

90GHz 帯ミリ波レーダーによる線路内の作業員の位置検知

竹内 恵一* 中村 一城* 岩澤 永照*
 岩城 詞也** 小澤 圭広*** 河村 裕介*

Detection of the Position of Workers in Railway Tracks by Means of 90GHz Band Millimeter-Wave Radar

Keiichi TAKEUCHI Kazuki NAKAMURA Nagateru IWASAWA
 Nariya IWAKI Yoshihiro OZAWA Yusuke KAWAMURA

In recent years, the introduction of automatic train operation has been studied, and it is expected that the method of automatically detecting humans and obstacles in the railway tracks will be more important than ever. Therefore, the authors have been working on the development of a monitoring system for detecting humans and obstacles in the railway tracks with high accuracy by monitoring a wide area using 90 GHz band millimeter-wave radar and Radio on Fiber (RoF) technology. In this paper, we describe the results of tests conducted to confirm the specific performance of the position detection of humans in railway tracks using 90 GHz band millimeter-wave radar, and show that the monitoring system can detect humans and their location. Furthermore, we describe the future efforts at the realization of the monitoring system in railway tracks by means of 90 GHz band millimeter-wave radar.

キーワード：90GHz 帯，ミリ波，レーダー，支障物検知，電波伝搬，鉄道線路

1. はじめに

列車の安全な運行は、列車の進路を確保して他の列車との衝突や脱線などを防ぐ信号システムをはじめとする、ホームや線路内の安全を確保するための様々な機能や仕組みによって実現されている。現在の列車運行では、線路内の人や支障物の監視は主に運転士の目視により行っており、運転士が線路内に人や支障物を発見した場合には、列車の停止や減速の操作を行い、線路内の安全を確保している。近年、運転士による前方監視の支援や負担軽減を目的として、カメラ、レーザー、赤外線、ワイヤにかかる張力、マットの荷重などで人や支障物を検知する手法が導入されている¹⁾。しかし、いずれの手法においても、検知対象や検知するエリアが限定されており、単独では線路内の人や支障物を全て検知することは難しい。一方、鉄道における自動運転の実現に向けた検討が進められており²⁾、目視による前方監視の代わりに、線路内の人や支障物を自動的に検知する手法の確立が求められている。

監視エリア内において目標物を検知する技術の1つとして、レーダーが様々な分野で使用されている。レーダーは、レーダー装置から送信した電波が物体で反射して

戻ってくる時間と強度により、目標物の存在やその距離を検出している。現在鉄道総研では、他の用途にあまり使用されておらず広い周波数帯域が利用可能な90GHz帯ミリ波³⁾を用いたレーダーと、光ファイバ無線技術を用いた手法により線路内の人や支障物を検知し、その位置を高い精度で検知する線路内監視システムの開発に取り組んでいる。これまで、約200m先の線路内に進入する人やレール上に置かれた非金属製のコンクリート片が検知可能であることを確認してきた^{1) 4)}。

さらに、ミリ波帯レーダーの高精度な位置検知性能を利用することで、線路内の作業員の位置の検知が可能になると予想され、特定の線路内の作業員にのみ、必要な情報を伝達するシステムなどへの活用も期待される。

本稿では、多数の作業員が線路内で作業を行う場合を想定し、90GHz帯ミリ波レーダーにより作業員の位置を検知するシステムの実現性を確認するため、複数の線路が存在する環境におけるフィールド試験の概要とその結果について述べ、今後の取組みを紹介する。

2. 90GHz 帯ミリ波レーダー

2.1 90GHz 帯ミリ波

周波数が30GHzから300GHzの電波は、波長が1mm～10mmとなることから、ミリ波と呼ばれている。ミリ波は、直進性が強いという電波伝搬特性を有しており、線路に沿う形で長距離に電波を伝搬させる必要があるシステムでの利用に適した特徴を有していると言える。ミ

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室
 ** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室
 (現 ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社)
 *** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室
 (現 東京地下鉄株式会社)

特集：信号通信技術

ミリ波の中でも特に90GHz帯は、他の周波数帯域のミリ波に比べて、大気中の減衰が小さいことから⁵⁾、同じ出力でより広いサービスエリアをカバーすることができると考えられる。また、90GHz帯は、現在一部の周波数範囲が電波天文に利用されているが、他の用途では利用されていないことから、鉄道のように地面と並行に電波を送信する用途では、当該周波数帯を利用する他の無線システムとの干渉の懸念が少なく、広い周波数帯域を利用するシステム構築が期待できる。一方で、90GHz帯を利用する際には、降雨や降雪の環境下での影響を考慮する必要があることから、鉄道総研ではこれまで、90GHz帯ミリ波の降雨による減衰特性やアンテナ表面への着雪時の減衰特性を把握するための検証試験を実施し、降雨による減衰量が概ね降雨量に比例すること⁶⁾、着雪時には20～25dB程度の減衰を見込む必要があることなどを確認してきた⁷⁾。

2.2 90GHz帯ミリ波を用いたレーダー

ミリ波帯を用いたレーダーとしては、60GHz帯や76GHz帯、79GHz帯が自動車の衝突防止を支援するために前方の支障物を検知する手段として使用されている³⁾。

レーダーの方式のひとつであるFM変調を施した電波を連続的に送信することで目標物を検知するFM-CW(Continuous Wave)方式においては、レーダー装置の周波数帯域幅を Δf [Hz]、光の速度を c [m/s]とすると、距離分解能 X [m]は、式(1)で表すことができる。

$$X = \frac{c}{2 \cdot \Delta f} \quad (1)$$

この方式では、式(1)に示す通り、利用できる周波数帯域幅が広いほど、高い距離分解能で物体を検知することが可能である。例えば周波数帯域幅が1GHzの場合の距離分解能は約15cm、周波数帯域幅8GHzの場合の距離分解能は約2cmとなる。前節で示したように、90GHz帯のミリ波は広い周波数帯域が使用できる可能性があることから、当該周波数帯をFM-CW方式のレーダーに利用することにより、高精度な目標物の検知が可能となる⁸⁾。

3. ミリ波レーダーによる目標物の検知方法

本研究では、線路内作業時を想定した作業員の位置検知に関する検討を実施した。線路内作業時の作業員の位置検知を考慮した場合のレーダー装置の設置概要を図1に示す。

3.1 電波の照射方法

レーダーを用いて監視エリア内の人や支障物を検知するための電波の照射方法としては、2つの方法が考えら

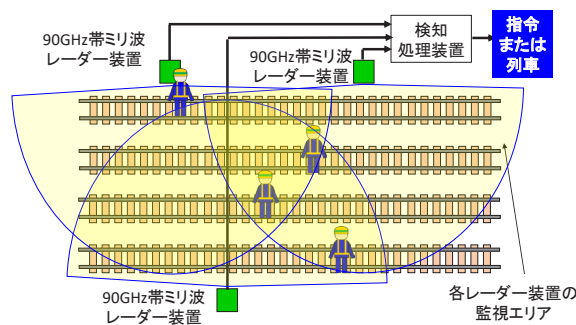


図1 作業時を想定したレーダー装置の配置

れる。1つはレーダー装置のアンテナを固定して一定方向のみを監視する方法であり、もう1つはアンテナを水平方向に回転させ、面として監視する方法である。例えば、鉄道敷地境界などを人が通過したことを検知したい場合には、前者の方法で対応可能である。しかし、この方法では、監視しているエリアを通った人がその後敷地内にいるのかどうかを把握することができない。人が線路内にいるのか、さらには、線路内にいる場合にどの位置にいるのかを検知する必要がある場合には、後者の方法を用いる必要がある。

本検討では、複数の線路が存在する箇所において作業員の作業中の姿勢にかかわらず検知し、作業員が存在する線路を特定することを目的としている。このため、アンテナを水平方向に回転させ、面的に広い範囲を監視する場合を想定して検討を行うこととした。本検討で用いた検知手法の概要を図2に示す。

また、アンテナ高は、高くしすぎると照射した電波が人に当たらず、低くしすぎると照射した電波がレールや地面に設置された既存設備などに遮られてしまう。そこで、アンテナ高は人の身長を考慮して設定することとした。

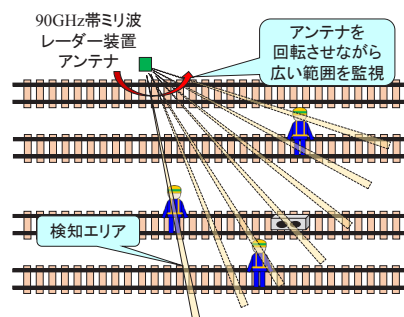


図2 レーダー装置による検知方法

3.2 既設の設備と検知すべき目標物の分離

鉄道線路内は、検知すべき目標物以外にも既設の設備が多数存在する。レーダー装置を用いて線路内の監視を行う場合、既設の設備も対象物体として検知されてしまい、本来検知すべき人や支障物を特定することができない。本検討で用いているレーダーは、3.1節で述べた

ようにアンテナを水平方向に回転させて検知する手法を取っていることから、周期的に同じ場所における物体の検知を行っている。ここで、ある1点に着目した場合、1つ前の周期での検知結果と最新の検知結果を比較することにより、前の周期では検出されなかった物体が検出された場合に、その地点に既設の設備とは異なる検知すべき目標物が出現したと判定することとした。また、作業員は1点にとどまらず、線路内を移動することを考慮する必要がある。そこで、歩行する場合（1～2m/s程度）にも検知し、移動していく様子を追跡できることを目標とした。

4. レーダーによる位置の検知性能の確認

作業時を想定して、複数の線路が存在する箇所において、90GHz帯ミリ波レーダー装置を用いた作業員の位置検知性能を検証するための試験を実施した⁹⁾。

4.1 検知試験の実施環境

検知試験は、複数の線路や電化柱などの設備が存在する鉄道線路内で実施した。検知試験実施箇所の様子を図3に示す。



図3 検知試験実施箇所

4.2 90GHz帯ミリ波レーダー装置の構成

本試験は、FM-CW方式の90GHz帯ミリ波レーダー装置¹⁰⁾を用いて実施した。90GHz帯ミリ波レーダー装置の構成を図4に、レーダー装置の仕様を表1にそれぞれ示す。

本試験で用いたレーダー装置は、焦点から上向きに出た電波を集めた後、90度真横に電波を送信するオフセットパラボラアンテナを採用しており、アンテナを回転することで水平方向にビームが回転する。表1より、アンテナの半値角が1度であり、レーダー装置からの距離と監視エリアの幅の概要とそれらの関係は、図5および図6に示す通りとなる。さらに、周波数帯域幅が1GHzであることから、2.2節に示した式(1)より、ノイズによ

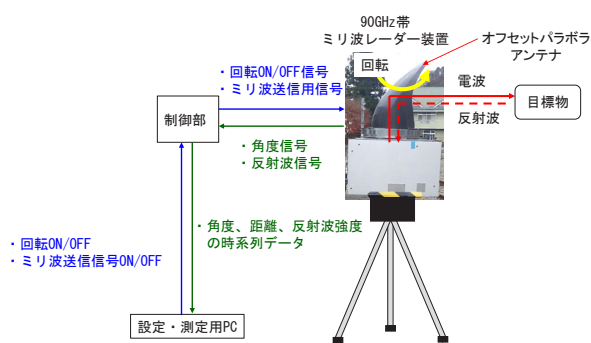


図4 90GHz帯ミリ波レーダー装置の構成

表1 90GHz帯ミリ波レーダーの仕様

送信電力	50mW (+17dBm)
中心周波数	96GHz
周波数帯域幅	1GHz
アンテナ利得	41dBi
アンテナ半値幅	1deg.
アンテナ回転周期	4sec.

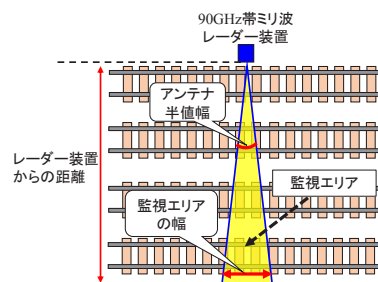


図5 レーダー装置からの距離と監視エリアの幅

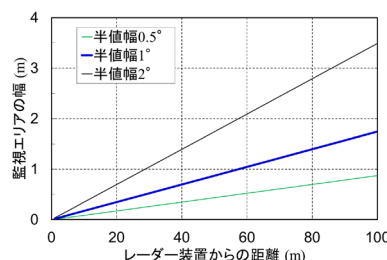


図6 レーダー装置からの距離と監視エリアの幅の関係

る影響等を考慮しない理論上の距離分解能は約15cmとなる。なお、本試験で使用したレーダー装置は照査結果のFFT処理なども考慮し、約40cmの距離分解能で検知結果を出力する仕様である。

4.3 試験の条件

検知試験は、鉄道線路内に人が存在する場面の例として、線路内での作業実施時を想定し、以下の2つの条件で実施した。

4.3.1 角度方向の分解能検証(条件1)

線路内での作業時は、複数の作業員が接近した状態で

特集：信号通信技術

作業を行うことが想定される。近接した複数の作業員を分離して検知し、位置を検知するためには、レーダー装置の角度方向の検知性能が影響する。そこで、理論上は分離して検知可能な間隔で同一線路内に複数の人が存在する場合に、実際に各人を分離して検知可能かどうかを検証するための試験を実施した。

具体的には、90GHz帯ミリ波レーダー装置からの距離が約8mの線路内に約20cmの間隔を空けて5人が並んでいる状態で実施した。また、アンテナ高は水平に送信された電波が人の肩付近に当たることを想定して、レールレベルから1.5mとした。試験時の配置を図7に、試験の実施状況を図8に示す。

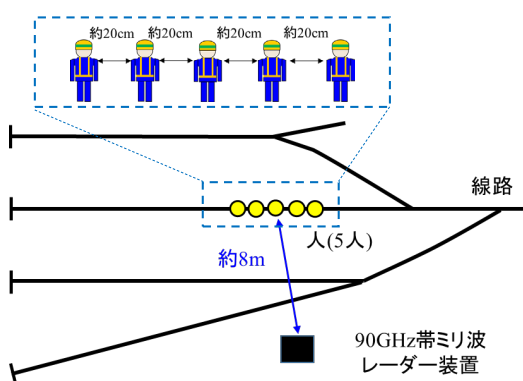


図7 検知試験時の配置 (条件1)

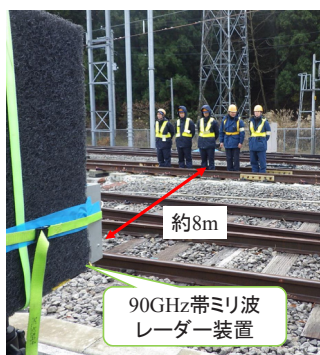


図8 検知試験実施状況 (条件1)

4.3.2 距離方向の分解能検証 (条件2)

複数の線路が近接・並行している箇所での作業時は、複数の線路に人が分散して作業を行うことが想定される。複数の線路に分散した作業員の位置を詳細に検知するためには、角度方向の検知性能とともに距離方向の検知性能が影響する。そこで、複数の線路内に複数の作業員が存在して作業を行う場面を想定し、作業員の検知性能を検証するための試験を実施した。

具体的には、線路が4線並んでいる箇所において、一定の角度の線上に、レーダー装置から軌道中心までの距離が2.3mの線路内に人A、4.4mの線路内に人B、9.2mの線路内に人C、14.5mの線路内に人Dを配置して実

施した。また、アンテナ高は条件1で1.5mとしたが、さらに低く設定した場合の検知性能も合わせて確認するため、レールレベルから1.25mとして実施した。試験時の配置を図9に、試験の実施状況を図10に示す。

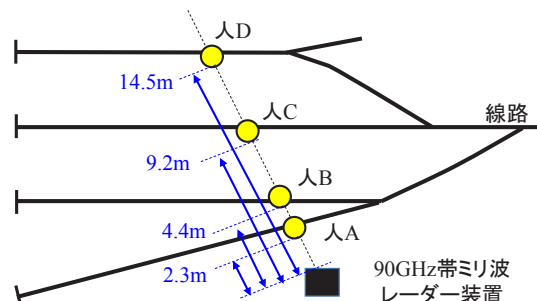


図9 検知試験時の配置 (条件2)

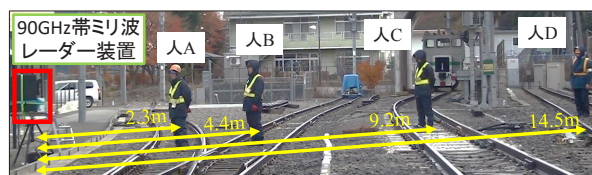


図10 検知試験実施状況 (条件2)

4.4 検知試験の結果と考察

3.2節で述べたように、人が存在する場合と人が存在しない場合の検知結果の比較により、90GHz帯ミリ波レーダーによる人の検知の可否を判定した。

4.4.1 角度方向の分解能検証試験結果 (条件1)

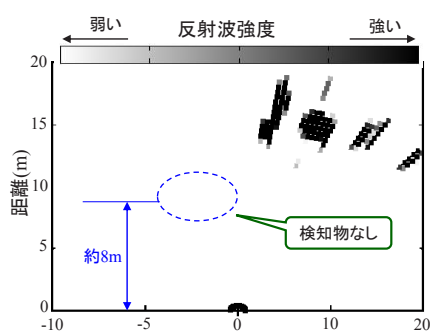
線路内に約20cmの間隔を空けて5人が並んでいる状況での検知結果を図11に示す。図11より、レーダー装置から約8mの位置に5つの物体が存在することを示していることから、線路内に並んでいる5人を分離して検知でき、さらにその位置も検知できることを確認した。

レーダー装置を用いた監視エリアの幅は、アンテナの半値幅とレーダー装置からの距離によって決定する。本報告における検知試験で使用したレーダー装置のアンテナ半値幅は1度であり、図6より、レーダー装置からの距離8mの地点でのレーダー装置の理論上の監視エリアの幅は14cm程度となる。

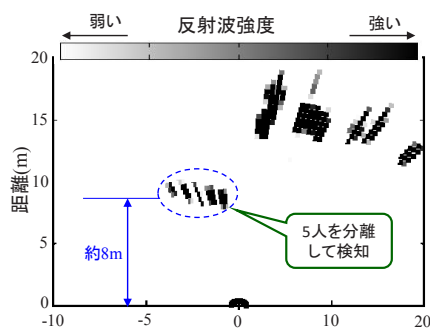
条件1の試験は、約8mの位置に20cm程度の間隔を空けて5人が並んでいる状況で実施したことから、アンテナの回転により監視エリアの幅(約14cm)の分解能で目標物の検知を行った。そのため、人と人の間隔(20cm)を空間(検知物が何もない箇所)として認識し、装置の仕様に基づく理論通りに5人を分離して検知できたと考えられる。

4.4.2 距離方向の分解能検証試験結果 (条件2)

レーダー装置から軌道中心までの距離が異なる4つの線路内にそれぞれ1人ずつ人が存在する状況において試

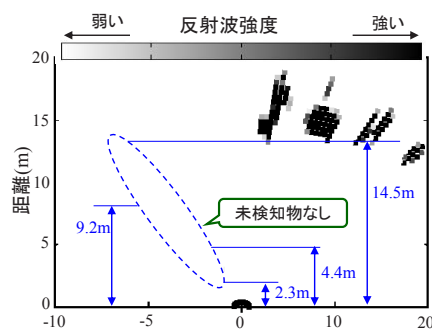


(a) 人なし

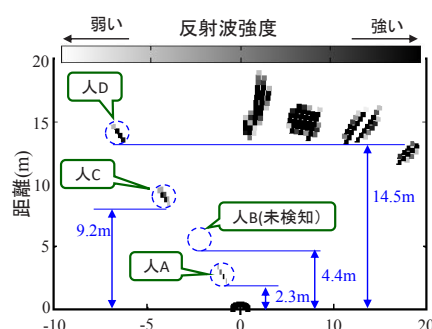


(b) 人が存在

図 11 検知試験の結果 (条件 1)



(a) 人なし



(b) 人が存在

図 12 検知試験の結果 (条件 2)

験を実施した結果、全ての人を分離して位置を検知可能であった。一方で、4人がレーダー装置から一定の角度の直線上に並んだ状態においては、図12に示すように、人A、人C、人Dの3人は検知できたが、人Bは検知できないという結果であった。これは、人Bが人Aの陰となることで、レーダー装置から照射された電波が遮られたためであり、レーダーの原理上避けることができない。これを回避するためには、図1で示したように複数台のレーダー装置で検知エリアをカバーする必要がある。なお、人Bと同様に人Aの延長線上に並んでいた人C、人Dに関しては、実際にはレーダー装置からみた角度が人Aに比べて2～3度ずれた位置で検知された。図6より角度1度の監視幅は9.2m地点で約16cm、14.5m地点で約25cmとなることから、レーダー装置と人Aを結ぶ直線の延長線から、人Cは40cm程度、人Dは60cm程度ずれた位置に立っていたため、検知可能であったと推測される。

図12の測定結果において、人Aはレーダー装置から直線距離で2.4m地点、人Cは9.3m地点、人Dは14.9m地点で人を検知している。図9の試験条件と比較すると、人Dでは約50cm程度の距離の誤差となった。ただし、今回使用したレーダー装置は、約40cm間隔でデータを取得しており、このデータ取得間隔を考慮すると、距離方向の誤差は約1データ分の差となる。

5. 線路内監視システムへの実現に向けた検討

試験の結果から、90GH帯ミリ波レーダーを複数台用いて複数の線路が存在する環境で複数の人を分離して位置を検知できる見通しを得ることができたと言える。一方で、実用に向けて検討を深度化すべき課題も明らかになった。本章では、位置検知の機能も含めて、90GH帯ミリ波レーダーによる線路内監視システムの実現に向けて、今後取り組むべき内容について述べる。

5.1 検知までの時間と検知周期

鉄道環境でレーダー装置を用いた場合には、既設の設備も検知される。4章で示した検知試験結果では、人が存在しない場合の照査結果との比較により、人の存在を判定している。実際に線路内監視システムとして利用する場合には、1つ前の周期でのレーダーの照査結果との比較により新たに増えた部分を検知対象として抽出し、減った場合は検知対象が移動したと判定することを想定している。この手法を用いて線路内の作業員の検知を行う場合には、線路内で人が動くことを考慮した上で、レーダーの照査の周期を設定するとともに、1つ前の周期の照査データと比較し、新たに検知された箇所を抽出するための処理時間を考慮する必要がある。今後は、レーダー装置の照査周期と、検知結果として支障物を抽出するまでの処理時間についても検討する必要がある。

特集：信号通信技術

また、作業時などの場合、人は1点にとどまらず、線路内を動くことを想定する必要がある。歩行する人の速度が概ね1～2m/sであることから、検知周期を1秒に設定すると、歩行する人の動きに追従した検知と位置の把握が可能になると推測される。

5.2 照査結果の合成と比較について

4章で述べた位置検知の確認試験は、1台のレーダー装置で実施したが、図1に示したように、線路内監視システムは複数のレーダー装置で監視エリアを重複させ、複数のレーダー装置を線路沿線に設置し、多方向からの監視により検知漏れのリスクを減らすような配置を想定している。複数のレーダー装置を用いた照査結果を合成・比較することで、位置検知の精度向上や信頼性の向上も期待できる。この線路内監視システムの実現に向けて、複数のレーダー装置からの照査結果を合成・比較して、目標物の位置を特定する処理手法と処理時間についても検討する必要がある。

5.3 レーダー装置のアンテナについて

今回の検証試験で使用したレーダー装置は、ビームを水平方向に機械的に回転させる機構となっている。しかしながら、機械的な回転部分の存在は、可動部のメンテナンス等の新たな検討課題が生じることとなる。

そこで、近年ミリ波帯においても開発が進められており、自動車の前方監視用レーダーなどで一部実用化されている、電子走査により指向性を制御するアンテナを活用することで、可動部の存在による課題を解決できると考えられる。

6. まとめ

本稿では、多数の作業員が線路内で作業を行う場合を想定し、90GHz帯ミリ波レーダーを用いて作業員の位置を検知することを目的として実施した、複数の線路が存在する環境におけるフィールド試験の概要とその結果について報告した。

試験は、90GHz帯ミリ波レーダー装置を用いて、複数の線路内に複数の人が存在する条件で実施し、約20cmの間隔を空けて並んでいる人や複数の線路に分散した人の存在と位置を特定できることを確認した。これにより、90GHz帯ミリ波レーダーを用いた人の位置検知の原理について検証することができたと考える。

一方で、検知までの処理時間や検知周期、複数レーダーによる照査結果の合成と比較の手法とその処理時間等に課題があることについて述べた。

今後は、線路内監視システムとしての実現に向けた取り組みを進めるとともに、レーダー装置の検知精度など

についても検証していく予定である。また、車上から画像による前方監視手法の検討も進められており¹¹⁾、本稿で検討した地上の90GHz帯ミリ波レーダー装置と組み合わせることで相互に補完する線路内の監視システムの実現に向けた検討も進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、総務省における電波資源拡大のための研究開発「90GHz帯リニアセルによる高精度イメージング技術の研究開発」で得られた成果を活用している。

また、本研究における検知試験の実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 中村一城, 川崎邦弘, 柴垣信彦, 川西哲也, 米本成人: 90GHzを用いた線路内監視手法の検討, 第51回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号626, 2014
- 2) 水間毅: 鉄道における自動運転の歴史と今後, 計測と制御, Vol.56, No.2, pp.93-98, 2017
- 3) 総務省 電波利用ホームページ: <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/index.htm> (参照日: 2019年4月1日)
- 4) 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: 90GHz帯ミリ波の伝送特性と線路内監視システムへの適用の検討, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.29-34, 2014
- 5) ITU-R “Attenuation by atmospheric gases,” ITU-R P.676-11, 2016.
- 6) 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
- 7) 中村一城, 岩澤永照, 川崎邦弘: 雪による90GHz帯ミリ波減衰特性, 電子情報通信学会総合大会, B-1-19, 2016
- 8) 吉田孝: レーダ技術, 電子情報通信学会, pp.286-289, 1984
- 9) 竹内恵一, 岩澤永照, 岩城詞也, 中村一城, 小澤圭広, 河村裕介: 90GHz帯ミリ波レーダーを用いた線路内における人の検知試験, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-19-018, 2019
- 10) Nakamura, K., Kawasaki, K., Iwasawa, N., Yamaguchi, D., Takeuchi, K., “The Monitoring System Using 90GHz Band for Railway,” STECH2015, 2015.
- 11) 中曽根隆太, 長峯望, 鶴飼正人, 向嶋宏記, 出口大輔, 村瀬洋: 画像処理技術を用いた前方障害物検知装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.3, pp.11-16, 2017