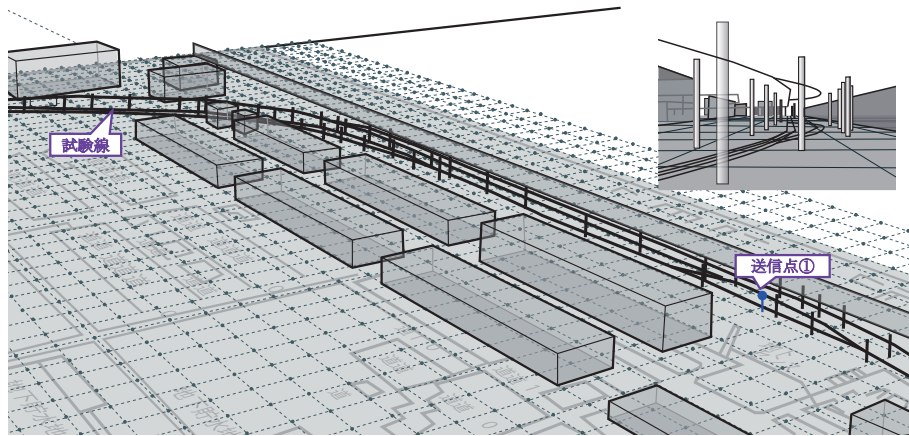


図5 シミュレータ上に再現された構内実験線

て電波強度が減衰することが分かった。このことから、90GHz帯のミリ波は直進性が高く、その減衰量は、ほぼ自由空間減衰とみなすことができるといえる。

また、前節で行ったレイトレーシングモデルによる計算結果も合わせて図中に示した。この結果より、減衰量の中央値の増加傾向が概ね合致しており、作成した計算モデルが妥当であることも合わせて確認することができた。

2.2 降雨による電波伝搬特性への影響

2.2.1 降雨減衰特性測定試験の概要

ミリ波帯の電波は、降雨による減衰が大きいといわれていることから、システムの設計を行う上では、降雨による減衰を考慮する必要がある。そこで90GHz帯ミリ波の降雨による減衰量を把握するため、鉄道総研が所有する大型降雨実験装置を使用し、降雨量を変化させて減衰量を測定した(図7)。降水量は0mm/h～100mm/hまで10mm/hごとに変化させたのち、参考のため150mm/hと200mm/hも測定した(200mm/hは過去に国内で観測された最大雨量)。その際の、送受信点間の

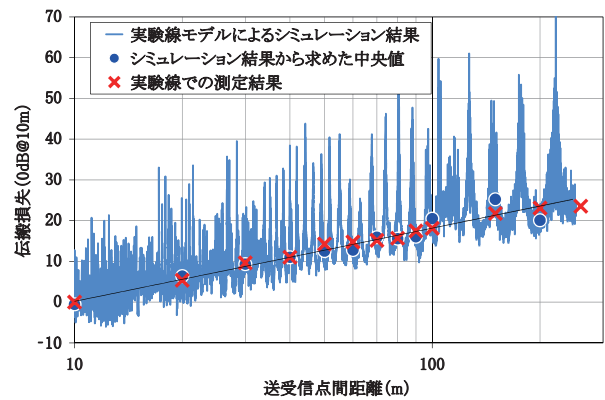


図6 距離減衰特性の測定結果とシミュレーション結果の比較(送信高:1m・受信高:1m)

直線距離は13mであった。なお、使用した測定系は図2と同じである。

2.2.2 試験結果

大型降雨実験装置において降雨減衰量を測定した結果を図8に示す。この結果から、減衰量は降雨量に比例し、降雨減衰量(dB/km) $\div 1.3 \times$ 降雨量(mm/h)で近似できることが分かった。なお、この結果は、これまでに

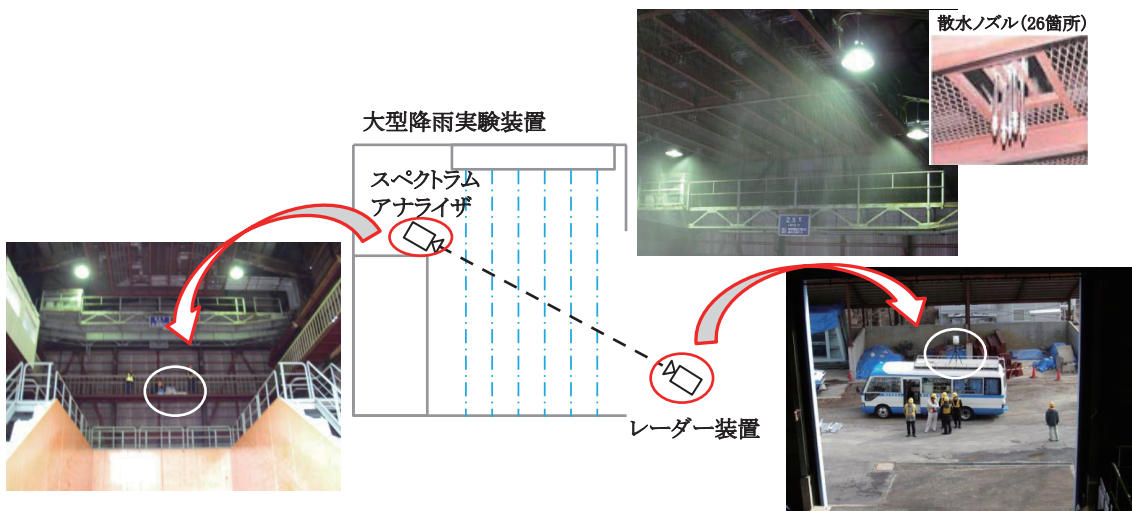


図7 大型降雨実験装置における降雨減衰量の測定実験時の機器配置

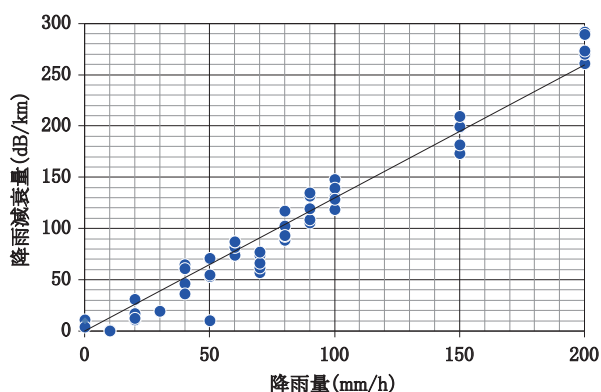


図8 降雨減衰量の測定結果

示されていた降雨減衰特性に比べ、減衰量が大きくなっていった¹³⁾。その原因としては、大型降雨実験装置内において雨滴が霧状に広がっていたことにより、電波を遮る作用が働くなど、通常の降雨状態とは異なっていたためと推測される。

3. 鉄道線路監視システムの構成に向けた基礎検討

ミリ波レーダーを活用して、線路内の障害物を検出する、鉄道線路監視システムの構築に向け、システムに要求される条件ならびに実用的なシステムを設計・構築するにあたって考慮すべき条件の検討、整理を行った。

主たる要件としては、検出すべき対象、許容できる検出時間、イメージングするエリアのサイズの3項目を挙げ、現在鉄道で導入されている落石検知装置や障害物検知装置等の仕様を参考に検討を行った。

3.1 検出対象

検出すべき対象物としては、落石、コンクリート片、人体が候補として挙げられる。レール踏面上に60mm以上の高さの異物が存在すると脱線する危険性があるとされていることから、落石やコンクリート片については、60mm以上のサイズの対象を検出できることが一つの基

準となる。なお、鉄道線路内は、レールや架空線、支持構造物など、高反射率の物体が多数存在している環境となる。このような環境では、乱反射による検出精度の低下につながる恐れがあるものの、これらの物体が存在する位置は固定されており、既知であるため、検出アルゴリズムにおいてマスキング処理を行うことにより影響を除外できる可能性がある。このような特定の物体を検出対象から除外できることも鉄道向けのシステムに対する要件の一つである。

3.2 許容検出時間

許容できる検出時間は、レーダーノードが検出すべき最短距離に関わり、レーダーノードの配置とも大きく関わる。ここでは、図9に示すようなシステムモデルを基に、列車を安全に停車させるために必要な距離から逆算することによって許容できる検出時間を検討した。障害事象が現場で発生し、その状況をレーダーノードがスキャンして信号を取得してから列車が停止するまでの時間を $t_{all}(s)$ とし、異常を検出するまでの時間を $t_1(s)$ 、異常を検出してから列車に警報を伝達するまでの時間を $t_2(s)$ 、列車が警報を受信してからブレーキがかかるまでの時間(運転士の操作+空走時間)を $t_3(s)$ とすると、 t_{all} は、 $t_1+t_2+t_3$ で表される。ここで、列車の走行速度が $V(km/h)$ とすると、 $t_{all}(s)$ の間に列車は $d_t=V \times t_{all}/3.6(m)$ だけ進む。鉄道信号の分野では、非常ブレーキをかけてから停車までの最短距離 d_b を、在来線では600m、新幹線では4,000mとして信号の位置を決定していることから、この非常停止距離を基準にすると、障害が発生した地点の $d_t+d_b(m)$ より手前で検出する必要があり、この距離が所要検出距離 d_d となる。 $t_2=1(s)$ 、 $t_3=1(s)$ と仮定し、 V をパラメータとして検出時間 t_1 と所要検出距離 d_d の関係を計算した結果を図10および図11に示す。

計算結果から明らかなように、検出時間が長くなるに従って所要検出距離が伸びていることがわかる。在来線では、全ての速度域において、検出時間を15秒以内に

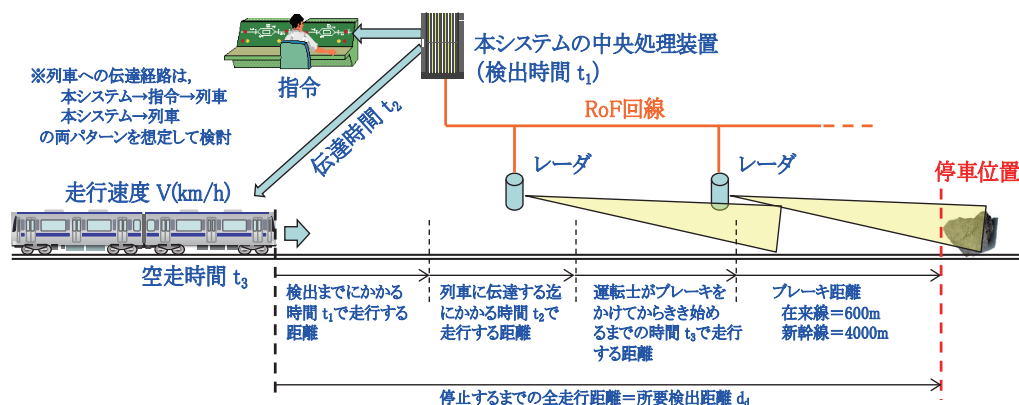


図9 許容検出時間の検討モデル

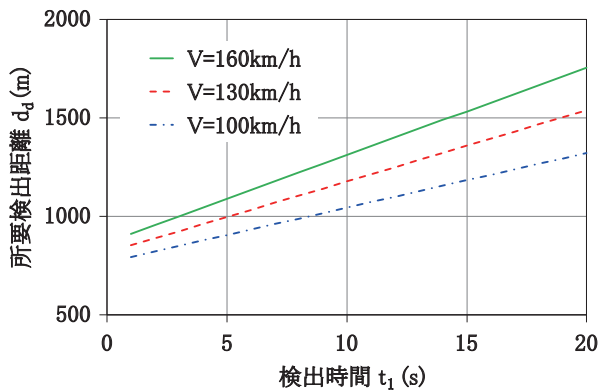


図 10 検出時間と所要検出距離との関係の計算例 (在来線)

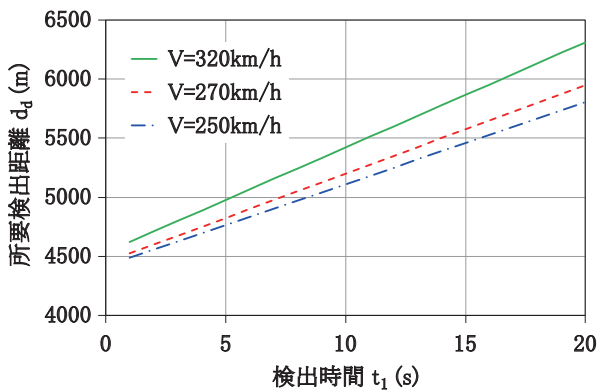


図 11 検出時間と所要検出距離との関係の計算例 (新幹線)

することによって、レーダーノード1台分のカバーエリアで検出が可能と考えられる。これに対し、新幹線では、検出時間を1秒としても、4.5km以上前方の異常を検出しなければならないため、列車の位置から4台～5台先のノードで検出する必要がある。従って、列車位置に応じて検出すべきレーダーノードを切り替える仕組みが必要であるといえる。さらに、走行速度が速いことから、検出時間は10秒以下を目指すことが望ましいと考えられる。

なお、現在の鉄道システムでは、全線にわたって障害の発生を直接列車に伝達するシステムは存在しないため、ここで検討しているシステムが実用化されることにより、現在よりも迅速な停止処置が可能となることが期待される。

3.3 イメージングエリアの範囲および検出アルゴリズムの検討

3.3.1 イメージングエリアの範囲

レーダーノードでスキャンするイメージングエリアについては、鉄道の構造上の特徴を踏まえ、図12に示すように断面方向を1台で、進行方向は複数台でカバーする必要がある。

1台のレーダーノードでカバーすべき距離については、おおよそ1～1.5km程度が想定されるが、電波伝搬特性の測定結果等を参考に、引き続き具体的な回線設計を行っていく予定である。

3.3.2 障害物検出アルゴリズムの検討

線路沿線に線状に配置したレーダーノードによって得られたスキャンデータから、線路内の障害物を検出するアルゴリズムを検討した。その結果、検出に当たっては、レーダーノードでスキャンしたエリアを、ある大きさのブロックごとに区切り、ブロック単位で変化を検出する方法を採用することとした。ブロックの大きさ(線路方向×直角方向)については、均一ではなく、レーダーノードや線路構造物との位置関係、スキャンの速度等に応じてブロックサイズを設定することが望ましい。さらに、障害物と既存の構造物(レール、電化柱、沿線機器等)とを判別する方法については、直前のスキャン結果と比較して状態の変化があることを検出したのち、一定時間以上当該の状態が継続したブロックについて、“障害物あり”と判定する方法が考えられる(図13)。

なお、“障害物あり”と判定するための状態変化後の継続時間や、その閾値については、引き続き検討を進めていく予定である。

3.4 設計・構築するにあたって考慮すべき条件

前述した条件以外にも、イメージングエリアやノード配置を設計する際に考慮すべき条件を表2の通り整理した。これらは、導入線区の特徴に応じて、考慮または基準の制定が必要である。

表2 設計・構築にあたって考慮すべき条件

線路条件	<ul style="list-style-type: none"> ・最小曲線半径 ・最小縦曲線半径 ・勾配 ・最大カント量
線路の構造	<ul style="list-style-type: none"> ・トンネル区間/明かり区間 ・高架/盛土/切り通し ・コンクリートスラブ軌道/バラスト軌道 ・橋梁
設置環境	<ul style="list-style-type: none"> ・温度 ・湿度 ・振動 ・電磁環境

4. まとめ

本報告では、90GHz帯ミリ波を活用して鉄道線路内の障害物を検出するシステムの構築を目指し、鉄道環境における距離減衰特性と、大型降雨実験装置を用いた降雨減衰特性の測定試験を実施した。

その結果、電波強度は、概ね距離の2乗に反比例して

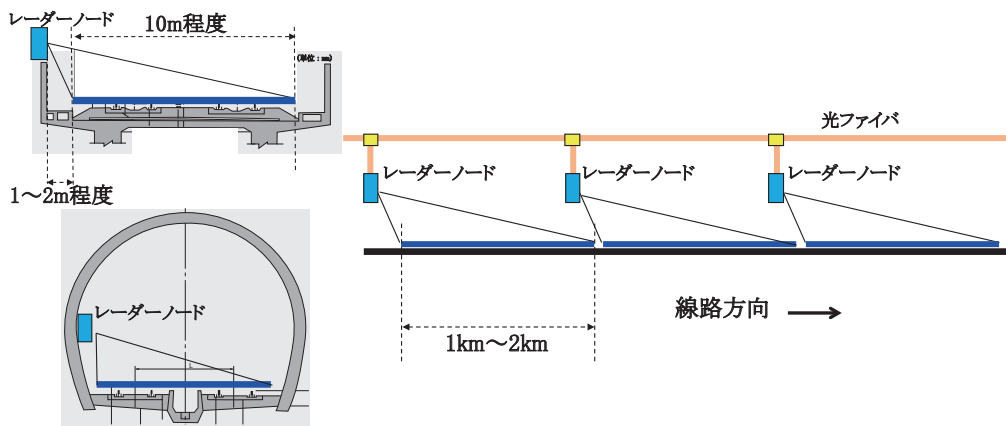


図12 イメージングエリアの構成案

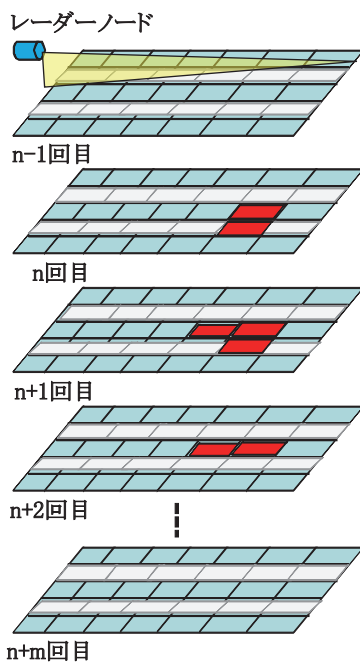


図13 障害物検出イメージ

減衰すること、降雨減衰量 (dB/km) は、 $1.3 \times \text{降雨量 (mm/h)}$ で近似できることを示した。

さらに、鉄道線路内における障害物検出システムに要求される、検出対象や許容検出時間、イメージングエリアの範囲、システム的设计・構築にあたって考慮すべき条件等を検討、整理するとともに、障害物を検出するためのアルゴリズムの検討を行った。

今後は、より具体的な線路監視システムの提案に向けて、鉄道総研構内にプロトタイプシステムを構築し、原理検証と課題の抽出を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、総務省における電波資源拡大のための研究開発として実施したものである。研究を実施するに当たり、ご協力、ご支援をいただいた関係各位に深く感謝する。

文献

- 1) H.Meinel, A.Plattner and G.Reinhold, "A 40GHz Railway Communication System," IEEE J.SAC, Vol.SAC-1, No.4, pp.615-622, 1983.
- 2) H.Meinel and A.Plattner, "Millimetre-wave propagation along railway lines," IEE Proc., Vol.130, Part F, No.7, pp.688-694, 1983.
- 3) 佐々木伸, 山村博, 川村武彦: ミリ波による対列車通信, 鉄道総研報告, Vol.3, No.5, pp17-25, 1989
- 4) 山村博, 林秀一, 鈴木尚子, 佐々木達也: 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
- 5) H.Yamamura, S.Sasaki, "Millimeter wave Propagation Model and Delay Spread along the Maglev Guideway," IEICE Trans., Commun., Vol.E78-B, No.8, pp.1204-1207, 1995.
- 6) 塚本薫, 加藤泰典, 梅田周作, 河原伸幸, 長山博幸, 川崎邦弘, 中村一城, 辻宏之, 岡崎彰浩, 石津文雄: 40GHz帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験, 信学技報, Vol.113, No.246, RCS2013-149, pp.43-48, 2013
- 7) 菅谷誠, 星大, 沖雅雄, 山本律, 岸田宗也: ミリ波無線による地上-車上間データ伝送システムの開発, 第43回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号214, 2006
- 8) 氏家健, 渡辺剛志, 菌田昇, 浅野晃, 見目光正, 牧野純男: ミリ波を使用した次世代型踏切障害物検知装置の開発, 電学論D, Vol.127, No.8, pp.906-911, 2007
- 9) 川崎邦弘: ミリ波通信技術に関する動向, 鉄道と電気技術, Vol.23, No.10, pp.3-9, 2012
- 10) 立石幸也, 服部鉄範, 川崎邦弘: 鉄道におけるミリ波通信, 信学技報, Vol.113, No.333, MWP2013-48, pp.7-21, 2013
- 11) ITU-R, "Atrenuation by atmospheric gases", Recommendation ITU-R P.676-9, 2012.
- 12) 中村一城, 川崎邦弘, 竹内恵一, 米本成人, 河村暁子, ニッ森俊一: 鉄道環境における90GHz帯ミリ波の電波伝搬特性, 信学技報, Vol.113, No.333, MWP2013-53, pp.33-38, 2013
- 13) 手代木扶, 米山務: 新ミリ波技術, オーム社, pp.137-140, 1999