

「ICT を利用した次世代 ITS の確立」のうち
「インフラレーダーシステム技術の開発」

平成 26 年度 研究開発成果報告書

平成 27 年 3 月

パナソニックシステムネットワークス株式会社

目次

1. はじめに	p. 3
2. 研究開発目標	p. 4
3. 研究開発体制	p. 7
4. 研究成果の要約	p. 8
4.1. 年次目標	p. 8
4.2. 成果概要	p. 9
5. 研究成果	p. 12
5.1. 技術課題ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発	p. 12
5.1.1. 取り組み内容	p. 12
5.1.2. ア) - ① 識別信号処理技術の開発	p. 13
5.1.3. ア) - ② 交差点死角対策技術の開発	p. 75
5.2. 技術課題イ) レーダー間干渉低減技術の開発	p. 101
5.2.1. 取り組み内容	p. 101
5.2.2. イ) - ① 耐干渉性能の実証実験	p. 101
5.3. 技術課題ウ) 耐環境性能補償技術の開発	p. 126
5.3.1. 取り組み内容	p. 126
5.3.2. ウ) - ① 耐環境性能の実証実験	p. 126
6. 研究発表などの成果	p. 139
7. アウトカム目標に向けた取り組み	p. 141
7.1. 標準化活動	p. 141
7.2. 実用化の取り組み	p. 141
7.3. 研究開発運営委員会	p. 142

1. はじめに

本研究開発は、「ICT を活用した次世代 ITS の確立」基本計画のアウトカム目標達成を目指し、研究開発課題の一つである「インフラレーダーシステム技術の開発」に取り組む。目標とする交通事故死者数 2500 人以下／年の達成に向けて、交差点等の様々な交通環境や気象・環境条件下で信頼性高く対象物検知・識別行うことが可能なインフラレーダーシステムを実現して、交通事故死者数削減に寄与することを目的とする。

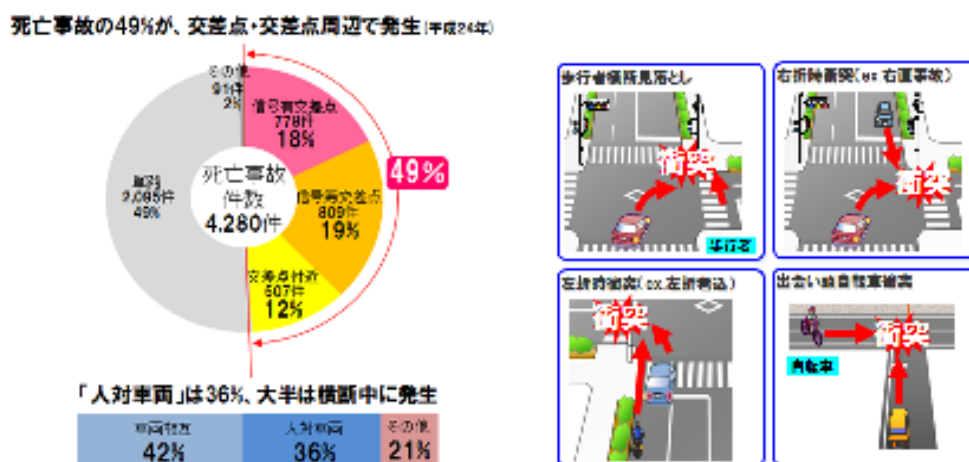


図 1-1. 日本における死亡事故の発生状況および事故様態の例

図 1-1 に示すように、日本では、交通事故による死亡者が、年間 4,280 名 (平成 24 年) であり、事故の半数近くが交差点およびその周辺で発生している。特に、複雑な交差点の環境下では死角が避けられないため、事故を防止するのがより困難となっている。実効性が高く、効率的な研究開発を推進していくためには、この図に示すような優先的に解決すべき衝突事故の様態を定めることで、開発技術の実証実験を加速できると考える。

2. 研究開発目標

本研究開発は、基本計画「インフラレーダーへの要求条件の検討」において明確化される交通シーンと性能要求に応えるだけでなく、悪天候時の検出性能劣化やデータ処理時間の制約などの実使用条件においてシステムが機能する範囲を明確にしていくことを基軸とし、以下のように取り組む。

人や車といった小さな対象物を検知可能な79GHz帯高分解能レーダーを路側設置センサーに用いて、路車協調型の安全運転支援システムとして実用化するため、検出信頼性、耐干渉性および耐環境性に優れたインフラレーダー技術、および安全運転支援に資するための路車協調システム技術を開発する。インフラレーダー技術としては、主に歩行者に対するレーダー検出の信頼性を向上させる「レーダー検出信頼性向上技術の開発」、交差点内に車載レーダーとインフラレーダーが混在する条件でこれらのレーダーシステムを共存させる「システム間干渉低減技術の開発」、およびインフラレーダーを多様な実環境下で適切に動作させる「耐環境性能補償技術の開発」に取り組む。くわえて、路車協調システム技術としては、インフラレーダーで収集した情報を自動車に提供するための「路車連携技術の開発」に取り組む。

ここで、平成26年度から平成28年度の3年間は、インフラレーダー技術の開発に注力する。具体的には、交差点の路側設置センサーとして小型な79GHz帯高分解能レーダー装置を開発し、高齢者をはじめ人の確実に漏れのない検出を実証するだけでなく、複数の車載レーダーが存在する条件での周波数共用や、様々な天候、温度の条件下でのレーダー動作について実証を完了する。また、平成29年度から平成30年度の2年間では、複数の79GHz帯高分解能レーダー装置を制御し、レーダーセンサーが検出した危険情報を周囲の自動車へ伝送するセンサー統合処理装置を開発することで、安全運転支援のサービス提供に向けたインフラレーダーシステム技術の実証を完了する。

ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、レーダーが検出する物理情報として、距離、角度、ドップラー周波数のすべてに対して高い分解能が要求される。この要求に対し、歩行者等の識別と車種の判別、さらには複数のレーダーを用いた車両の追跡を可能とする識別信号処理技術、および交差点死角対策技術を確立するため、歩行者の分離検知に優れる符号化パルス方式、レーダー設置を容易にする小型なアンテナサイズで高い角度精度を実現できる送受信アダプティブアンテナ方式を用いた79GHz帯レーダーを活用する。

識別信号処理技術の開発では、この79GHz帯レーダーを用いた実験データの取得と、データの解析、評価を通じて、レーダープロファイルから特徴量や識別に用いるパラメータの抽出を目指したアルゴリズム開発に取り組む。

交差点死角対策技術の開発では、複数の79GHz帯レーダーを用いたより実用性の高いセンサー情報の取得を目指し、対象物に付与する物標情報をID管理するための仕様検討を進めつつ、オクルージョン発生の実験データに基づいたレーダー出力データの統合処理開発に取り組む。

イ) レーダー間干渉低減技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、79GHz帯のインフラレーダーが、車載レーダーとの耐干渉性能として優れているだけでなく、インフラレーダーシステムとして複数レーダー間の相互干渉を制御することが求められる。この要求に対し、伝搬実験を通じて干渉発生率を解析、評価することでインフラレーダーと車載レーダー間の耐干渉性能を実証する。さらに、インフラレーダーシステムとしては相互干渉を制御しつつシステムを識別するための直交符号化レーダー方式を用いた干渉低減システム技術を開発する。

耐干渉性能の実証実験では、交差点環境における干渉評価シナリオの策定と、統計的なデータ解析のための試験環境の構築を実施する。その上で、瞬時の干渉発生を検知するようにして取得された長時間の評価データに基づき、干渉耐性を検証する。

干渉低減システム技術の開発では、同一システム内で複数のレーダーユニットを統合して、レーダーを動作させる周波数や時間を制御するためのシステムアーキテクチャを開発する。さらに、設置場所毎にレーダーシステムに固有のIDを付与することで、干渉信号を分離する直交符号化レーダー方式の導入を検討する。

ウ) 耐環境性能補償技術の開発

基本計画の到達目標を達成するためには、降雨や降雪といった悪天候時においても、79GHz帯レーダーのハードウェアとして所要の動作を実現するだけでなく、環境変化が要因となる誤検出の発生を抑圧して、歩行者や車両を安定して検出できるようにすることが求められる。この要求に対し、79GHz帯ミリ波における伝搬実験を実施して、降雨や降雪といった天候だけでなく環境温度の変化に対する79GHz帯レーダーの実効性能を検証する。さらに、ミリ波の電波伝搬特性に影響を与えるような環境変化が生じた場合にも、79GHz帯レーダーが歩行者等を安定して検出するための検出性能補償技術を開発する。

耐環境性能の実証実験では、降雨量や降雪量を一定に保つ試験設備や実際の降雪環境における伝搬実験を通じて、路側設置のレーダーユニットを構成する、特に79GHz帯ミリ波の放射に係る部品の特性を定量化することで、インフラレーダーとしての回線設計等へフィードバックする。

検出性能補償技術の開発では、降雨や降雪によってミリ波帯の散乱特性が変化し、特に歩行者の検出性能に影響の大きいと考えられる路面等の静止背景物からの反射信号を、背景ノイズと見なして除去するためのアルゴリズム開発に取り組む。

エ) 路車連携技術の開発

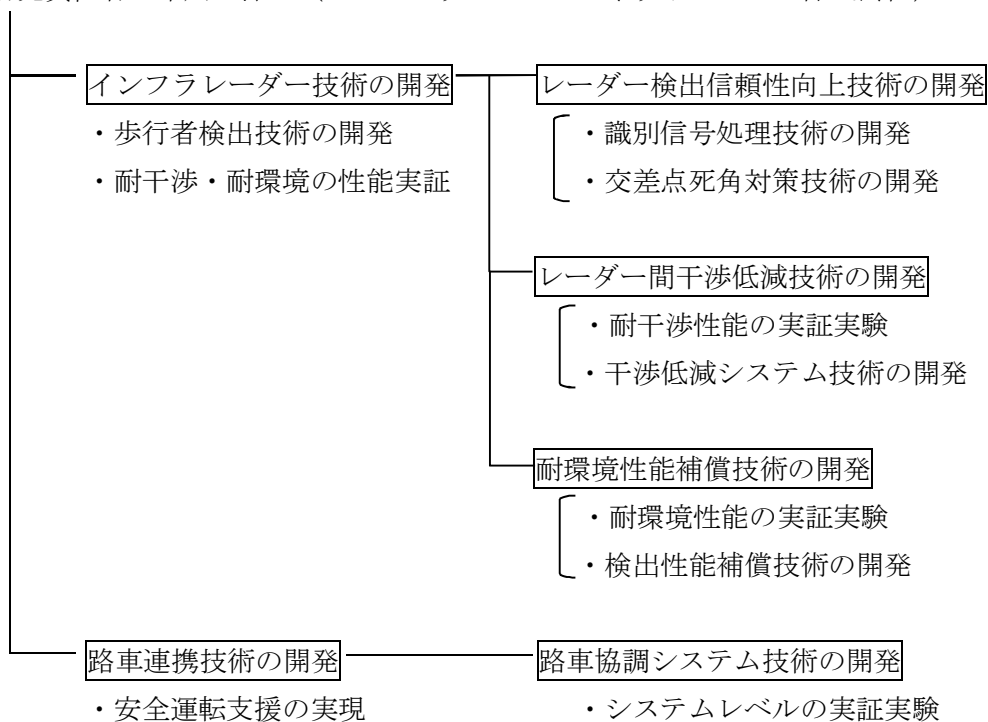
基本計画の到達目標を達成するためには、インフラレーダーによるセンサーの検知情報に基づき、衝突を回避するために運転者等に通知すべき情報を生成する技術を開発して、路車間通信機能を具備したインフラレーダーシステムとして、フィールドで検証することが求められる。この要求に対し、79GHz 帯高分解能レーダーを路側のセンサーとして活用したインフラレーダーシステムとして、主に交差点環境における安全運転支援を実現するための機能をシステムレベルで検証するものである。具体的には、交差点エリアにおける対象物の検知情報を出力する路側設置の 79GHz 帯レーダーセンサーと、複数の路側レーダーセンサーが生成する検知情報を統合して、障害物に関する物標情報として出力するセンサー統合処理装置で構成されるインフラレーダーシステムと、障害物情報を活用する車載システム等を具現化して、フィールドでの検証実験を実施する。

また、障害物の検知にくわえて、より高いレベルの安全運転支援を実現するためには、リアルタイムに取得される歩行者や車両の物標情報だけでなく、統計的なデータ分析に基づく危険予測等が重要な機能となると考えられる。よって、本研究開発課題では、衝突回避のみならず危険事象の検知等の将来の技術検討に資するデータベースの構築を目指し、路車協調システム技術のフィールド実証を通じた実験データの蓄積にも取り組む。

3. 研究開発体制

成果目標：インフラレーダーシステムの実現

代表研究責任者：中川 洋一（パナソニックシステムネットワークス株式会社）



ビジネスプロデューサ：大杉 武士（パナソニックシステムネットワークス株式会社）

研究開発運営委員会

・学識経験者、有識者の助言や指導

4. 研究成果の要約

4.1. 年次目標

前述した最終目標に向けた全研究開発期間の取り組みに対して、平成 26 年度は以下を年次目標とする。

ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発

①識別信号処理技術の開発

79GHz 帯レーダー装置を開発試作し、歩行者の近傍にガードレール等が存在する条件で距離とドップラー周波数の電力プロファイルを実測、解析するようにした、ドップラー周波数解析により歩行者の特徴量を抽出する。

(理由) 低速な歩行者を周囲の物体から分離して検出することは、高齢者等の事故防止に向けて、最も基本となるレーダー検出性能の実現であるため、インフラレーダーシステム技術の実証に向けた基本要素技術の確立として優先的に実施する。

②交差点死角対策技術の開発

79GHz 帯の伝搬実験を通じて、路側に設置されるレーダーが歩行者を検出する際に車両によって発生するオクルージョンのモデリングを実施する。くわえて、高分解能な 79GHz 帯レーダーの測位精度を定量評価するための実験環境の構築を完了する。

(理由) オクルージョンの発生条件下で、レーダー検出性能を定量的に評価するためには、リファレンスデータとして、レーダーと車両や歩行者の位置関係を高精度に計測できる実験環境が必須となるため、伝搬実験を可能とする環境の構築に優先的に実施する。

イ) レーダー間干渉低減技術の開発

①耐干渉性能の実証実験

複数の搬送波周波数等を選択できる基準の干渉信号源とし、インフラレーダーとして試作開発する小型の 79GHz 帯レーダーユニットが被る干渉特性を実測により把握する。

(理由) 実伝搬環境におけるミリ波レーダー間の干渉検知方法を確立するためには、レーダーアンテナとレーダー信号処理部を切り分けた基礎検討が必要であり、搬送波周波数等を調節可能な基準信号源を導入することで、被干渉特性に関する基礎実験データを取得する。

ウ) 耐環境性能補償技術の開発

① 耐環境性能の実証実験

降雨条件における 79GHz 帯伝搬特性の実験データの取得等を実施することで、インフラレーダーとしての回線設計とレーダーユニットの構想設計へ反映する。
(理由) 特に降雨量に対する 79GHz 帯レーダーの伝搬データは、レーダー回線設計等の実用性を高めるだけでなく、最終目標に向けた効率的な研究開発推進のために必須であるため、試験場での実験とその結果のフィードバックに注力する。

4.2. 成果概要

研究開発目標に対する個々の技術開発および実証実験の取り組みは順調であり、実施計画通りに年次目標を達成できた。なお、実用化の取り組みや標準化活動も順調であり、また研究開発運営委員会（今年度第 1 回を 1/20 に開催）において研究成果目標等を承認いただいた上で、計画通りに実施した。年次目標に対する達成の状況は以下の通りである。

ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発

① 識別信号処理技術の開発

屋内環境において、歩行者に対する特徴量抽出に向けた先行評価実験を実施した。評価実験に使用した 79GHz 帯レーダーの動作緒元は、視野角 60° 程度、角度ステップ 1°、ドップラー分解能 0.5km/h 以下であり、検出対象物は、車相当の静止物として標準リフレクタ +20dBsm と複数の歩行者であって、距離や方位にくわえてドップラーの分解能により、静止物と歩行者を識別できることを確認した。

次の段階として、屋外環境において歩行者近傍に車両やガードレール等が存在する条件の電力（エコー強度）とドップラー周波数のレーダープロファイルを実測した。そのために、複数の対象物が混在する中から歩行者を分離した上で、ドップラー周波数解析によりその動きの特徴量を抽出することが可能な 79GHz 帯符号化パルスレーダー装置の開発試作を推進し、平成 27 年 2 月 12 日付で実験試験局を新規開設した。ここで、レーダー装置が実現する性能は、ドップラー周波数に基づいて算出される速度の分解能 0.5km/h 以下、精度 0.2km/h 以下としている。このレーダー装置等を使用することで、歩行者の近傍に車両やガードレール等が存在する条件で、距離とドップラー周波数の 2 次元電力プロファイル等を実測することができた。さらに、この実験データを詳細に解析、およびリアルタイムの評価を実施することで、特にドップラー周波数の広がりや分布において歩行者に対する特徴量の明

確化を達成することができた。

②交差点死角対策技術の開発

インフラレーダーの設置高さや俯角、または、車両の種別や歩行者との位置関係を変えながら検出性能を伝搬実験により定量評価するため、平成 27 年 3 月 2 日から 6 日の間に、一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) 所有のテストコースにおいて屋外実験を実施した。この伝搬実験を通じて、路側に設置される 79GHz 帯レーダーが歩行者を検出する際に車両の停止や走行によって生じるオクルージョン発生条件の明確化を達成することができた。くわえて、高分解能な 79GHz 帯レーダーの測位精度を定量評価するために、高精度な測位センサーとしてレーザーレーダーおよび可視カメラを用いた伝搬実験環境の構築を完了した。

イ) レーダー間干渉低減技術の開発

①干渉性能の実証実験

実証実験を推進していくインフラレーダーには、符号変調パルスレーダー方式を採用しているため、理論的には、符号拡散利得と位相回転を含むコヒーレント加算利得等による 60dB 程度の干渉波抑圧効果が得られることを確認している。基礎実験の一環として、屋内環境で擬似的に強干渉波が到来する伝搬条件（同一搬送波、同一符号化の条件）を生成し、エコーの到来方向やドップラー周波数を推定することで、干渉波に特有の振る舞いを定性的に把握した。

その上で、基準の干渉信号源として、複数の搬送波周波数等を選択でき且つ既に動作実績のあるアレイアンテナ RF 装置を使用し、新たに実験試験局免許を取得した。これにより、79GHz 帯のアンテナ・RF 部を小型化した 79GHz 帯レーダーユニットとして平成 26 年度に開発試作する 79GHz 帯パルスレーダー装置が被る干渉特性を把握するため、実験室や JARI 所有のテストコースといった再現性が確保された電波空間で実測データの取得を行い、年次目標を達成することができた。

ウ) 耐環境性能補償技術の開発

①耐環境性能の実証実験

降雨試験場（時間雨量 50mm 以上）において先行取得された 79GHz 帯伝搬特性に関わるサンプルデータの解析を実施し、第 1 回研究開発運営委員会においてその結果を報告した。運営委員会委員の有識者からは、強い降雨の伝搬特性について追加データの取得が必要であり、大型の試験設備を使用した雨粒の粒径が 79GHz の波長と同程度となる条件での実験やデータ解析が重要との指摘があった。

そのため、試験設備の使用予約に着手するとともに、改めて平成 27 年度の年次目標にも位置づけて実施することを検討している。平成 26 年度は、既に取得した基礎

データの解析結果および ITU-R 勧告等の降雨環境における伝搬特性に関する知見を踏まえ、インフラレーダーとしての回線設計とレーダーユニットの構想設計へ反映する取り組みを進めることができた。なお、このようにして回線設計を精査しつつ、所要の感度と視野角を同時に実現するために必要となるレーダーユニットの構成検討を進めていく中で、その一部を平成 26 年度に開発試作する 79GHz 帯パルスレーダー装置のレーダーモジュール仕様等へ反映することができた。

5. 研究成果

5.1. 技術課題ア) レーダー検出信頼性向上技術の開発

5.1.1. 取り組み内容

①識別信号処理技術の開発

複数の対象物が混在する中から歩行者を分離した上で、ドップラー周波数解析によりその動きの特徴量を抽出することが可能な79GHz帯符号化パルスレーダー装置を開発試作する。ここで、レーダー装置が実現する性能は、ドップラー周波数に基づいて算出される速度の分解能0.5km/h以下、精度0.2km/h以下とする。このレーダー装置を使用して、歩行者の近傍にガードレール等が存在する条件で、距離とドップラー周波数の2次元電力プロファイルを実測する。この実験データを詳細に解析、おおよびリアルタイムの評価を実施することで、歩行者に対する特徴量を明確化する。

②交差点死角対策技術の開発

インフラレーダーの設置高さや俯角、または、車両の種別や歩行者との位置関係を変えながら検出性能を伝搬実験により定量評価することで、路側に設置される79GHz帯レーダーが歩行者を検出する際に想定されるオクルージョン発生条件を明確にする。くわえて、高分解能な79GHz帯レーダーの測位精度を定量評価するために、高精度な測位センサーとしてレーザーレーダー等を用いた伝搬実験環境の構築に取り組む。

(該当物品費： 広角測位レーザーセンサー装置、歩行者ダミー試験システム、79GHz帯パルスレーダー装置、レーダー実験用調節治具、79GHz帯レーダー標準リフレクタ)

(該当その他経費： 伝搬シミュレーションソフトウェア、伝搬シミュレーションモデル作成、テストコース・試験設備期間借用、レーダー実験作業支援)

5.1.2. ア) -① 識別信号処理技術の開発

(1) 歩行者に対する特徴量抽出に向けた先行評価

低速に移動する歩行者を、路肩やガードレールといったような交差点環境の静止する背景地物や車両と識別するためには、ミリ波レーダーで測定されるエコーの電力やドップラー周波数について、実対象物に関連付けられる特徴量を抽出していく必要がある。

79GHz 帯レーダーは、1GHz を超える広い周波数帯域の使用が可能のため、人体の厚みに相当する距離の領域は 20cm 以下という高い分解能が確保されている。また、角度の分解能は対象物である歩行者等を他の物体と分離し、障害物として検知することが、レーダーのアンテナ走査方式を設計する際の一つの指針となる。一方で、歩行者の動き、場合によっては動線だけでなく手足を含む動きを、レーダープロファイルから検出するためには、エコーの到来方向に対する高い精度が求められることが想定される。くわえて、79GHz 帯ミリ波を使用しているため、物理的にドップラー周波数の分解能が高まり、時速 1km 以下の速度で移動する物体と静止物を明確に識別できる。

したがって、歩行者に関する特徴量抽出およびそれを用いた識別アルゴリズム開発に必要な測定データとして、視野角 60° ~ 70° 、角度のステップが 1° 、ドップラー分解能が 0.5km/h 以下を必要条件と仮定し、ここでの伝搬実験に用いる 79GHz 帯レーダーの動作緒元とした。

図 5.1.2-1 は、79GHz 帯レーダーによって得られたアルゴリズム評価データのスナップショットを示しており、図 5.1.2-1 (a) がレーダーによって、静止物体と移動物体を分離して検出した結果を示している。ここで、図 5.1.2-1 (a) の画像から確認できるように、屋内環境において、静止物のリファレンスに車両相当のリフレクタ R (+20dBsm) を用いた条件で、その周囲を二人の歩行者 P1、P2 がランダムに移動するようにした。

図 5.1.2-1 (b) および図 5.1.2-1 (c) は、それぞれレーダーエコーの電力プロファイルとドップラープロファイルを示しており、扇形領域の要にレーダーの送受信アンテナが在って、各図の下から上に向かって距離、扇の左右の開きが方位角を表している。ここで、図 5.1.2-1 (b) の色づけは、エコー強度が強弱を示しており、赤色が強いエコーで緑色から青色が弱いエコーからノイズレベルまでを示している。また、図 5.1.2-1 (c) では、レーダーのアンテナに近づいてくる方向のドップラー周波数シフトがエコーとして測定された場合は赤色で、その逆の場合は青色で表示するようにしている。

図 5.1.2-1 (b) や図 5.1.2-1 (c) の測定データが示しているように、20m 程の距離に在る歩行者は、距離と角度の 2次元領域において広がった複数のレーダーエコーとして観測されるだけでなく、ドップラー周波数の領域でも広がる傾向であることが確認できる。

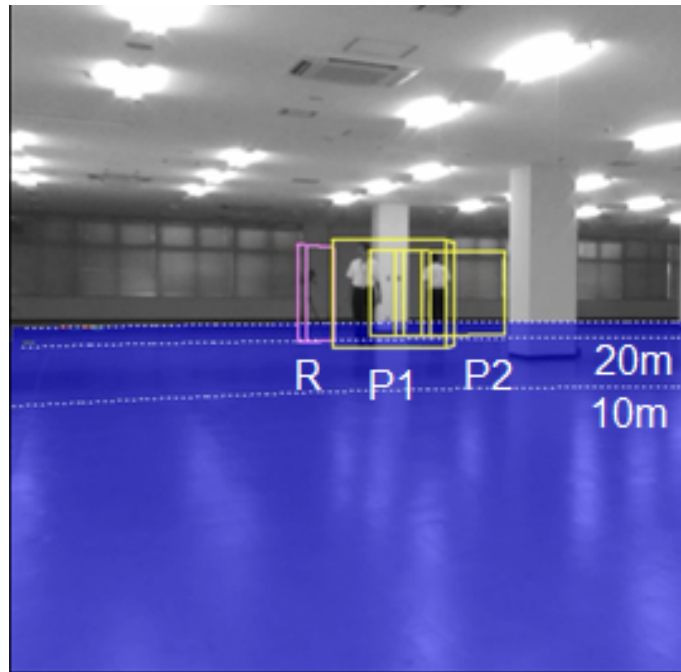


図 5.1.2-1 (a) レーダー検出結果

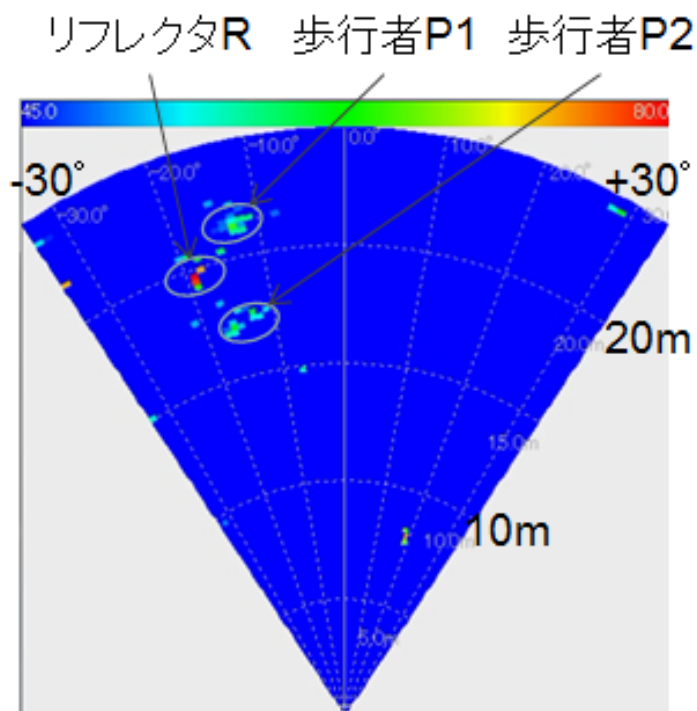


図 5.1.2-1 (b) 電力プロファイル

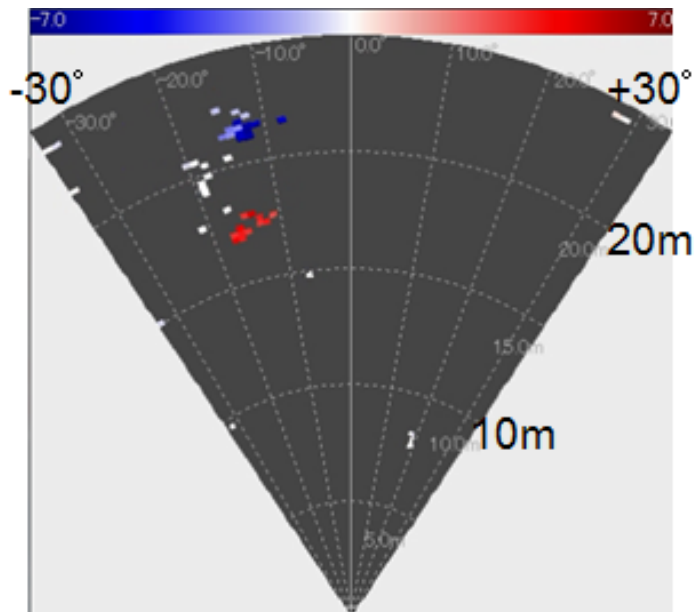


図 5.1.2-1 (c) ドップラープロファイル

図 5.1.2-1 79GHz 帯レーダーによるアルゴリズム評価データ (スナップショット)

以上のように、歩行者を背景や車両と識別するアルゴリズム開発として、まずは屋内環境において測定された、歩行者に対する 79GHz 帯のレーダーエコーに関する電力プロファイルやドップラープロファイルのデータを用いて、距離や角度、ドップラーの広がりに関する特性を確認した。

また後述のとおり、平成 26 年度は、屋外環境でも歩行者の近傍に車両やガードレール等が存在する条件でも、79GHz 帯パルスレーダー装置を使用した電力やドップラー周波数に関するレーダーエコーのプロファイルデータを測定し、データ解析を行った。

なお、以下に記載している図 5.1.2-2 では、方位角領域におけるピーク抽出によって得られるレーダープロファイル画像について、元データである方位スペクトラムを用いた場合の画像との比較できるようにしている。図 5.1.2-2 の各図が示すように、歩行者のような実対象物に対して、レーダープロファイルとして測定される画像データは、測定に用いる 79GHz 帯レーダーの緒元や信号処理方法に依存することが分かる。

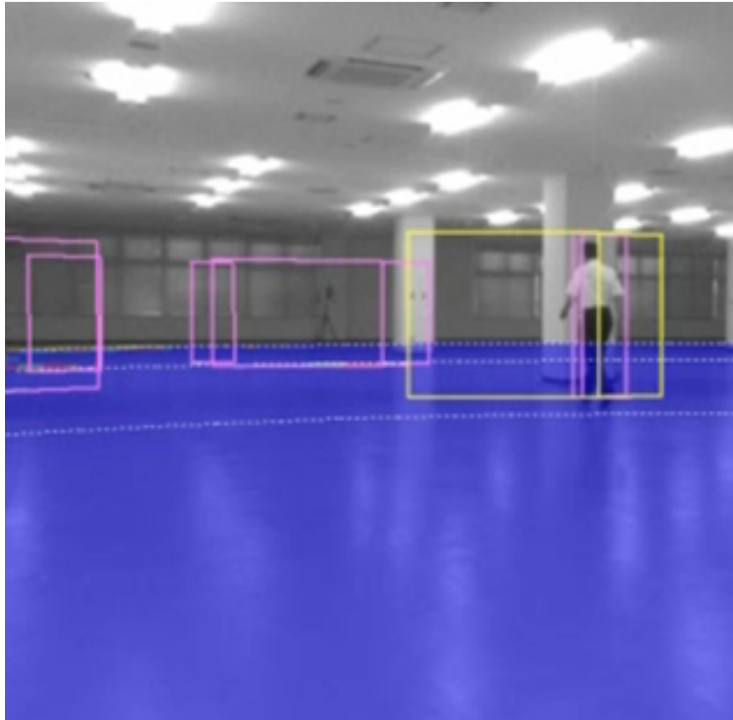


図 5.1.2-2 (a) レーダー検出結果 (方位スペクトラム)

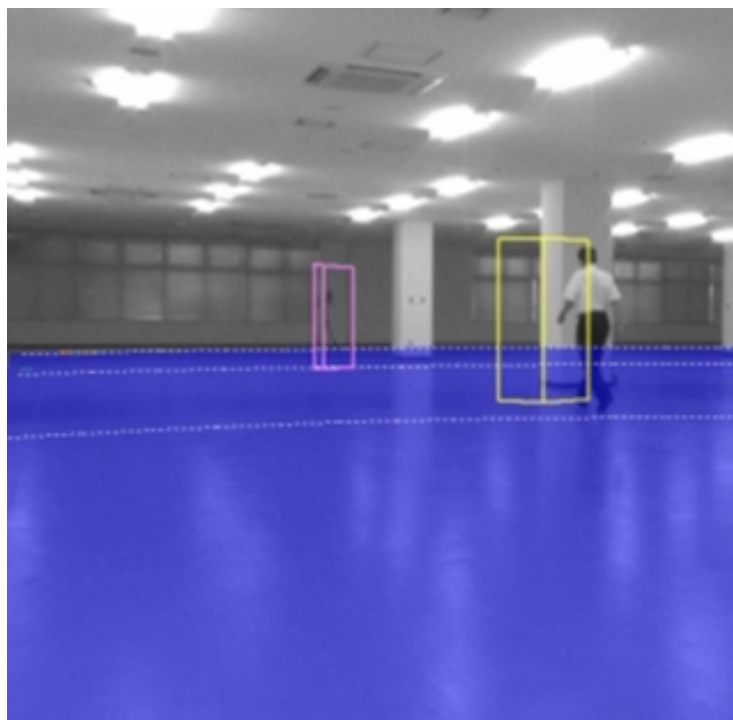


図 5.1.2-2 (b) レーダー検出結果 (方位ピーク抽出)

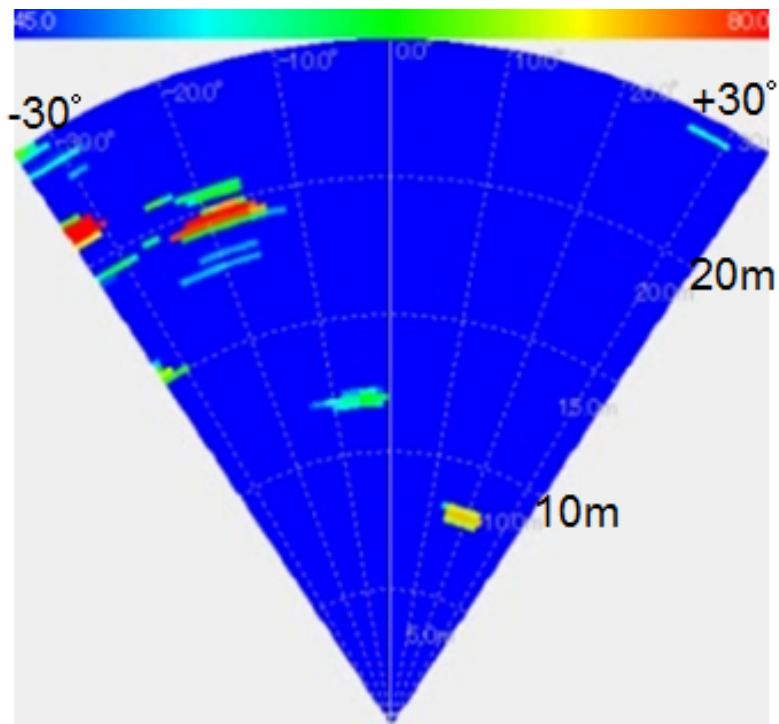


図 5.1.2-2 (c) 電力プロファイル (方位スペクトラム)

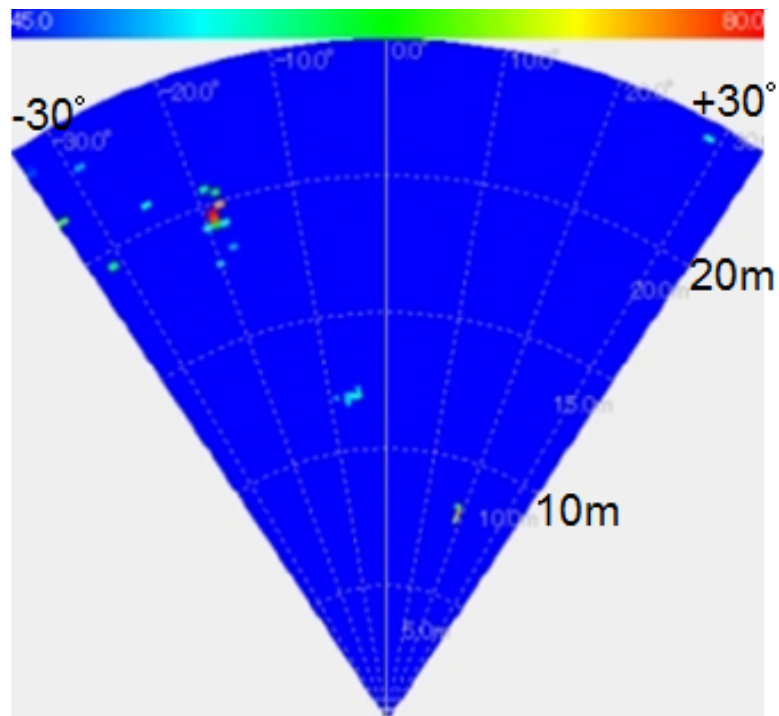


図 5.1.2-2 (d) 電力プロファイル (ピーク抽出画像)

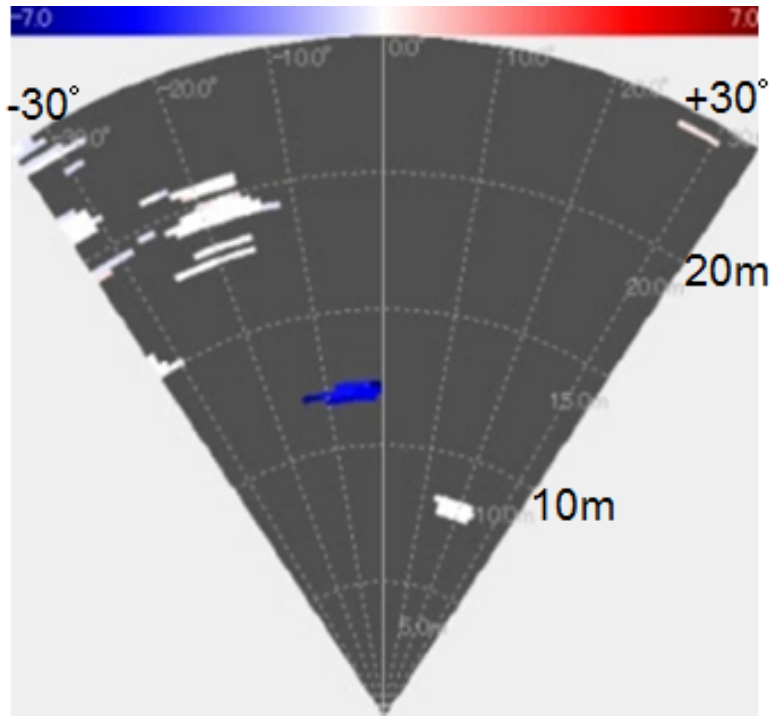


図 5.1.2-2 (e) ドップラープロファイル (方位スペクトラム)

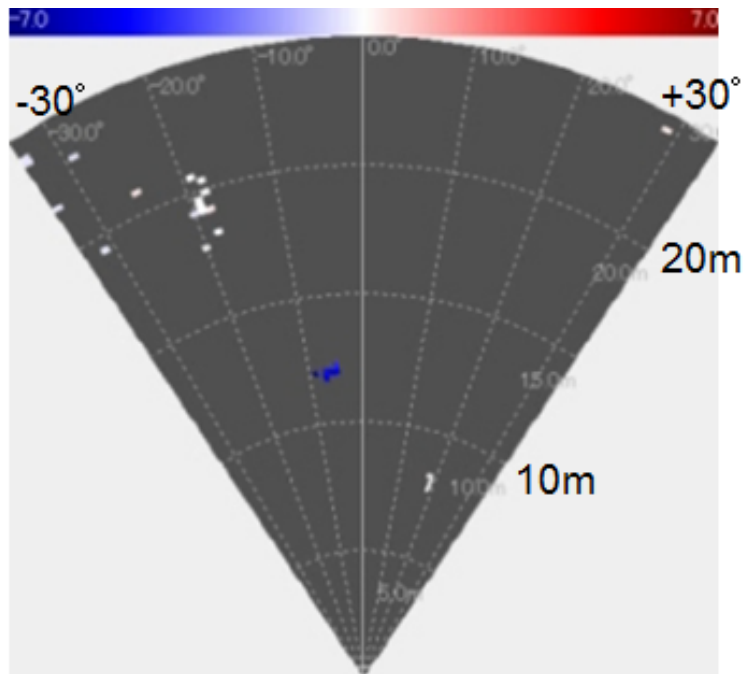


図 5.1.2 (f) ドップラープロファイル (ピーク抽出)

図 5.1.2-2 方位角領域におけるピーク抽出画像 (スナップショット)

(2) 79GHz 帯符号化パルスレーダー装置の開発試作

ここでは、インフラレーダー技術の実証実験に向けて、平成 26 年度に開発した 79GHz 帯パルスレーダー装置について説明する。

<採用するレーダー方式の特徴>

インフラレーダーの技術実証に向けて開発するミリ波レーダーは、以下に示す要件を満たす必要がある。

A) 近距離と遠距離の複数ターゲット検出

近距離と遠距離の 2 つのターゲットからの反射波が混合した信号を受信する場合、近距離ターゲットからの反射波の自己相関特性にレンジサイドローブが生じることがある。このレンジサイドローブが遠距離ターゲットからの反射波の受信レベル程度の大きさとなる場合、遠距離ターゲットとして誤検出することとなり検出精度が劣化する。また、SNR (Signal to Noise Ratio) 確保のため送信を繰り返し行う場合、距離減衰の異なる近距離ターゲットと遠距離ターゲットからの反射波が重なるため、受信レベルに大きな差を生じる。

B) 人 (歩行者) と車の同時検出

同じ距離にある人と車の 2 つのターゲットからの反射波が混合した信号を受信する場合、人のレーダー反射断面積が車両よりも小さいため、受信レベルに大きな差を生じる。

上記の要件を満たすため、図 5.1.2-3 に示すような符号化パルス圧縮レーダー方式 (以下、符号化パルス方式とする) を用いた 79GHz 帯パルスレーダー装置の開発試作を進めることとした。ミリ波レーダーとして自動車レーダー等に採用されている FMCW 方式と比較して、パルス圧縮方式の方が自己相関特性に優れており高い分解能での検出が期待できる。

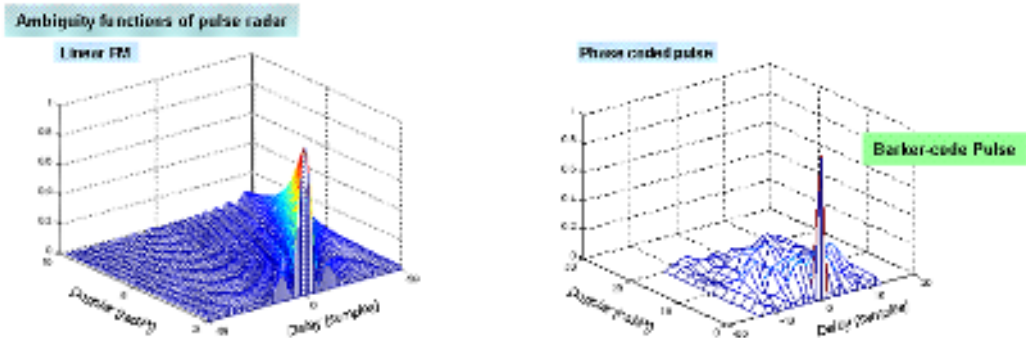


図 5.1.2-3 FMCW レーダー方式とパルス圧縮レーダー方式の対比

<レーダー受信信号処理と回線設計>

図 5.1.2-4 に示すレーダー受信処理を用いることで、パルス圧縮利得、コヒーレント加算利得、ドップラーフィルタ利得等が確保できるようになる。この図に示したブロック構成のミリ波レーダーを用いる前提とした上で、40m 先の歩行者検知（リンクマージン>10dB）を可能とする 79GHz 帯のレーダーシステム回線設計を実施した。この回線設計の一例を表 5.1.2-1 に示しており、実際のレーダー装置においては受信処理利得算出条件に記載されている各パラメータ等は最適化される。

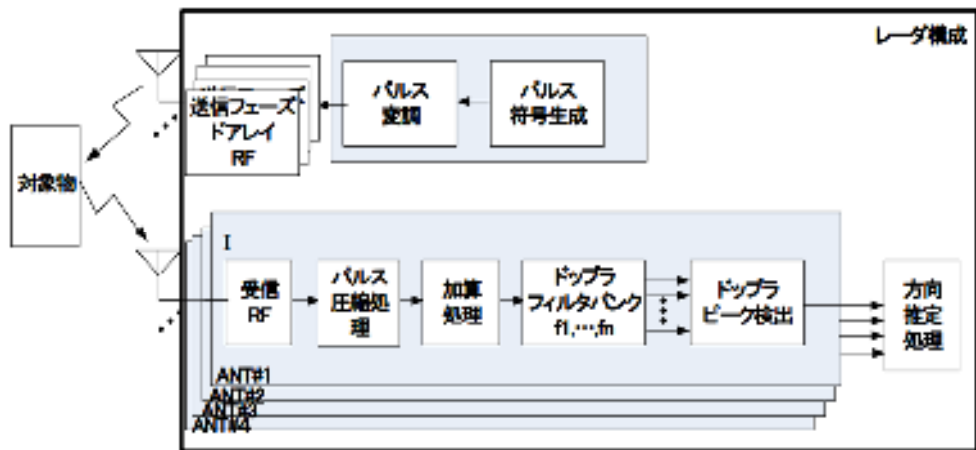


図 5.1.2-4 パルス圧縮方式のミリ波レーダー送受信構成

表 5.1.2-1 79GHz 帯レーダーシステムの回線設計例

受信電力算出条件	最大検知距離 [m]	40.0	
	無線周波数 [GHz]	79.0	
	送信平均電力 [mW]	10.0	
	最小レーダ断面積 [dBsm]	-17.0	
	往復伝搬損失 [dB]	145.5	
	降雨時減衰 [dB]	8.0	
	標準絶対温度 [K]	300.0	
	送信アンテナ利得 [dBi]	21.0	
	受信アンテナ利得 [dBi]	18.0	
	マージン算出条件	受信電力 [dBm]	-121.5
受信機NF [dB]		10.0	
ノイズレベル [dBm]		-83.0	
受信処理利得 [dB]		59.3	
受信処理利得算出条件		3dB通過帯域幅 [GHz]	1.2
		99%占有帯域幅 [GHz]	2.0
		パルス送信周期 [ns]	340.0
		Duty cycle [%]	41.7
	パルス積算回数	5000	
リンクマージン ^{注)} [dB]	10.9		

注) マージン算出式：リンクマージン[dB] = 受信電力[dBm] - ノイズレベル[dBm]
 - 受信機 NF[dB] + 受信処理利得[dB]

<79GHz 帯の平面アレイアンテナ>

79GHz 帯パルスレーダー装置のレーダーモジュールに搭載する平面アレイアンテナについて詳述する。

この平面アレイアンテナは、12 素子ループアンテナを1つのアレイ系統とする構成を採用しており、図 5.1.2-5 にはその1系統分のアンテナ放射面を示している。図に示すように、アンテナ中央部からスルーホールを介してマイクロストリップ線路が分岐し、線路の途中に複数のループアンテナと終端にパッチアンテナを配置した構造となっている。

くわえて、図 5.1.2-6 には、12 素子ループアンテナを4系統用いて配列した時の4×12 素子アレイアンテナ構成を示す。また、表 5.1.2-2 には、アンテナ間隔 $d=0.5\lambda$ として、XZ 面-30 度～30 度の範囲でビーム方向を変化した条件でのアンテナ性能に関するシミュレーション結果を示している。

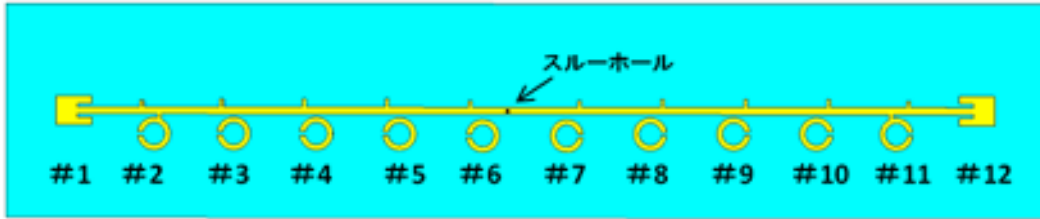


図 5.1.2-5 12 素子ループアンテナ

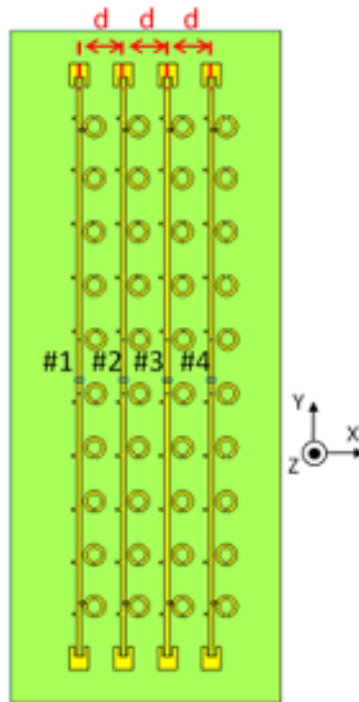


図 5.1.2-6 4×12 素子アレイアンテナ

表 5.1.2-2 4×12 素子アレイアンテナの性能
(-30 度～+30 度の範囲でビーム方向を変化させた条件)

列間隔d[mm]	1.9 (=0.5λ)
利得[dBi]	18.3～20.5
ビーム走査に必要な列間位相差[deg.]	-105～115
半値角(XZ面)[deg.]	28.0～32.3
サイドローブレベル(XZ面)[dB]	-14.3～-25.5
列間のアイソレーション[dB]	18.5～38.1

<レーダーモジュールの配置検討>

前述した 4×12 素子アレイアンテナを用いたレーダーモジュールの場合、垂直面である YZ 面のビーム半値角が約 8 度と狭くなる。このため、図 5.1.2-7 に示すように、YZ 面ビーム半値角の広い 79GHz 帯レーダーモジュールを組み合わせたシステム構成について検討することにした。図に示すように、距離 5m~20m と距離 20m~40m をレーダー検出の範囲として分割することで、信号機と同程度の地上高 5m に設置されたミリ波レーダーユニットが検出距離の範囲 5m~40m をカバーできるようになるため、標準的な交差点に対応できると考えられる。

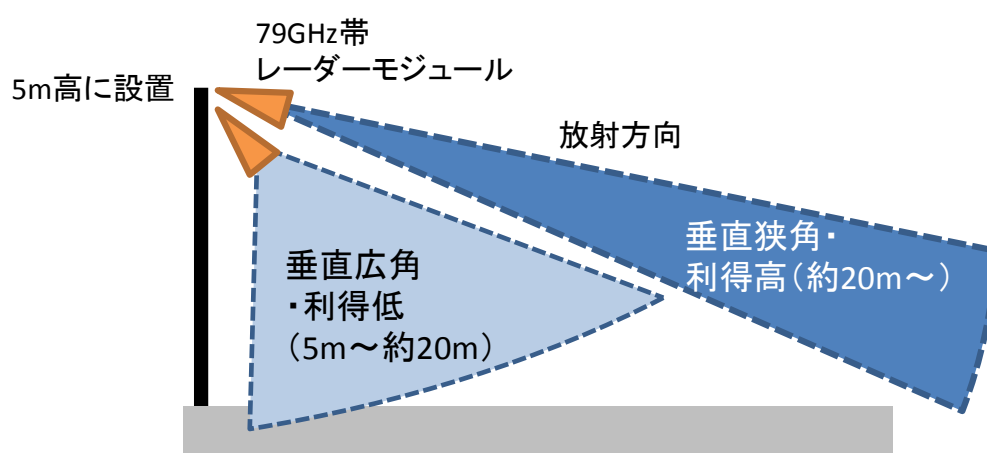


図 5.1.2-7 YZ 面ビーム半値角の異なるレーダーモジュールの配置検討

<垂直面を広角化するアンテナ設計>

20m までの距離をカバーする近距離用のアンテナには、前述したような 12 素子ループアンテナに対して、広い YZ 面ビーム半値角が必要である。そのため 12 素子から 4 素子へ変更することで、YZ 面の広角化を実現した。なお、12 素子ループアレイアンテナを用いたレーダーモジュールの構成も同様だが、受信用には 4 系統のアレイアンテナを、送信用には 8 系統のアレイアンテナを備えることにした。

図 5.1.2-8 には、受信に用いる 4×4 素子アレイアンテナのアンテナ放射面を図示しており、表 5.1.2-3 にそのアンテナ性能に関するシミュレーション結果を示す。また、図 5.1.2-9 から図 5.1.2-12 には、4×4 素子アレイアンテナの YZ 面、および XZ 面のアンテナ放射パターンを示している。

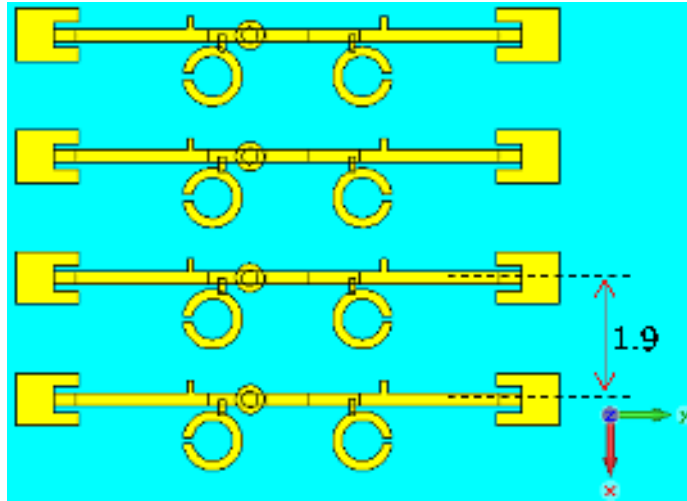


図 5.1.2-8 距離 20m までをカバーする受信用 4×4 素子アレイアンテナ

表 5.1.2-3 受信用 4×4 素子アレイアンテナの性能

	77GHz	79GHz	81GHz
利得[dBi]	15.8	16.1	16.0
YZ面半値角[deg.]	21.1	21.1	20.7
YZ面SLL [dB]	-14.6	-14.0	-14.1
XZ面半値角[deg.]	25.5	24.7	24.1
交差偏波比[dB]	21.7	22.5	19.5
放射効率[dB]	-1.5	-1.5	-1.7

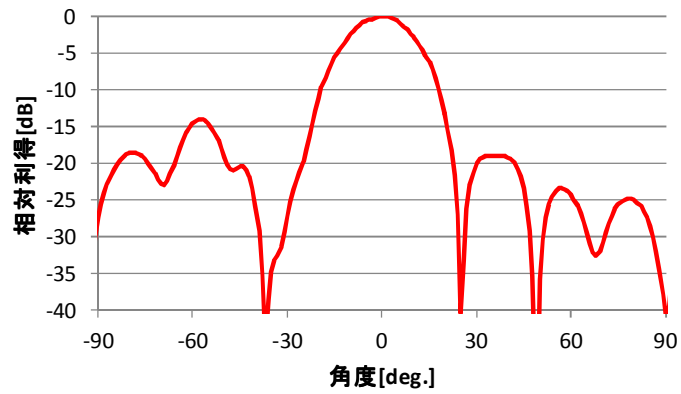


図 5.1.2-9 4×4 素子アレイアンテナ YZ 面放射パターン (主偏波/79GHz)

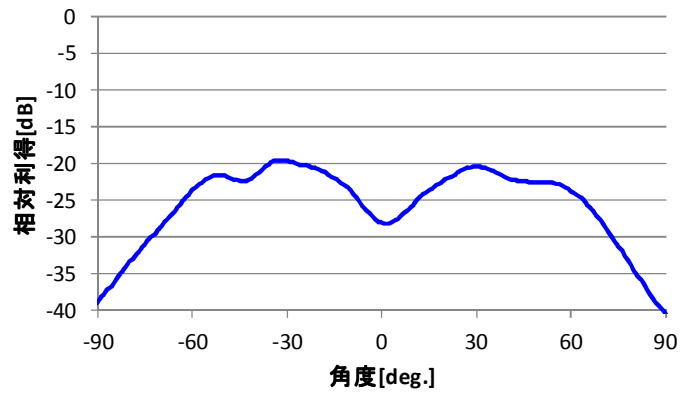


図 5.1.2-10 4×4 素子アレイアンテナ YZ 面放射パターン (交差偏波/79GHz)

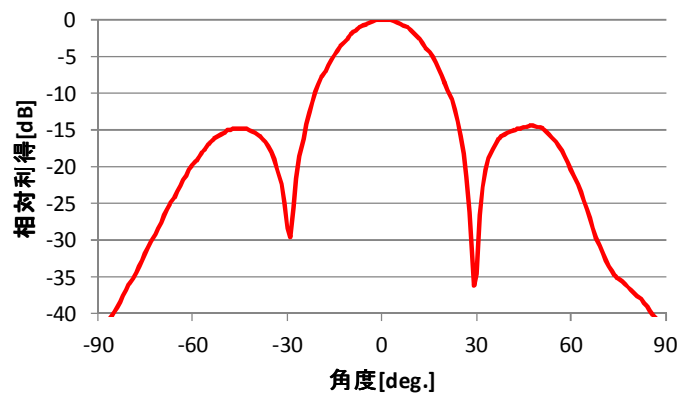


図 5.1.2-11 4×4 素子アレイアンテナ XZ 面放射パターン (主偏波/79GHz)

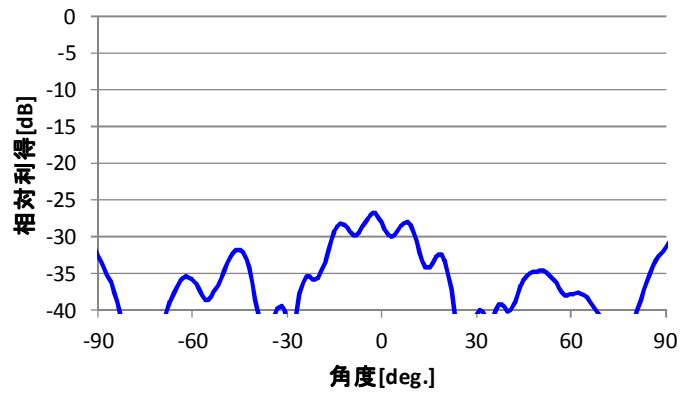


図 5.1.2-12 4×4 素子アレイアンテナ XZ 面放射パターン (交差偏波/79GHz)

図 5.1.2-13 には、送信に用いる 8×4 素子アレイアンテナのアンテナ面を図示しており、表 5.1.2-4 にそのアンテナ性能に関するシミュレーション結果を示す。また、図 5.1.2-14 から図 5.1.2-17 に、8×4 素子アレイアンテナの YZ 面、および XZ 面のアンテナ放射パターンを示す。

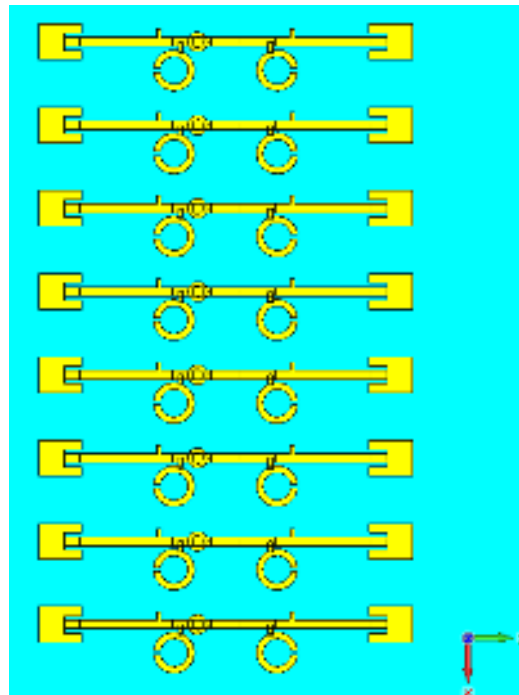


図 5.1.2-13 距離 20m までをカバーする送信用 8×4 素子アレイアンテナ

表 5.1.2-4 送信用 8x4 素子アレイアンテナの性能

	77GHz	79GHz	81GHz
利得[dBi]	18.5	18.8	18.7
YZ面半値角[deg.]	21.4	21.3	20.8
YZ面SLL [dB]	-14.5	-14.6	-15.2
XZ面半値角[deg.]	12.9	12.6	12.3
交差偏波比[dB]	31.8	25.3	24.4
放射効率[dB]	-1.7	-1.7	-1.9

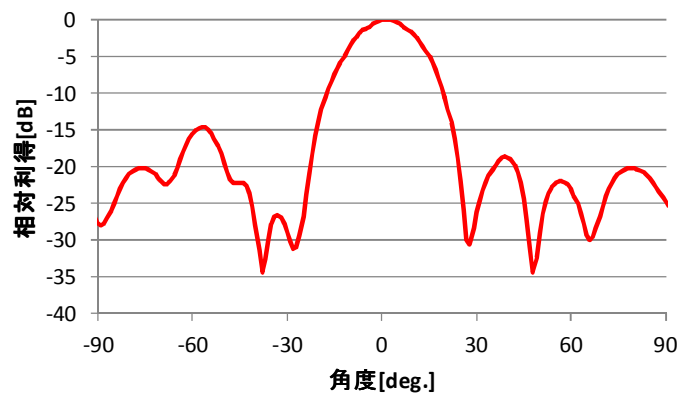


図 5.1.2-14 8×4 素子アレイアンテナ YZ 面放射パターン (主偏波/79GHz)

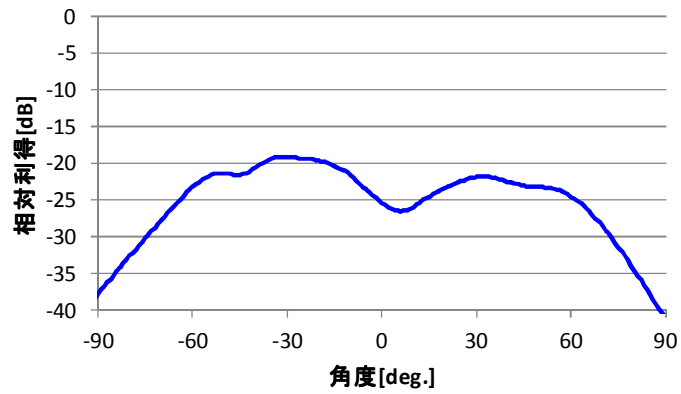


図 5.1.2-15 8×4 素子アレイアンテナ YZ 面放射パターン (交差偏波/79GHz)

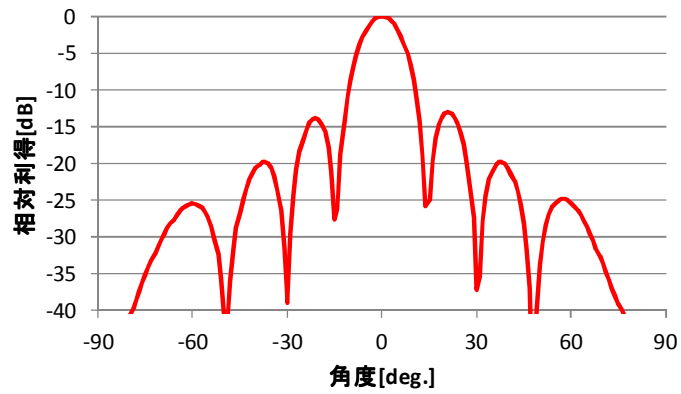


図 5.1.2-16 8×4 素子アレイアンテナ XZ 面放射パターン (主偏波/79GHz)

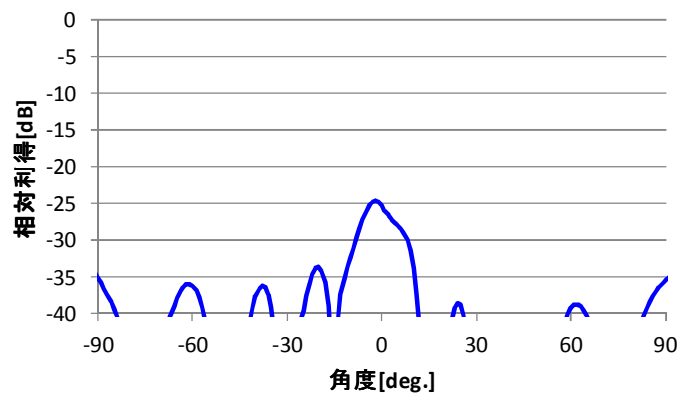


図 5.1.2-17 8×4 素子アレイアンテナ XZ 面放射パターン (交差偏波/79GHz)

まずは、送信 8×4 素子アレイアンテナおよび受信 4×4 素子アレイアンテナを、地上高さ 5m に設置した場合を想定した。ここでは、歩行者相当の RCS (Radar Cross Section (レーダー断面積)) を検出ターゲットとした場合について、レーダー受信信号処理を含む SNR を算出した結果が、図 5.1.2-18 における赤線で示したプロットとなる。ここで、このレーダーモジュールは、俯角 23.5 度で設置した条件である。図で示すように、レーダーモジュールを設置した位置からの伝搬距離 5m~20m において、前述した回線設計におけるリンクマージの目標として定めた SNR > 10dB を満たしていることが確認できる。

また、図の青線で示したプロットは、送信 8×12 素子アレイアンテナ、受信 4×12 素子アレイアンテナのレーダーモジュールを使用した場合を示しており、距離 20m~40m の範囲に対して所望の SNR が確保できている。ここで、このレーダーモジュールは、俯角 8 度で設置した条件である。

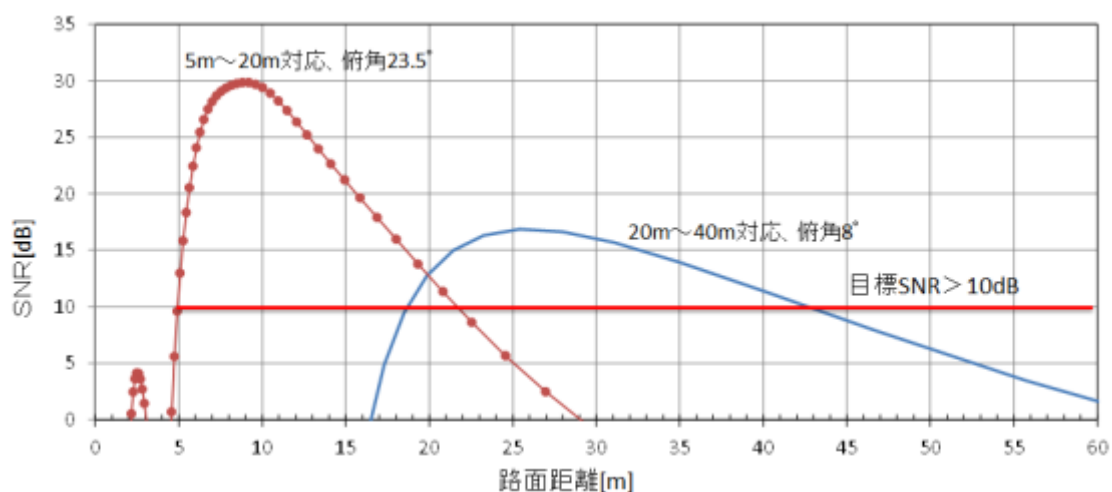


図 5.1.2-18 5m高設置時に歩行者をターゲットした SNR の算出結果

<79GHz 帯パルスレーダー装置の構成>

ここでは、インフラレーダーの実証実験に向けて試作した 79GHz 帯パルスレーダー装置について、主にそのハードウェア構成を説明する。本レーダー装置は、前述した設計による平面アレイアンテナを用いたレーダーモジュール、および同じく前述したブロック構成のレーダー受信信号処理を実装したベースバンド部より構成されている。

レーダーモジュールの構成

はじめに、レーダーモジュールの仕様を以下に示す。

レーダーモジュールは以下の RF 基板と電源基板（1，2）、ケーブル（3、4、5）および筐体（6）から構成されおり、その全体構成を図 5.1.2-19 に示す。

1. RF 基板
2. 電源および制御中継基板
3. 基板間ケーブル
4. 電源ケーブル
5. 信号ケーブル
6. 筐体

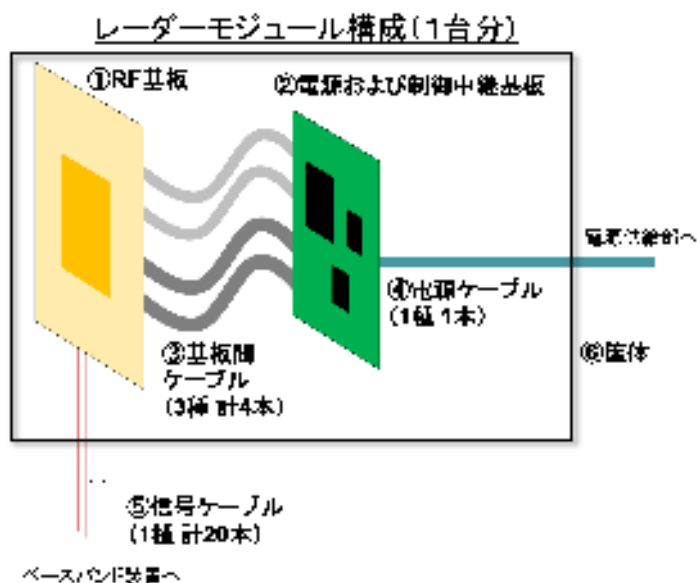


図 5.1.2-19 レーダーモジュール 構成図

図 5.1.2-20 と図 5.1.2-22 にレーダーモジュールを構成する部品のうち、電源および制御中継基板と筐体を示す。

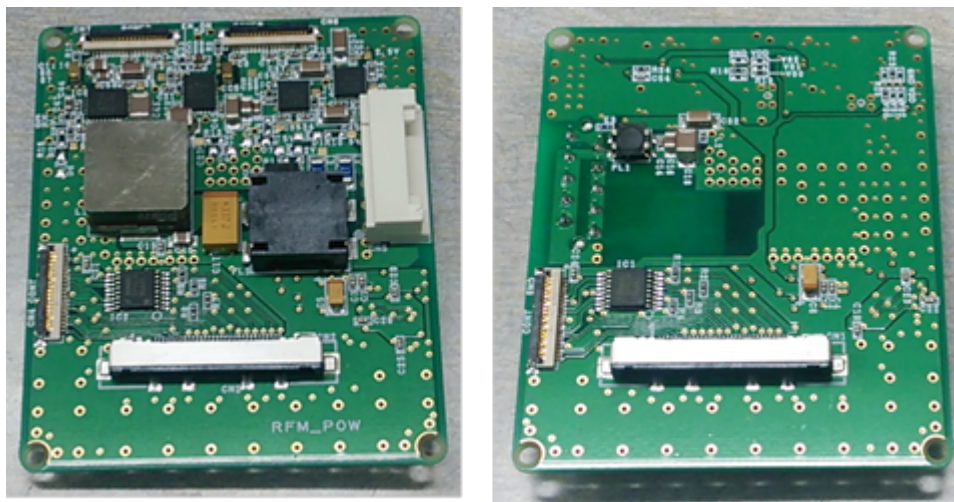


図 5.1.2-20 電源および制御中継基板外観図 (左：表面、右：裏面)

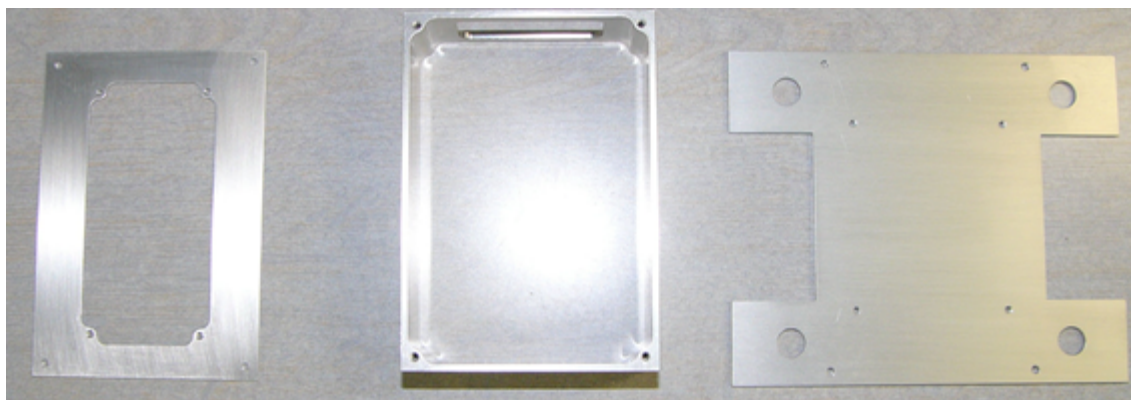


図 5.1.2-22 レーダーモジュール筐体外観 (分解状態)

また、図 5.1.2-23 に筐体内部に RF 基板等、ケーブル等を格納した状態のレーダーモジュール外観を示す。



図 5.1.2-23 RF 基板等を格納した状態のレーダーモジュール外観

次に、上記レーダーモジュールを構成する 79GHz 帯ミリ波の RF 基板について詳細に説明する。

図 5.1.2-24 にレーダーモジュールの送信系ブロック図を示す。フェーズドアレイアンテナ回路の小型化を主眼として、ダイレクトコンバージョン構成 (DCR) を採用している。本システムでは、精度の良いビームを形成することが求められており、解像度の高い位相制御が必要となる。位相を細かく制御可能にするため、ベースバンド信号の移相制御を基本構成としている。

また、図 5.1.2-25 にレーダーモジュールの受信系ブロック図を示す。高分解能特性を得るために受信側でアダプティブアレイアンテナ処理を行う。そのため、RF フロントエンドの受信系アーキテクチャは、マルチアレイアンテナに対応したデジタルビームフォーマのアーキテクチャを基本としている。各アレイアンテナに接続するブランチにはダイレクトコンバージョン方式を用いている。これは RF 信号をベースバンド信号に直接変換するものであり、中間周波数 IF 段の回路を不要としてアレイ化した RF フロントエンド全体のチップ面積の小型化や低消費電力化に有効な構成である。

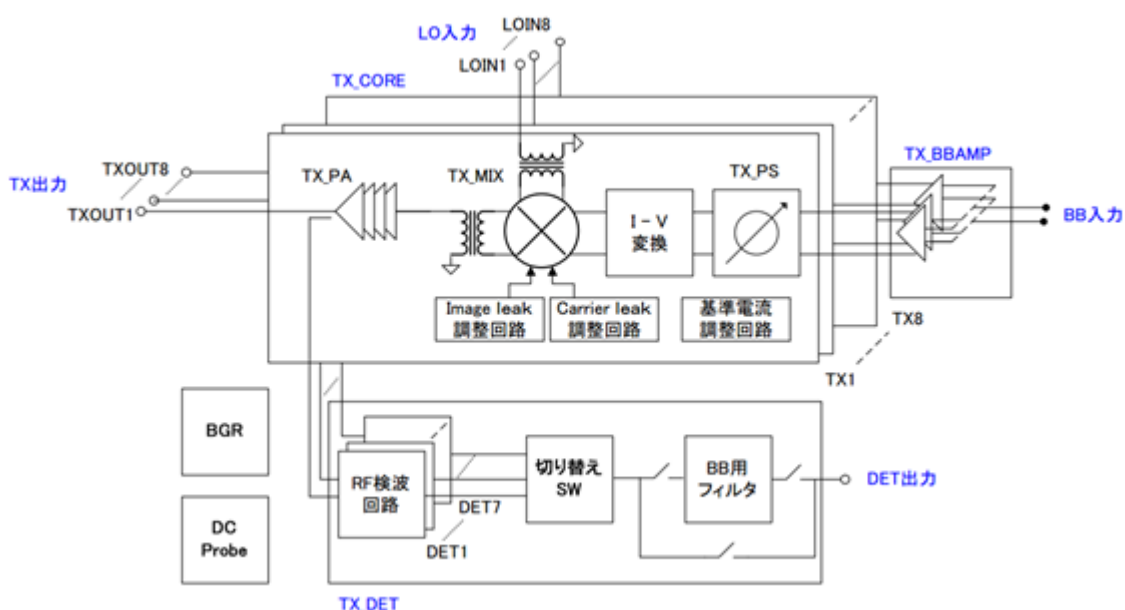


図 5.1.2-24 レーダーモジュール 送信系ブロック図

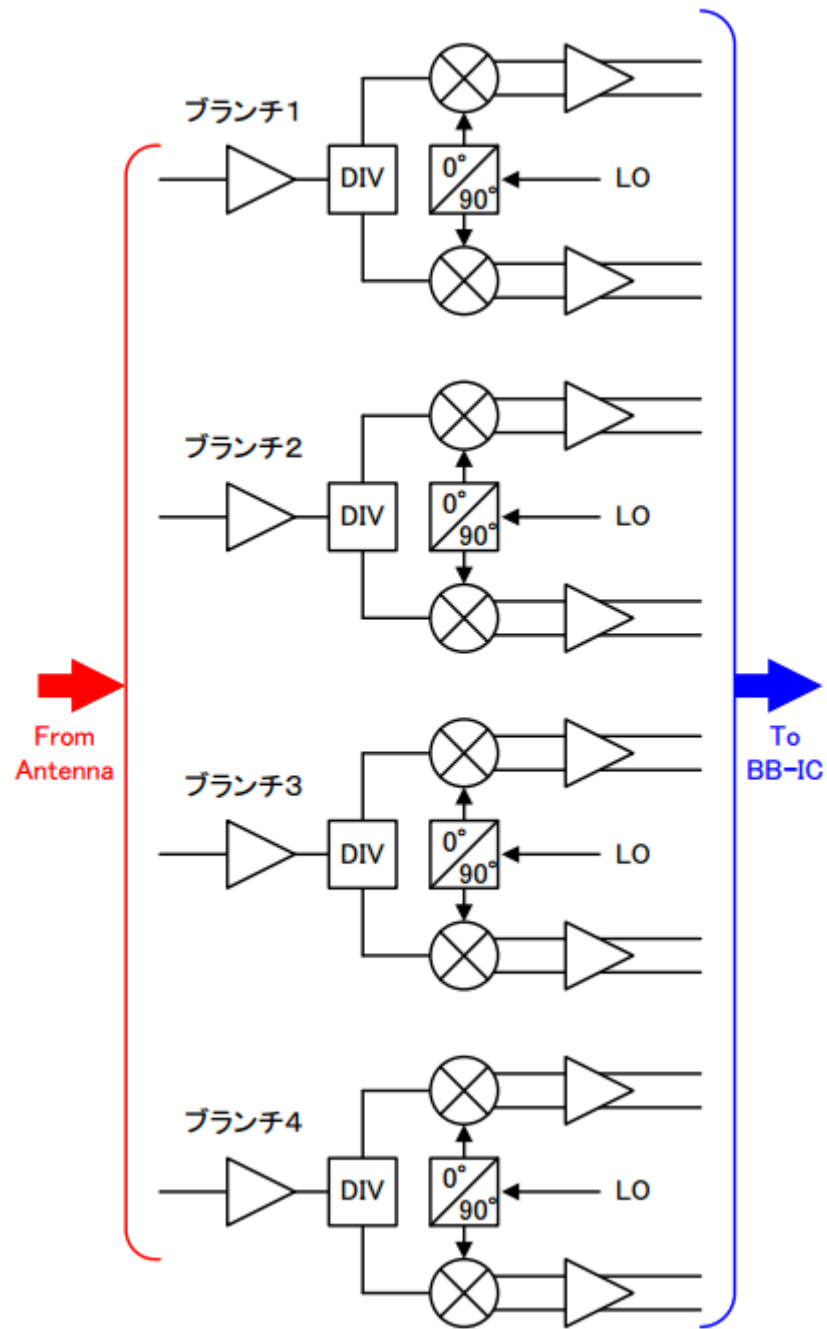


図 5.1.2-25 レーダーモジュール 受信系ブロック図

以下における図 5.1.2-26 および図 5.1.2-27 には、試作した 79GHz 帯ミリ波の RF 基板について、その外観を示している。図 5.1.2-26 は、RF 基板の外観図のうち、20m～40m 用平面アレイアンテナの放射面である送信用 8×12 素子アレイアンテナと受信用 4×12 素子アレイアンテナを示している。同様に、図 5.1.2-27 は、5m～20m 用平面アレイアンテナの放射面である送信用 8×4 素子アレイアンテナと受信用 4×4 素子アレイアンテナを示している。



図 5.1.2-26 RF 基板外観 (20m～40m 用平面アレイアンテナの放射面)



図 5.1.2-27 RF 基板外観 (5m~20m 用平面アレイアンテナの放射面)

ベースバンド部の構成

ベースバンド部は、下記の 7 種類の基板、および基板を搭載するための筐体とベースバンド制御 PC から構成されており、その全体構成を図 5.1.2-29 に示す。

1. ベースバンド基板
2. 高速 Optical I/F 基板
3. DETADC 基板
4. VGA 基板
5. PLL 基板
6. RF 電源供給基板
7. 中継基板
8. 筐体
9. ベースバンド制御 PC (ベースバンド制御 I/F 付属)

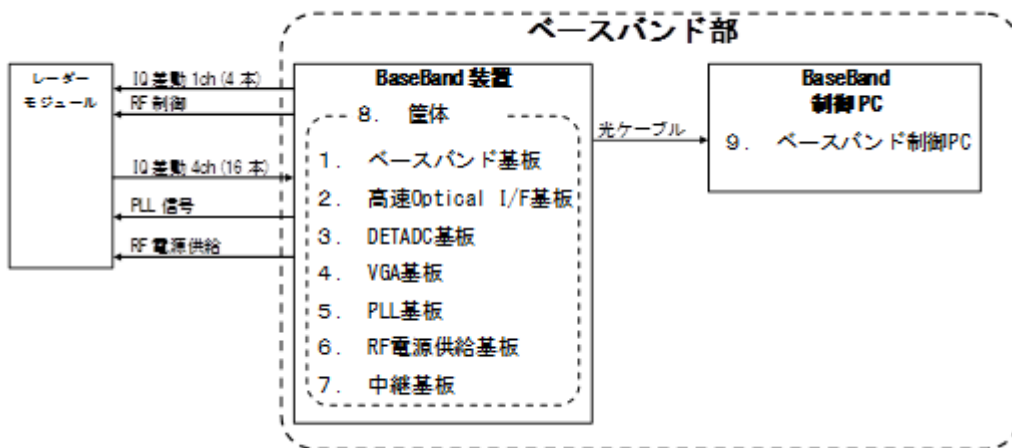


図 5.1.2-29 ベースバンド部 概要図

図 5.1.2-30 にベースバンド部の全体ブロック図を示す。

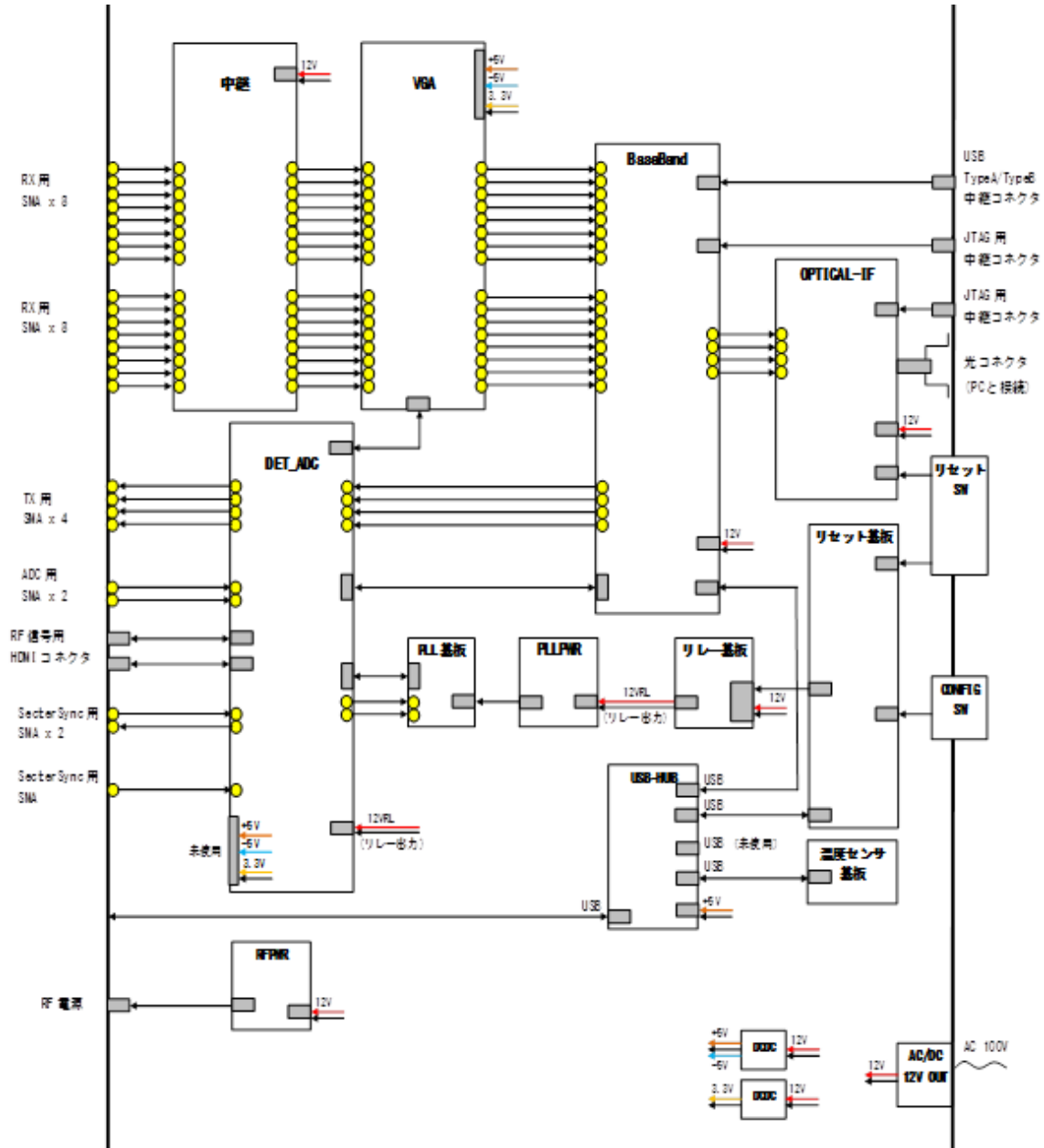


図 5.1.2-30 ベースバンド部 全体ブロック図

ベースバンド部筐体：

図 5.1.2-31 と図 5.1.2-32 にベースバンド部筐体の外観を示す。



図 5.1.2-31 ベースバンド部 筐体外観 (コネクタ面)

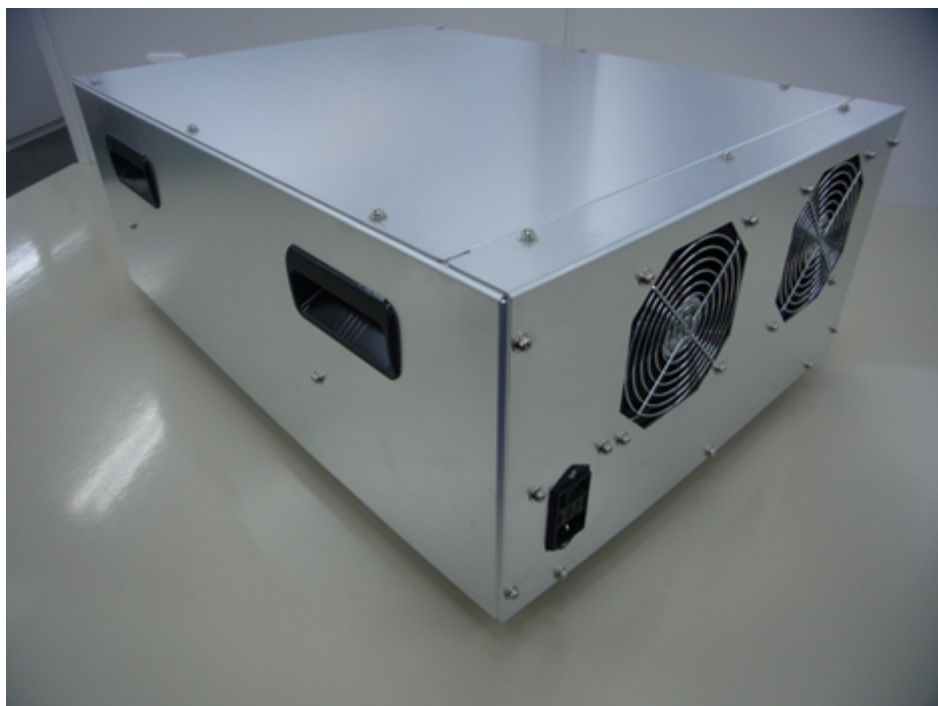


図 5.1.2-32 ベースバンド部 筐体外観 (ファン取付面)

次に、ベースバンド部の筐体内部に搭載する基板の一覧を表 5.1.2-5 に示す。また、各搭載基板の搭載概要を図 5.1.2-33 に示す。

表 5.1.2-5 ベースバンド部 筐体内部に搭載する基板一覧

PIN	基板名称	概要	配置
1	ベースバンド基板	AD、DA を搭載したメインの基板	上段背面側
2	高速 Optical-IF 基板	光のインターフェースを備えたデータ転送基板	下段正面側
3	DETADC 基板	DA 用データのバッファ基板と RF 信号出力をする基板	上段正面側
4	VGA 基板	AD 用データのバッファ基板	上段正面側
5	PLL 基板	リファレンスクロックを生成する基板	上段正面側
6	RF 電源供給基板	PLL 基板へ電源を供給する為の PLL_PWR 基板 RF 部へ電源供給する為の RF_PWR 基板	下段正面側
7	中継基板	データ入力を中継する基板	上段正面側
8	リレー基板	電源投入を制御する基板	下段背面側
9	リセット基板	搭載基板にリセット信号を与える基板	下段背面側
10	温度測定基板	温度を測定する基板	下段背面側

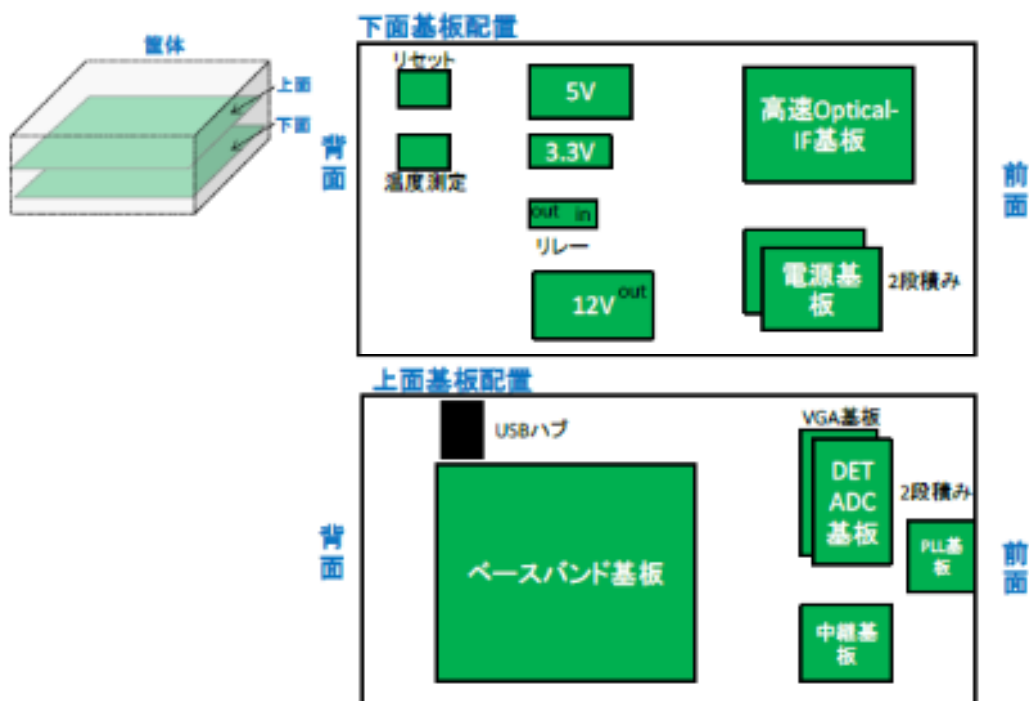


図 5.1.2-33 ベースバンド部 筐体内基板配置概要

ベースバンド基板：

ベースバンド基板は、送信信号形成処理、受信信号処理などを実施する、AD コンバータ、DA コンバータを搭載したベースバンド部メインの基板である。図 5.1.2-34 にベースバンド基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-35、図 5.1.2-36 にベースバンド基板の外観を示す。

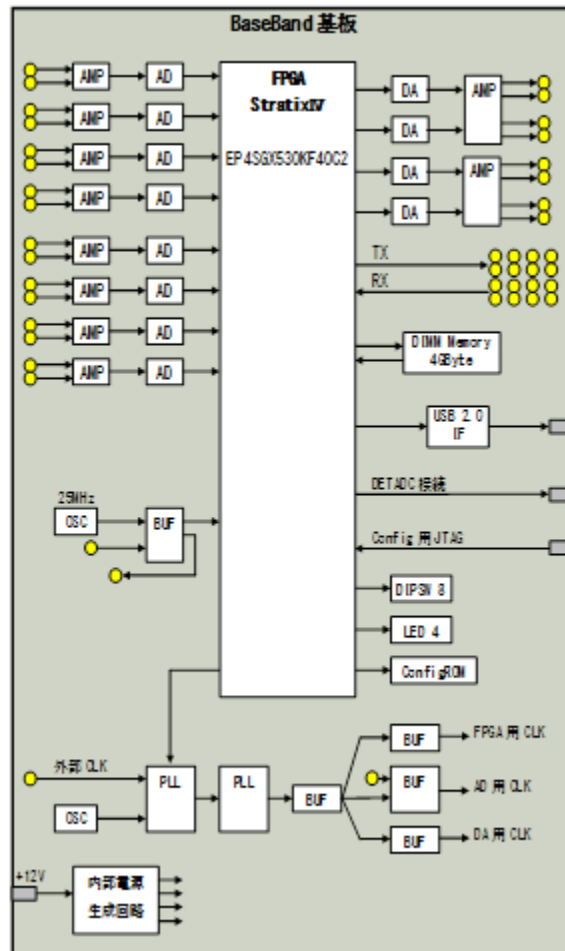


図 5.1.2-34 ベースバンド部 ベースバンド基板ブロック図

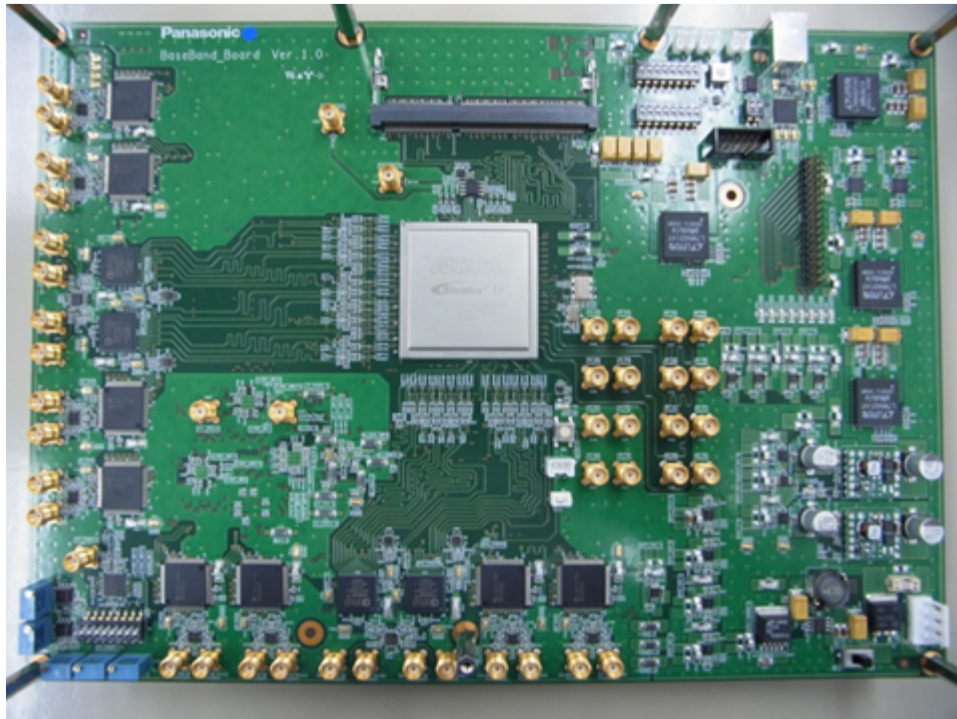


図 5.1.2-35 ベースバンド部 ベースバンド基板外観（表面）

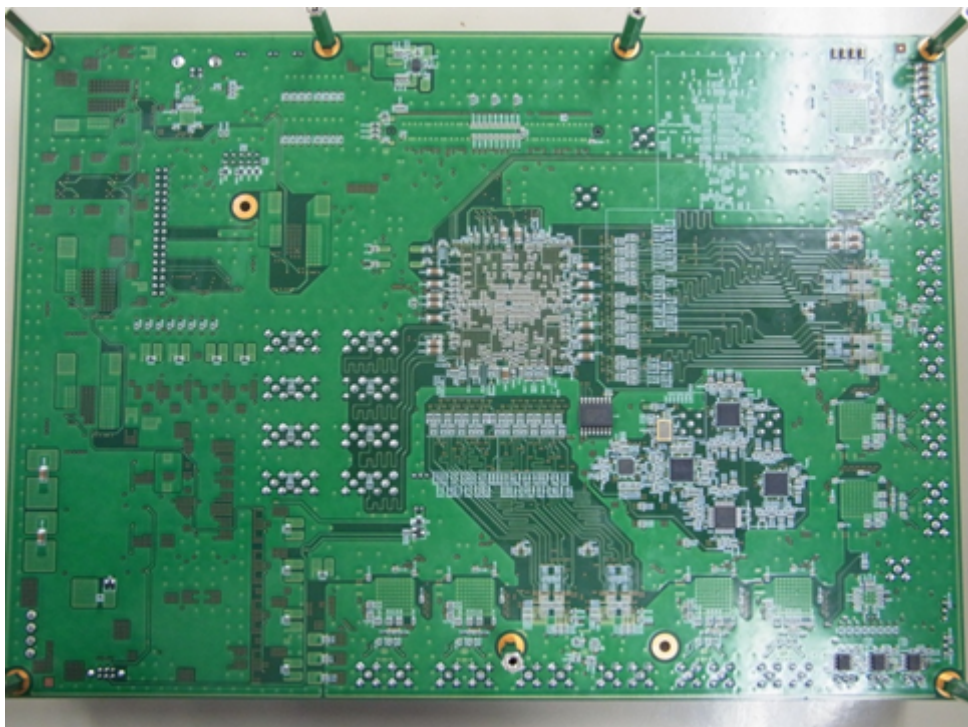


図 5.1.2-36 ベースバンド部 ベースバンド基板外観（裏面）

高速 OPTICAL-IF 基板 :

ベースバンド部の高速 OPTICAL IF 基板について説明する。高速 OPTICAL IF 基板は、光のインターフェースを備えたデータ転送基板であり、8.5Gbps の通信速度を実現し、ベースバンド部制御 PC 間との高速通信を行う。図 5.1.2-37 に高速 OPTICAL IF 基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-38 と図 5.1.2-39 にベースバンド部高速 OPTICAL IF 基板の外観を示す。

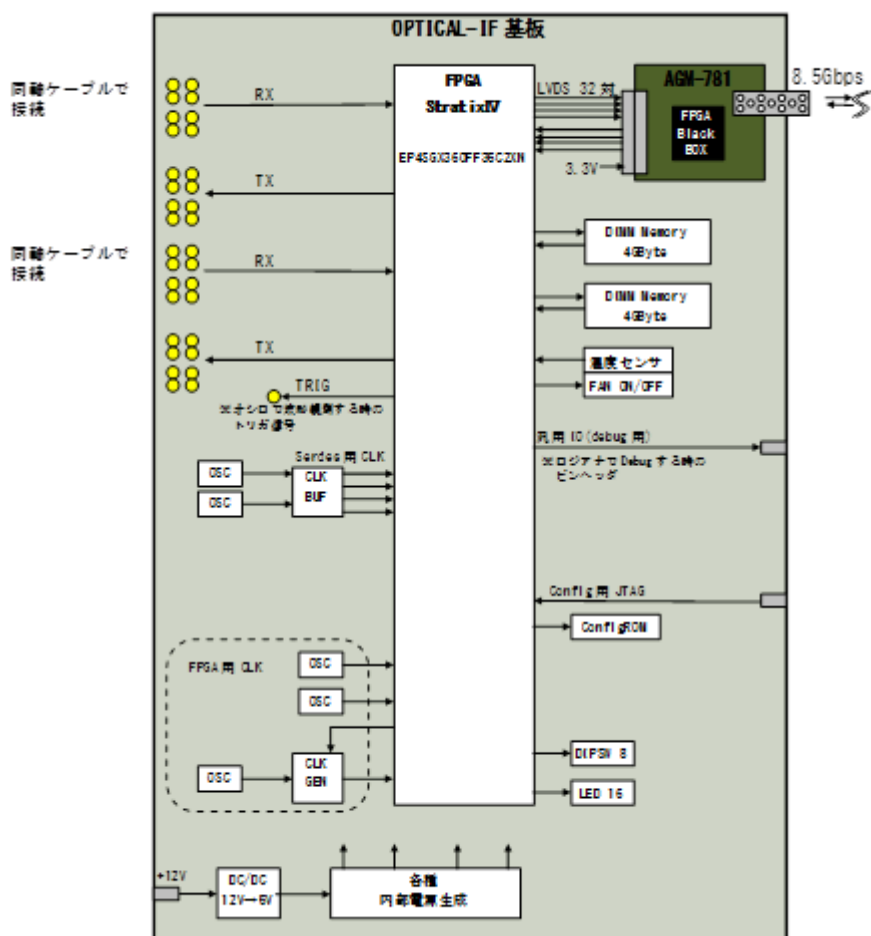


図 5.1.2-37 ベースバンド部 高速 OPTICAL IF 基板ブロック図

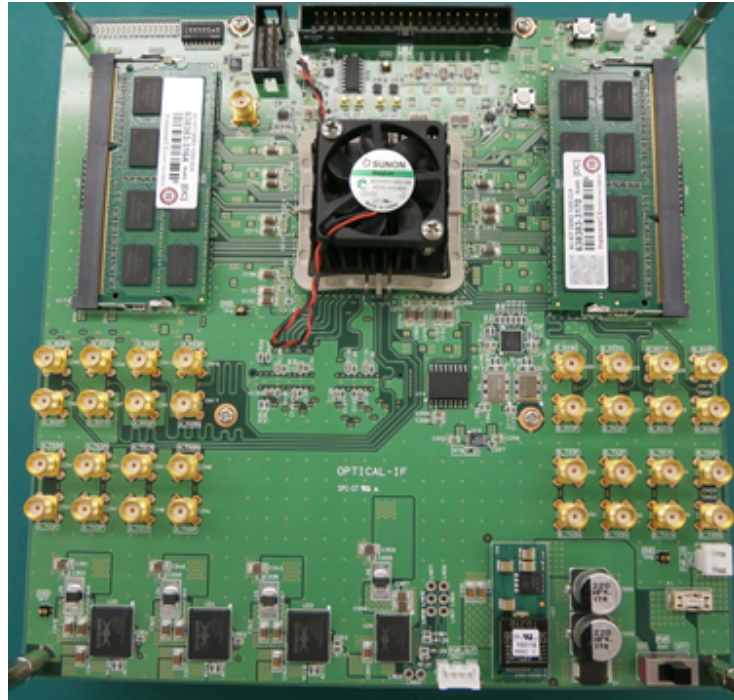


図 5.1.2-38 ベースバンド部 高速 OPTICAL IF 基板外観 (表面)

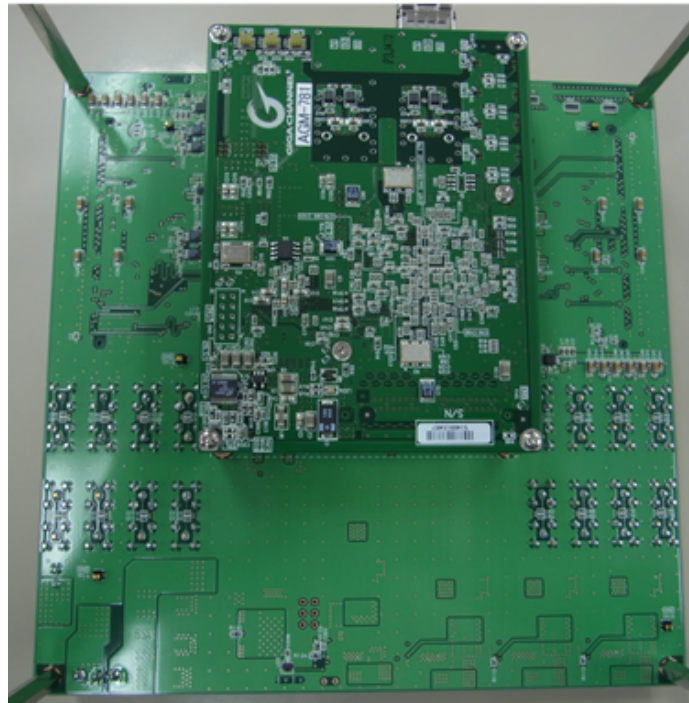


図 5.1.2-39 ベースバンド部 高速 OPTICAL IF 基板外観 (裏面)

DETADC 基板：

ベースバンド部の DETADC 基板について説明する。DETADC 基板は DA 用のデータバッファ基板と RF 信号出力を行う基板である。図 5.1.2-40 に DETADC 基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-41 と図 5.1.2-42 にベースバンド部 DETADC 基板の外観を示す。

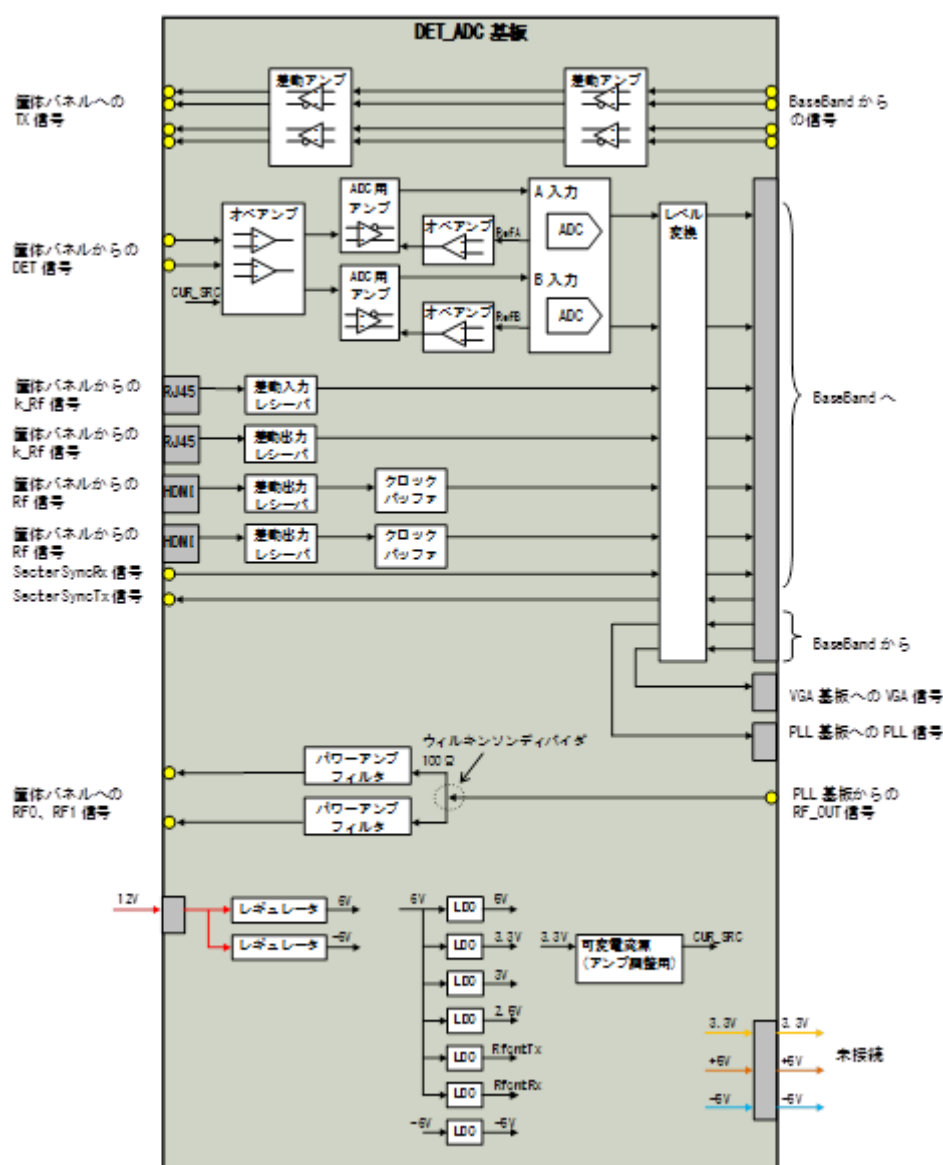


図 5.1.2-40 ベースバンド部 DETADC 基板ブロック図

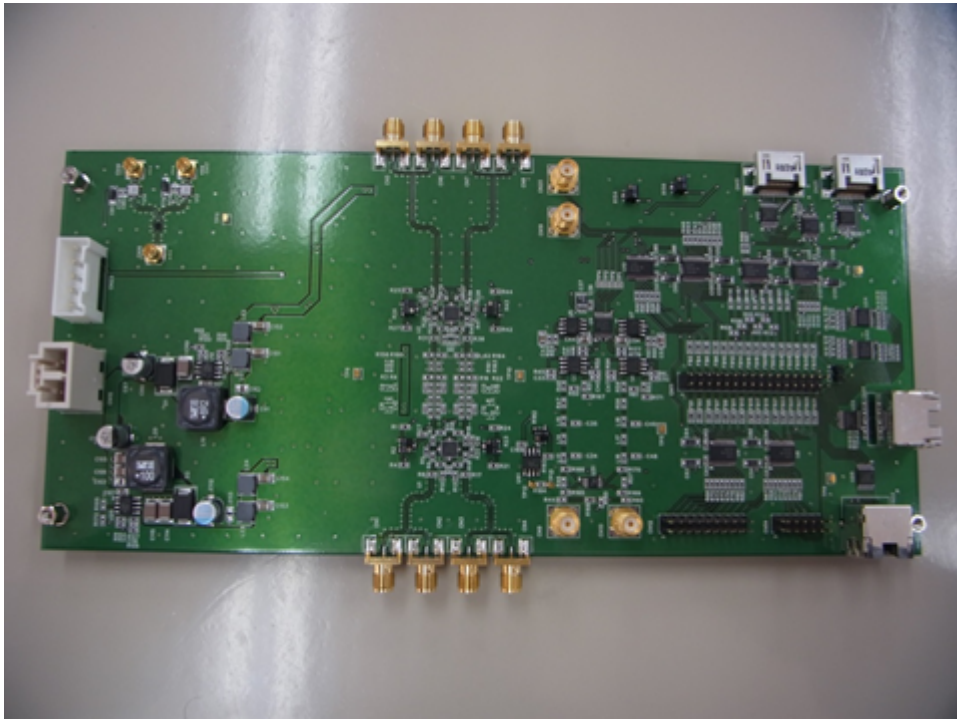


図 5.1.2-41 ベースバンド部 DETADC 基板外観 (表面)

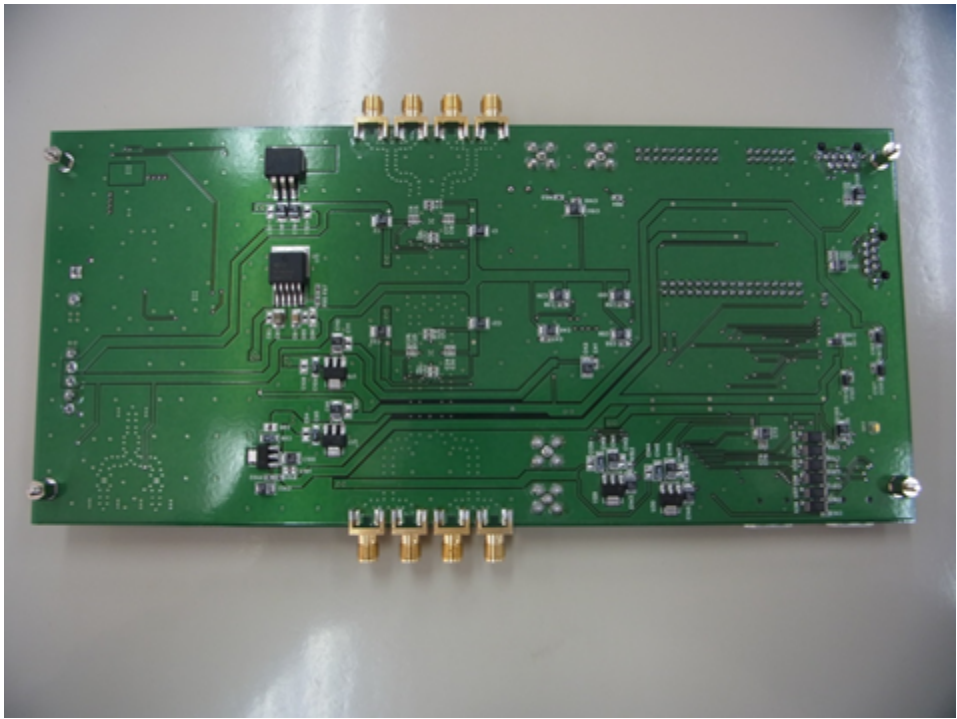


図 5.1.2-42 ベースバンド部 DETADC 基板外観 (裏面)

VGA 基板 :

ベースバンド部の VGA 基板について説明する。ベースバンド部 VGA 基板は、AD 用データのバッファ機能を有する基板である。図 5.1.2-43 に VGA 基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-44 および図 5.1.2-45 にベースバンド部 VGA 基板の外観を示す。

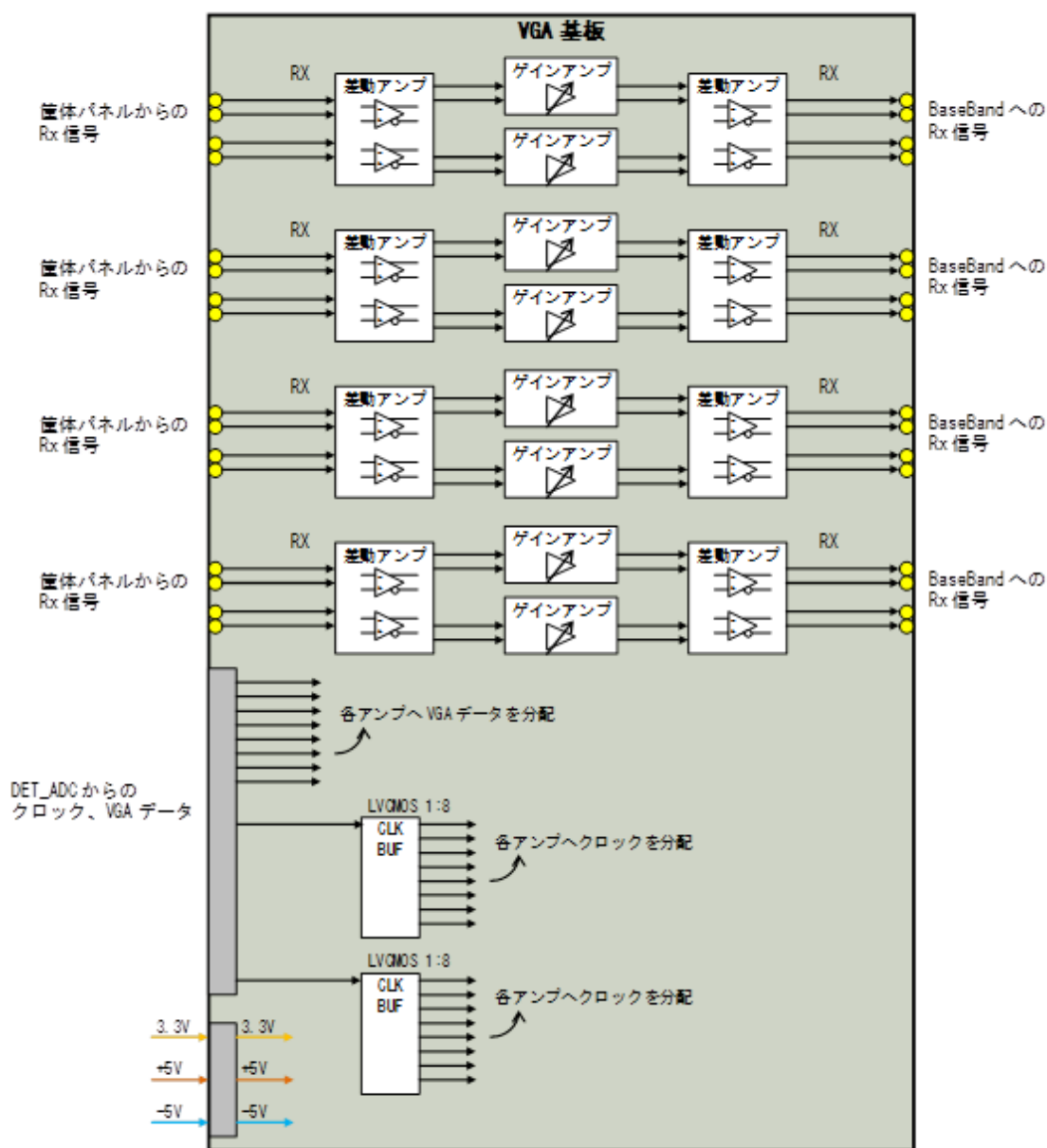


図 5.1.2-43 ベースバンド部 VGA 基板ブロック図

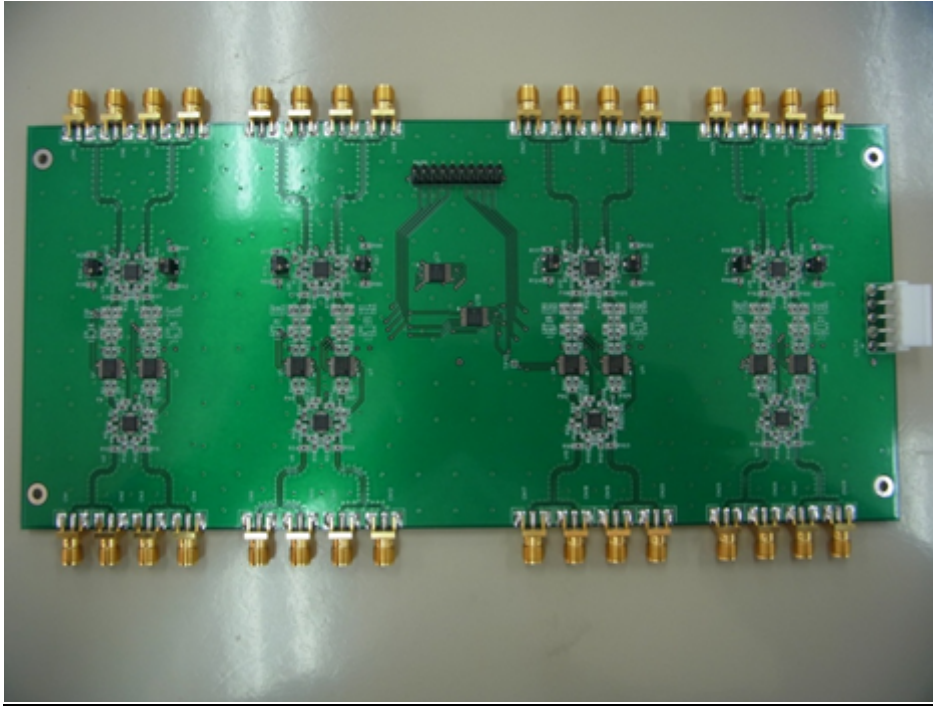


図 5.1.2-44 ベースバンド部 VGA 基板外観 (表面)

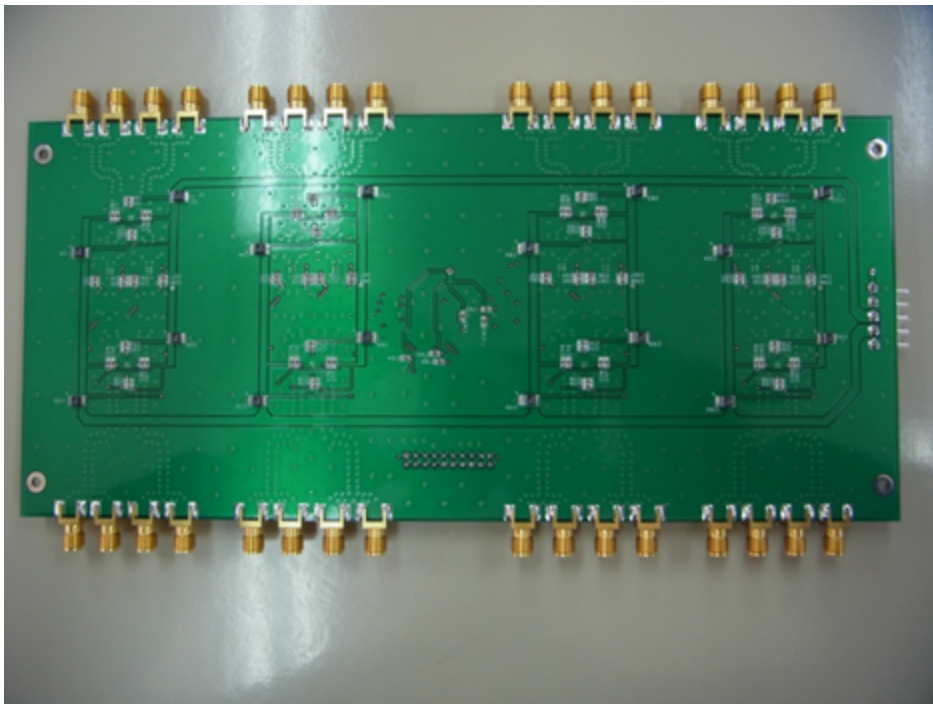


図 5.1.2-45 ベースバンド部 VGA 基板外観 (裏面)

PLL 基板：

ベースバンド部の PLL 基板について説明する。PLL 基板は、リファレンスクロックを生成するための基板である。図 5.1.2-46 と図 5.1.2-47 にベースバンド部 PLL 基板の外観を示す。

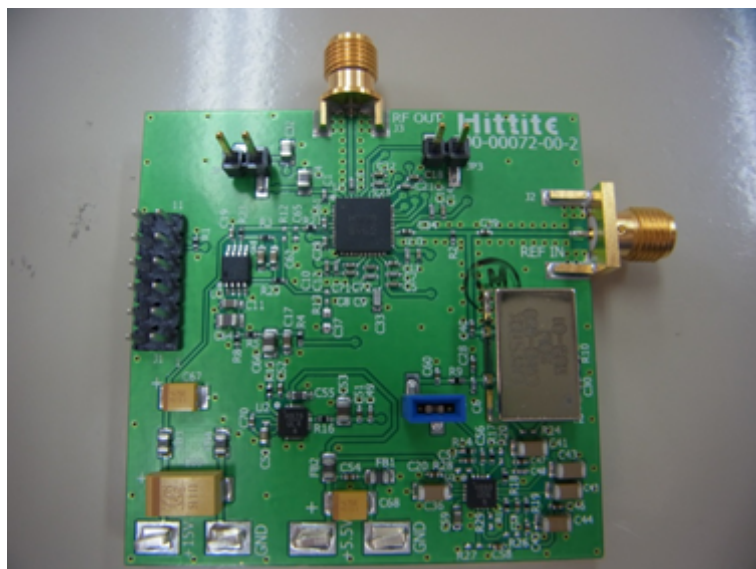


図 5.1.2-46 ベースバンド部 PLL 基板外観 (表面)

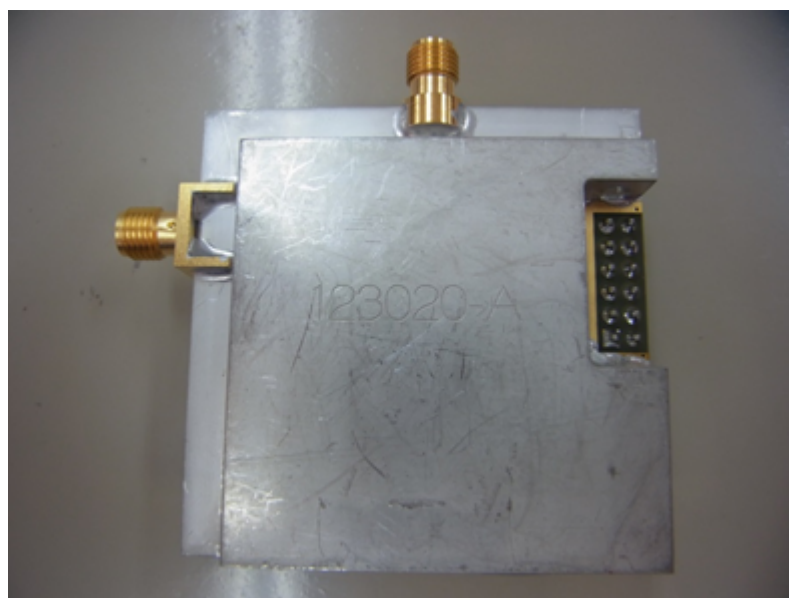


図 5.1.2-47 ベースバンド部 PLL 基板外観 (裏面)

RF 電源供給基板：

ベースバンド部の RF 電源供給基板について説明する。RF 電源供給基板は、RF 基板、および PLL 基板へ電源を供給するための DC/DC コンバータを搭載した基板である。図 5.1.2-48 にベースバンド部 RF 電源供給基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-49 から図 5.1.2-52 にベースバンド部 RF 電源供給基板の外観を示す。

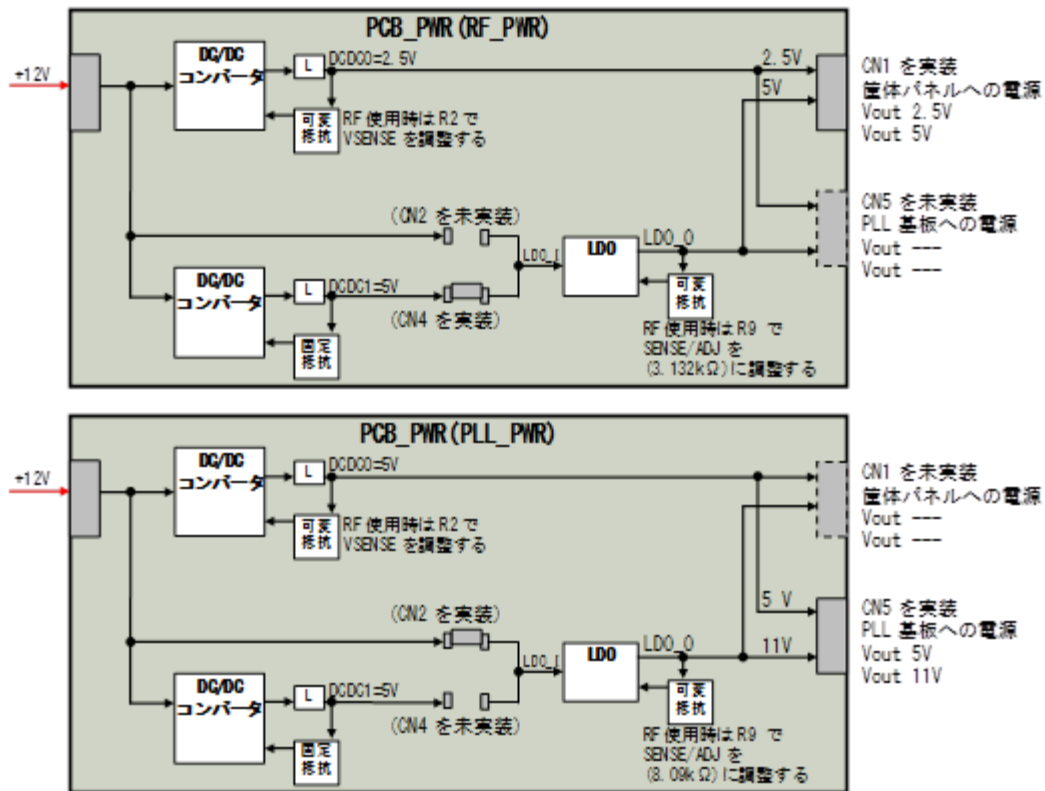


図 5.1.2-48 ベースバンド部 RF 電源供給基板ブロック図

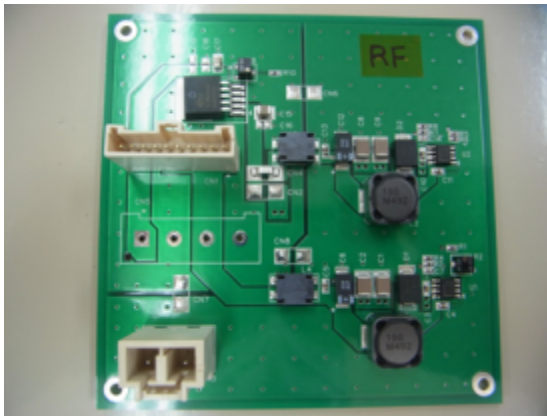


図 5.1.2-49 RF 電源基板外観 (表面)

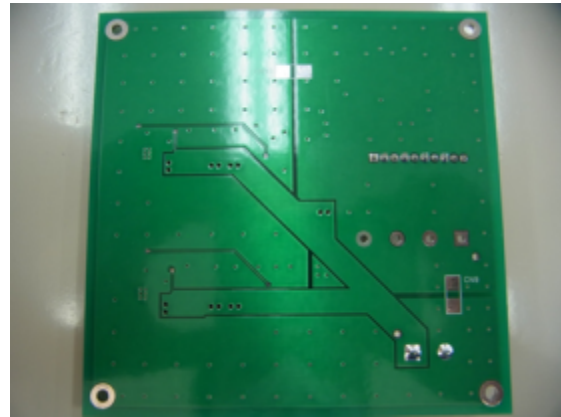


図 5.1.2-50 RF 電源基板外観 (裏面)

(PLL 用)

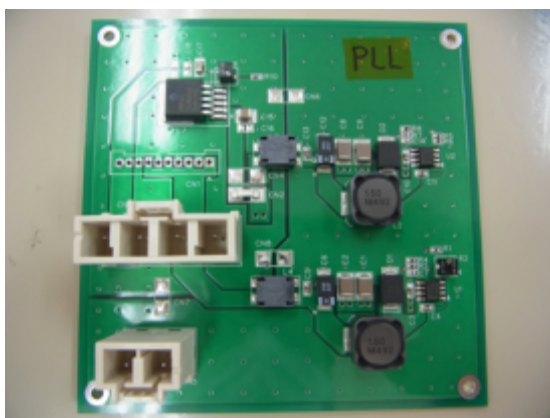


図 5.1.2-51 RF 電源基板外観 (表面)

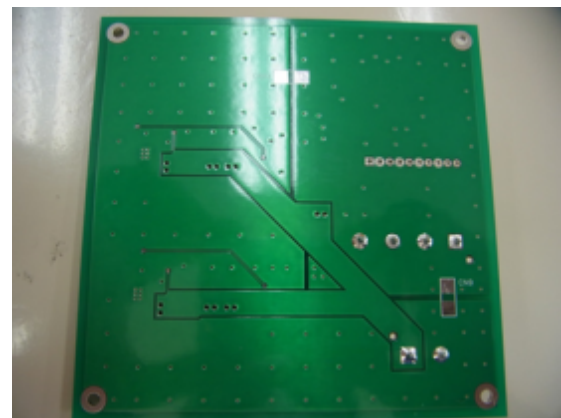


図 5.1.2-52 RF 電源基板外観 (裏面)

中継基板：

ベースバンド部の中継基板について説明する。ベースバンド部 中継基板はデータ入力を中継するための基板である。図 5.1.2-53 に中継基板のブロック図を示す。また、図 5.1.2-54 と図 5.1.2-55 にベースバンド部中継基板の外観を示す。

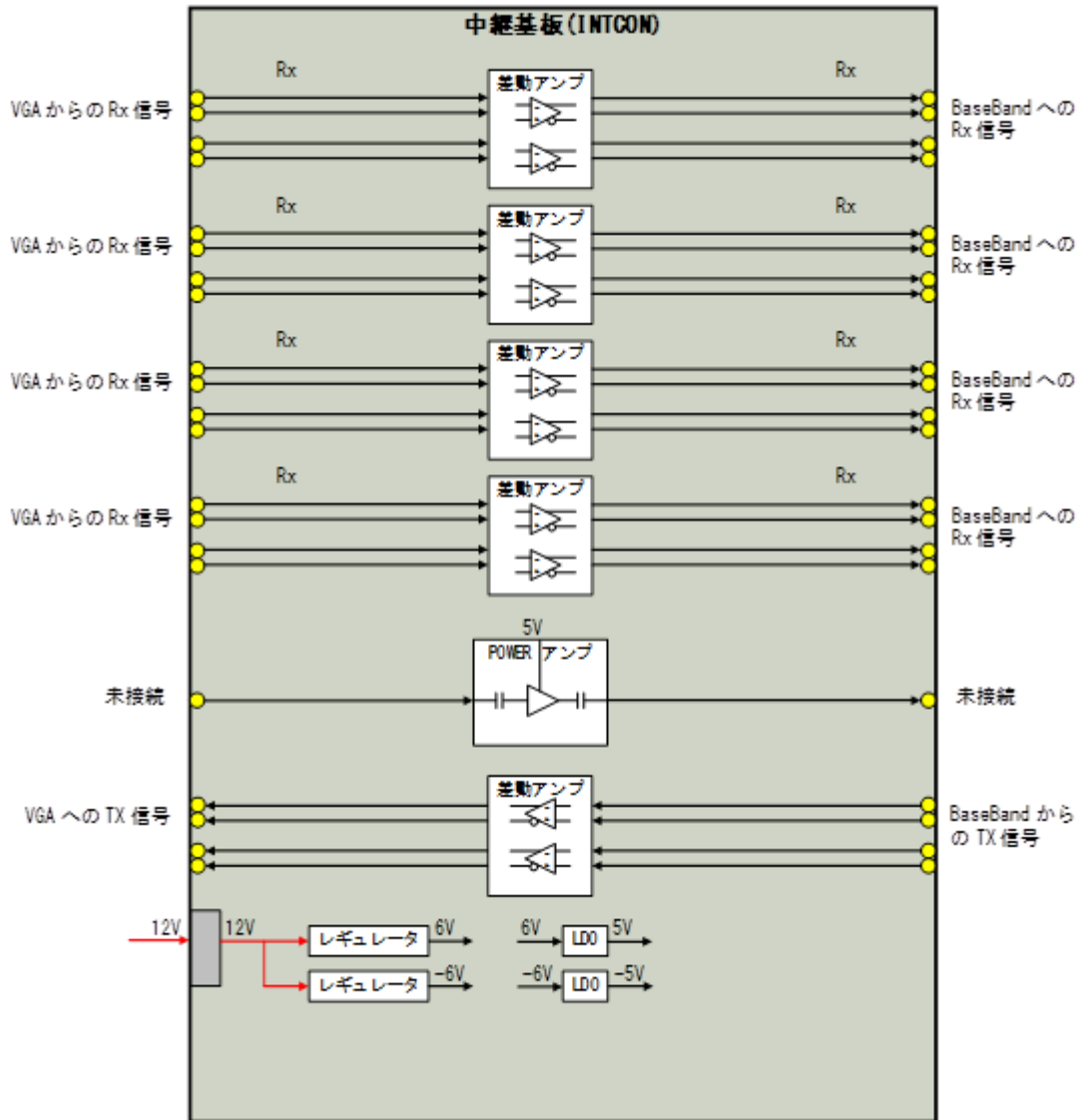


図 5.1.2-53 ベースバンド部 中継基板ブロック図

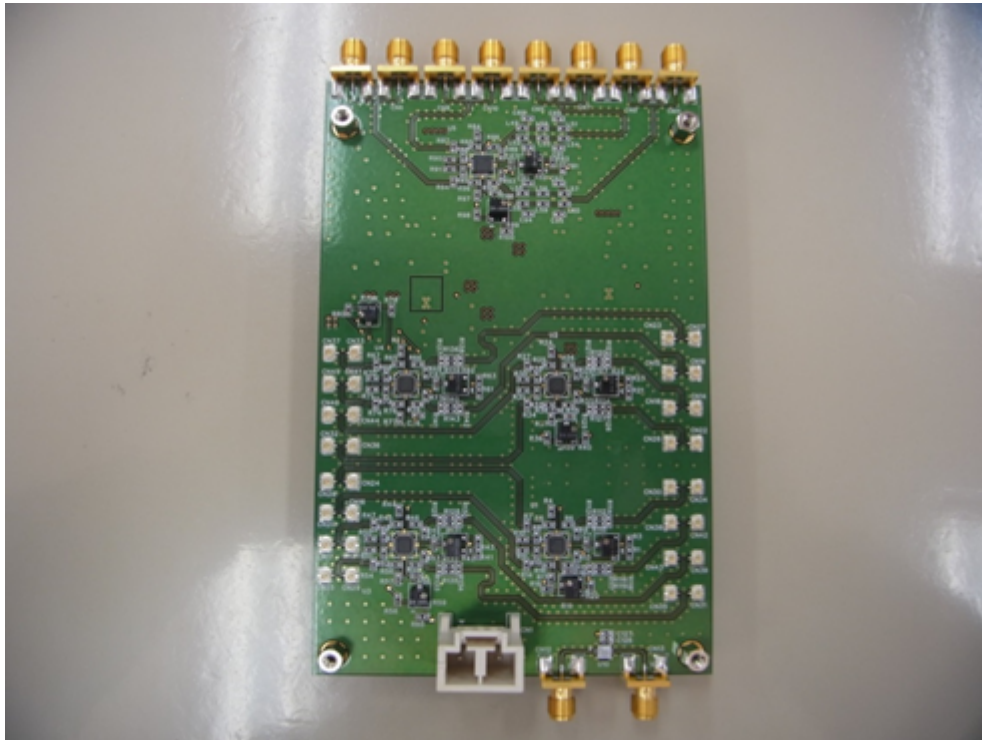


図 5.1.2-54 ベースバンド部 中継基板外観 (表面)

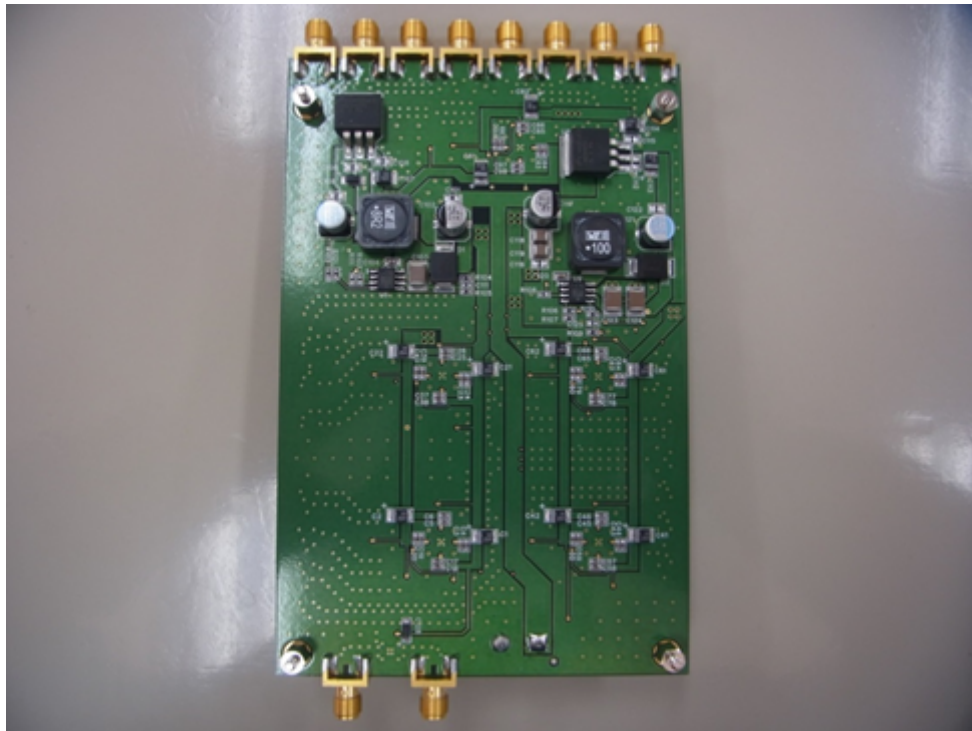


図 5.1.2-55 ベースバンド部 中継基板外観 (裏面)

ベースバンド制御 PC :

ベースバンド部のベースバンド制御 PC について説明する。ベースバンド部 ベースバンド制御 PC は、本ベースバンド装置を制御するために必要な光インターフェース装置を備えてベースバンド装置制御専用カスタマイズした PC である。表 5.1.2-6 にベースバンド制御 PC の仕様を示す。

表 5.1.2-6 ベースバンド部 ベースバンド制御 PC の仕様一覧

No	項目	概要
1	OS	Windows7 Professional 64bit 版 SP1
2	Office	なし
3	セキュリティソフト	カスペルスキー2015
4	CPU	Intel Core i7-5820K (6コア/HT 対応/3.3GHz/15MB Intel Smart Cache)
5	CPU クーラー	Intel 製 標準 CPU クーラー
6	MotherBoard	Intel X99 Express チップセット ASUS 社製 X99-S PCI-Express 2.0 Gen2 に準拠
7	メモリ	Crucial 製 DDR4_SDRAM PC4-17000
8	グラフィック	NVIDIA GeForce GTX970 / 4GB CUDA 対応
9	HDD(C ドライブ)	1TB SATA6Gbps 対応 東芝社製 DT01ABA100V
10	SSD(D ドライブ)	サムスン社製 MZ-7KE256B/IT
11	光学ドライブ	DL 対応 DVD スーパーマルチ
12	PC ケース	ATX ミドルタワーブラック
13	電源ユニット	80PLUS GOLD 認証 CORSAIR 製 CS750M CP-9020078-LP 750W
14	入力機器	標準日本語キーボード、光学式ホイールマウス
15	光インターフェース	AVALDATA 社製 APX-781

(3) インフラレーダー技術の実証実験概要

日程：平成27年3月2日（月）～6日（金）

場所：日本自動車研究所（JARI）の模擬市街路西コース（つくば市）

※3月4日は同所にて第2回研究開発運営委員会を開催

実験の概要：

交差点環境を中心に、インフラレーダーの設置高さや俯角または車両の種別や歩行者との位置関係を変えながら、79GHz帯レーダーの検出性能に関して、伝搬実験による定量評価を実施した。

図 5.1.2-56 には、上記の概要にて平成 27 年 3 月につくば市のテストコースで行った実証実験について、主な実験機材等を示している。

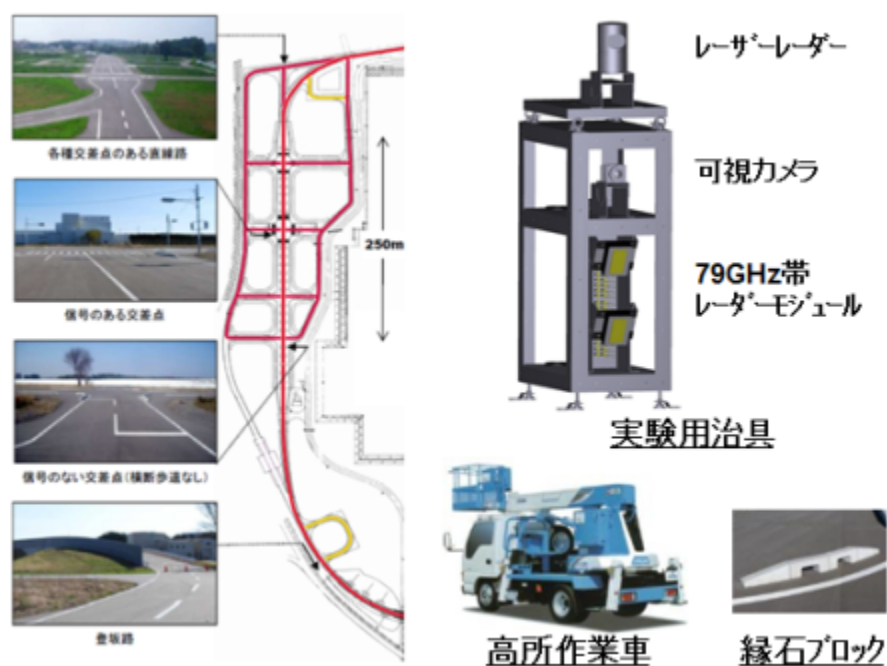


図 5.1.2-56 JARI の模擬市街路（西コース）および使用した主な実験機材

前述のように図 5.1.2-57 に示す、信号機と同レベルの地上高 5m 程度に設置されることを想定したインフラレーダーとして、歩行者の検出に必要な感度特性と維持しつつ垂直面の広視野角化を実現している。前述したように、アンテナの垂直面視野角と指向性利得が異なる 2つのレーダーモジュール LR (Long range Radar) および SR (Short range Radar) で構成するアプローチを取っている。

また、図 5.1.2-58 に示すように、インフラレーダー技術の実証実験に向けて、符号化パルスレーダー方式が実装された 79GHz 帯パルスレーダー装置の開発試作を行った上で、平成 27 年 2 月 12 日付で関東総合通信局より実験試験局免許の交付を受けている。

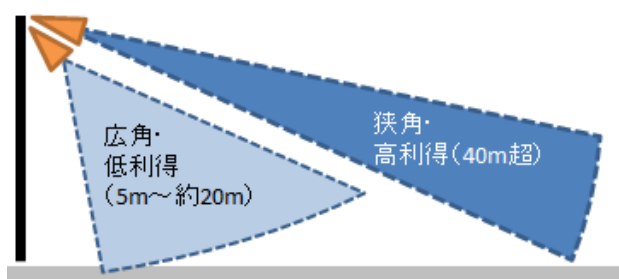


図 5.1.2-57 垂直面の広視野角化アプローチ

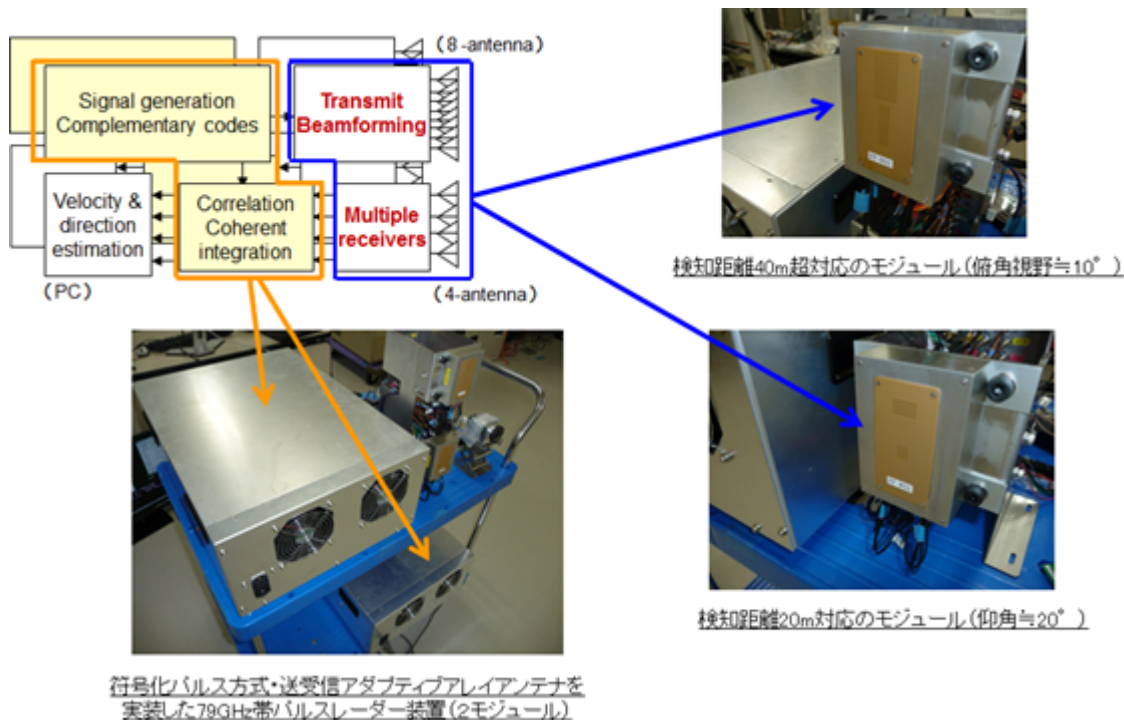


図 5.1.2-58 実験試験局を取得した 79GHz 帯パルスレーダー装置の構成概要

<79GHz 帯パルスレーダー装置の動作検証>

ここでは、開発試作した 79GHz 帯パルスレーダー装置の動作検証として、屋外のテストコース環境における伝搬実験を実施したのでその結果を報告する。79GHz 帯パルスレーダー装置をオープンな屋外環境に設置して、実際に距離 20m の位置にある各種ターゲットからの反射レベルを測定した。

この伝搬実験に使用したターゲットは、次の4種類である。

1. コーナーリフレクタ (図 5.1.2-59 参照)
RCS +20dBsm 仕様の標準リフレクタ
2. 球体リフレクタ (図 5.1.2-60 参照)
RCS -10dBsm 仕様の標準リフレクタ
3. 歩行者ダミー (図 5.1.2-61 参照)
4aEngineering 社製の人体ダミー人形、身長 1800mm
4. 歩行者 (図 5.1.2-62 参照)
作業着を着用、身長約 1700mm



図 5.1.2-59 伝搬実験に使用したターゲット外観 (コーナーリフレクタ)



図 5.1.2-60 伝搬実験に使用したターゲット外観 (球体リフレクタ)



図 5.1.2-61 伝搬実験に使用したターゲット外観 (歩行者ダミー)



図 5.1.2-62 伝搬実験に使用したターゲット外観（歩行者）

表 5.1.2-7 には、この実験環境において取得された実ターゲットからの反射レベルについて、SNR 実測値の一例を示している。なお、屋外環境におけるリフレクタの設置方法等を改善して、基準データとしてはより精度の高い測定を実現するための対策を行っていくことが今後の課題となっている。

表 5.1.2-7 実ターゲットからの反射レベル測定例

	コーナー リフレクタ (20dBsm)	球体 リフレクタ (-10dBsm)	歩行者ダミー	歩行者 (約 100 サンプル の中央値)
SNR 実測値 @20m	50.3 dB	24.4 dB	28.8 dB	28.7 dB

(4) 伝搬実験による歩行者特徴量抽出

歩行者を識別するには、レーダー測定信号から歩行者識別用の特徴量を抽出する必要がある。利用可能な基礎特徴量として、歩行者に対応するレーダー反射電力の強度と空間分布、歩行者に対応するドップラー周波数とドップラー周波数の分布などがある。実際の識別器を構築する際に、識別アルゴリズムによって上記基礎特徴量以外に、特徴量の各種変化形（例、平均値や分散など）や複数特徴量の組み合わせも利用される。但し、レーダーの基本性能を評価する場合は、基礎特徴量がより有効である。

以下では、基礎特徴量の表現手法として、距離~ドップラー2次元プロファイルを利用する。横軸で対象物の距離範囲を示し、縦軸で対象物のドップラー周波数範囲を示す。

また、交差点環境を重視するため、歩行者の移動範囲を両側の非道路部分も含む横断歩道に限定し、交差点に設置したレーダーから見る歩行者の特徴を検証する。

図 5.1.2-63 に歩行者特徴検証用交差点を示す。図 5.1.2-63 において、LR はロングレンジレーダー、SR はショートレンジレーダーの設置位置を示す。LR と SR いずれのレーダーも信号機の近い所に設置する。A は測定範囲となる横断歩道を示す。

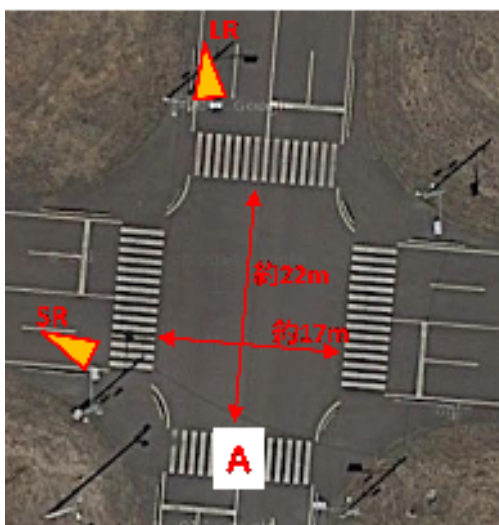


図 5.1.2-63 歩行者特徴検証用交差点

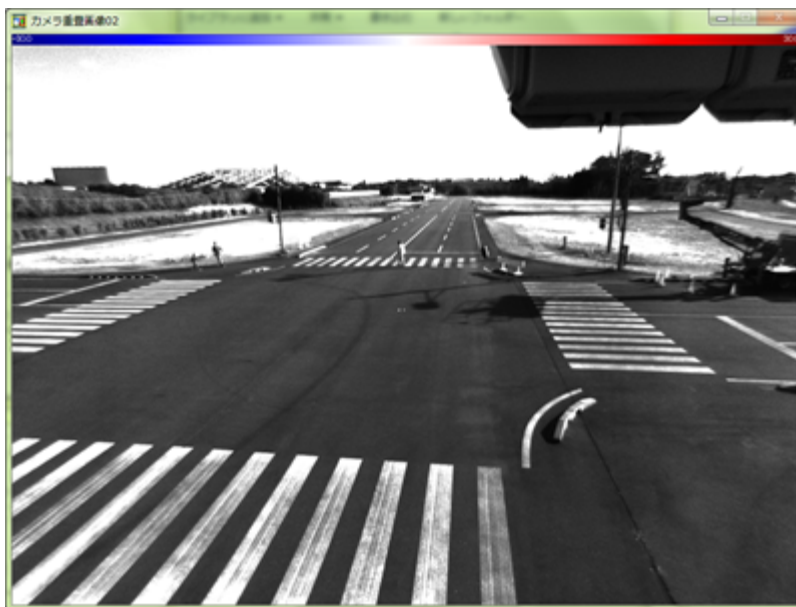
表 5.1.2-8 に歩行者特徴検証の実験項目を示す。

表 5.1.2-8 歩行者特徴検証実験項目

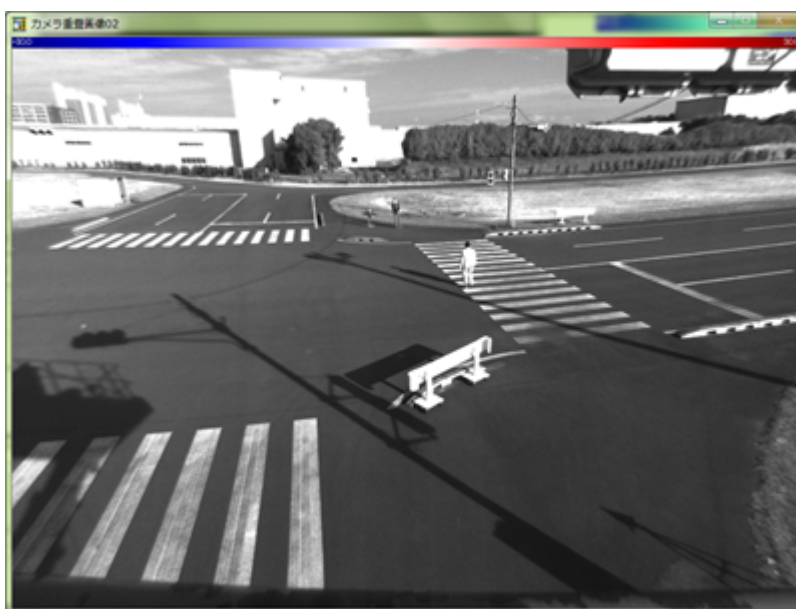
実験項目 1	低速度で、歩行者が横断歩道を往復
実験項目 2	中速度で、歩行者が横断歩道を往復
実験項目 3	高速度で、歩行者が横断歩道を往復

<実験項目1：低速度歩行条件>

図 5.1.2-64 に実験環境のカメラ映像を示す。(a)は LR レーダー位置からのカメラ映像で、(b)は SR レーダー位置視点からのカメラ映像である。歩行者は両側の非道路部分も含む横断歩道を約 60 秒で往復する (平均速度は約 0.75 m/s、即ち 2.7km/h)。



(a)



(b)

図 5.1.2-64 低速度歩行者：(a) LR 位置視点映像 (b) SR 位置視点映像

横断歩道における6地点の測定値を抽出し検証を行うために、レーダー測定値より、歩行者に対応する距離-ドップラー2次元プロファイルを算出する。図 5.1.2-65 は LR レーダーの測定値から算出した距離-ドップラー2次元プロファイルを示す。横軸で距離を示し、縦軸でドップラー速度を示す。歩行者がレーダーに近づく方向で移動する場合は、ドップラー周波数が正值となる。逆に、歩行者がレーダーから遠ざかる方向で移動する場合は、ドップラー周波数が負値となる。

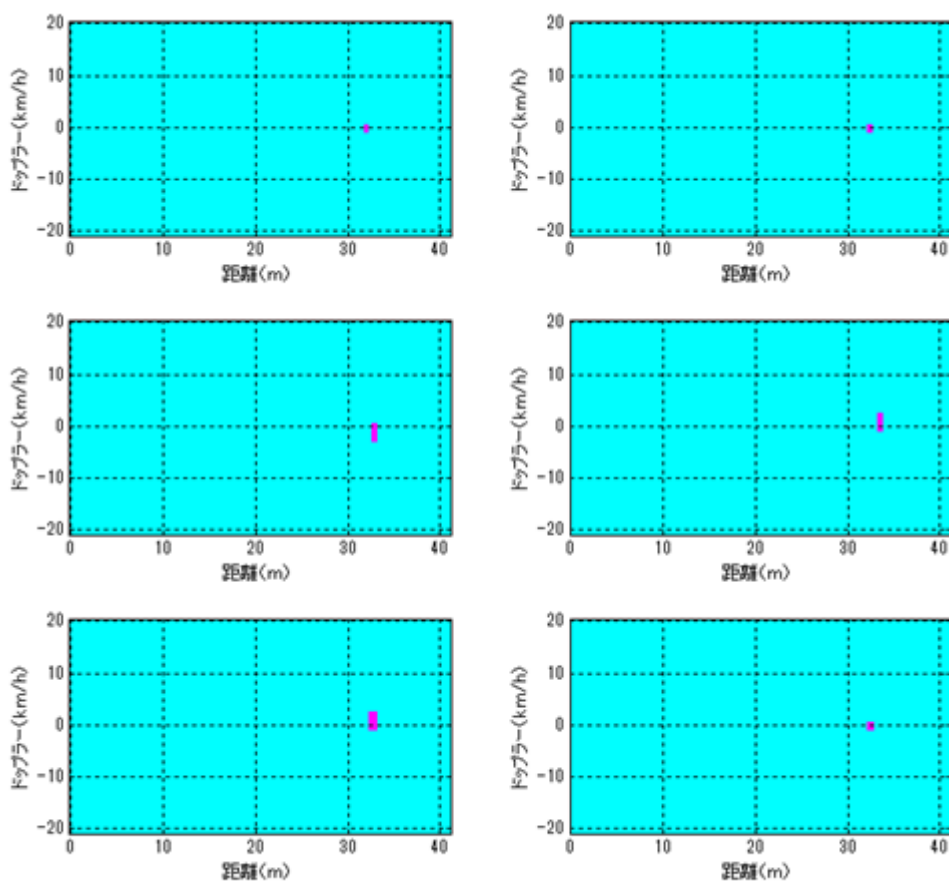


図 5.1.2-65 低速度歩行者の2次元プロファイル (LR レーダー測定値より算出)

同様に、LR レーダーで抽出した同じ6地点に対し、SR レーダーの測定値から算出した距離-ドップラー2次元プロファイルを図 5.1.2-66 に示す。また、低速度歩行者に対し、取得した距離方向の分布幅とドップラー周波数の分布幅を表 5.1.2-9 にまとめた。

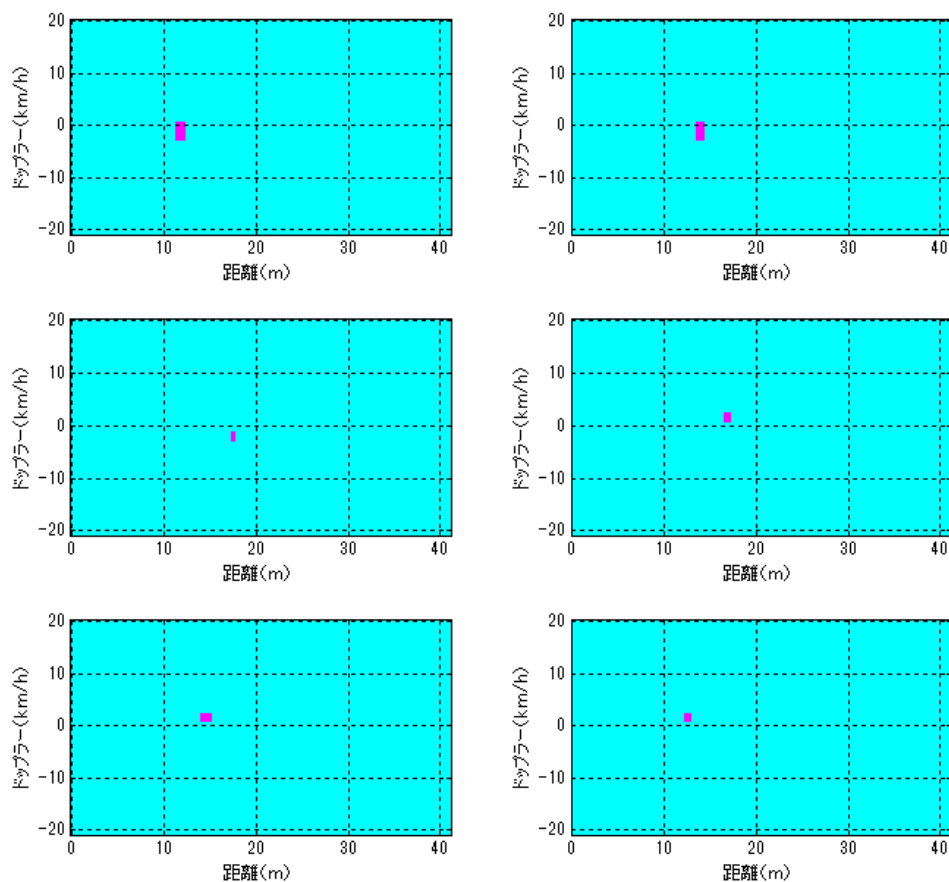


図 5.1.2-66 低速度歩行者の2次元プロフィール (SR レーダー測定値より算出)

表 5.1.2-9 低速度歩行者の特徴量抽出実験結果

		地点 1	地点 2	地点 3	地点 4	地点 5	地点 6	平均
距離幅 (m)	LR	0.23	0.47	0.47	0.47	0.71	0.70	0.51
	SR	0.94	0.71	0.24	0.47	0.94	0.70	0.67
ドップラー幅 (km/h)	LR	0	0	0.88	0.88	0.44	0.44	0.44
	SR	1.77	1.77	1.32	0.88	1.32	0.88	1.32

表 5.1.2-9 より下記結論を導くことができる。

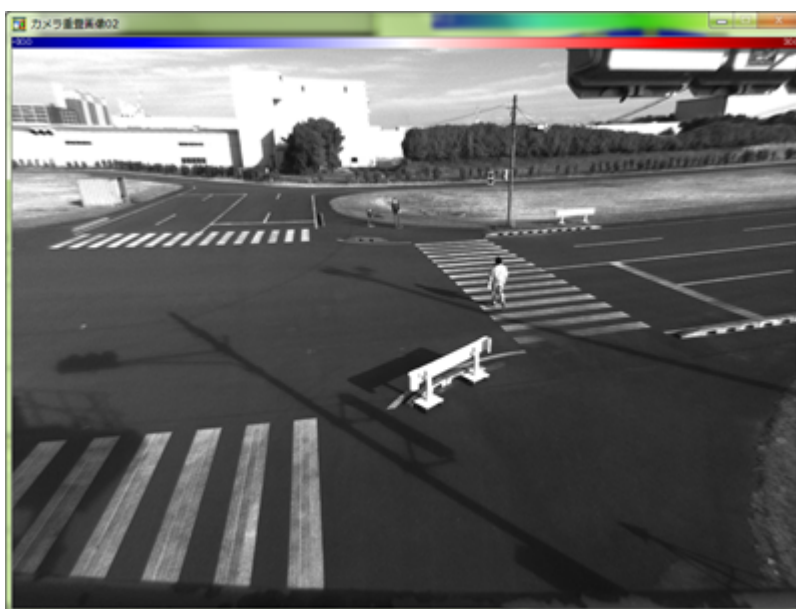
1. 歩行者が横断歩道を低速度で移動する場合、位置によって、レーダーの距離測定値幅とドップラー測定値幅が変動する。
2. 遠距離レーダーと近距離レーダーの測定値を比べると、近距離の変動幅が相対的に大きい。この傾向はドップラー値においてより顕著である。

<実験項目 2 : 中速度歩行条件>

図 5.1.2-67 に実験環境のカメラ映像を示す。(a)は LR レーダー位置からのカメラ映像で、(b)は SR レーダー位置視点からのカメラ映像である。歩行者は両側の非道路部分も含む横断歩道を約 50 秒で往復する (平均速度は約 1.0m/s、即ち 3.6km/h)。



(a)



(b)

図 5.1.2-67 中速度歩行者 : (a) LR 位置視点映像 (b) SR 位置視点映像

横断歩道における6地点を抽出し測定値の検証を行うために、レーダー測定値より、歩行者に対応する距離~ドップラー2次元プロファイルを算出する。図 5.1.2-68 は LR レーダーの測定値による距離~ドップラー2次元プロファイルを示す。横軸は距離を示し、縦軸はドップラー速度を示す。歩行者がレーダーに近づく方向で移動する場合は、ドップラー速度が正值となる。逆に、歩行者がレーダーから遠ざかる方向で移動する場合は、ドップラー速度が負値となる。

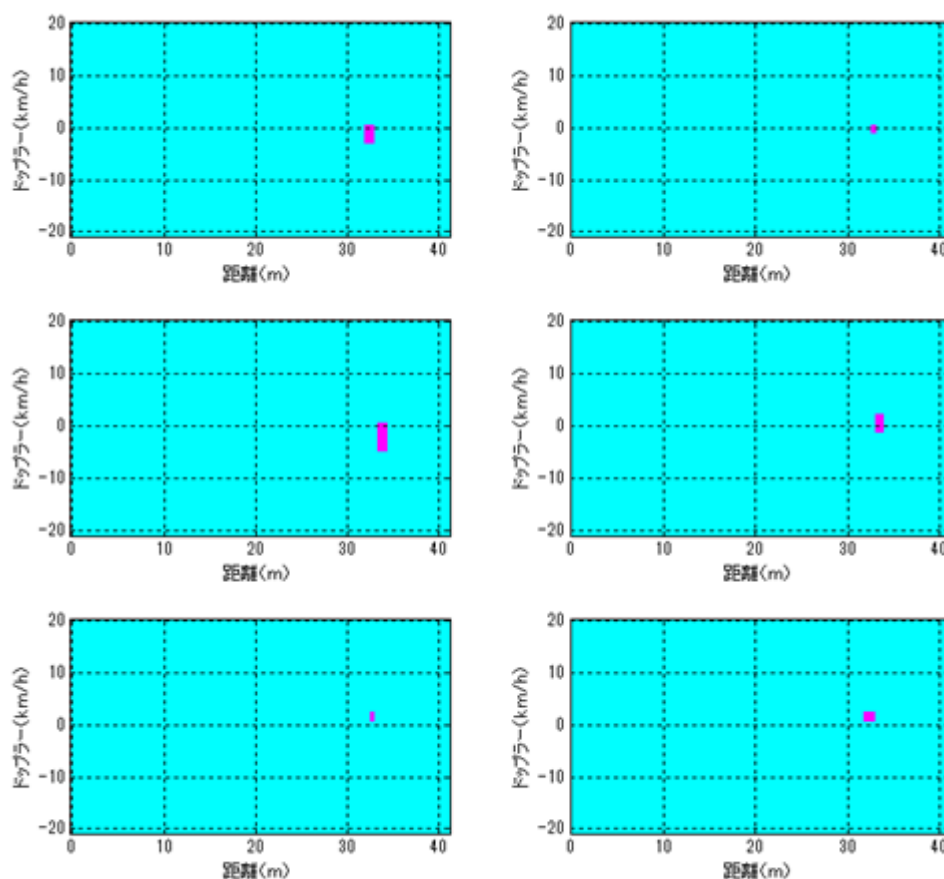


図 5.1.2-68 中速度歩行者の2次元プロファイル (LR レーダー測定値より算出)

同様に、LR レーダーで抽出した同じ6地点に対し、SR レーダーの測定値から算出した距離~ドップラー2次元プロファイルを図 5.1.2-69 に示す。また、中速度歩行者に対し、取得した距離方向の分布幅とドップラー周波数の分布幅を表 5.1.2-10 にまとめた。

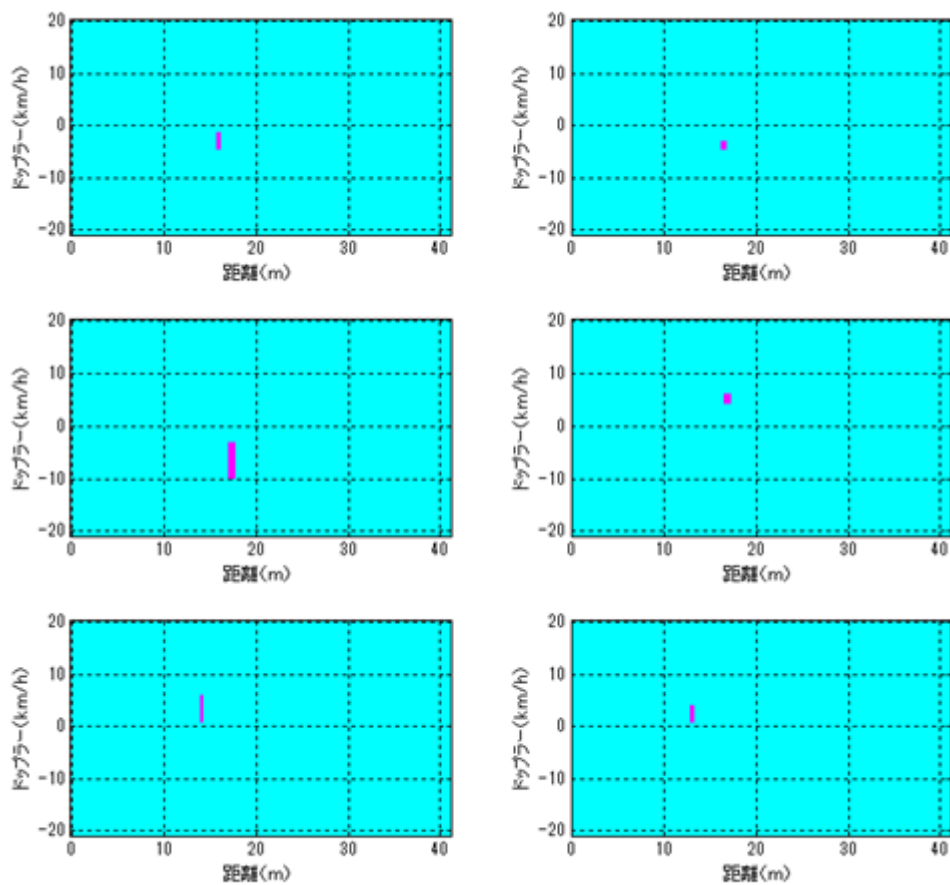


図 5.1.2-69 中速度歩行者の2次元プロフィール (SR レーダー測定値より算出)

表 5.1.2-10 中速度歩行者の特徴量抽出実験結果

		地点 1	地点 2	地点 3	地点 4	地点 5	地点 6	平均
距離幅 (m)	LR	0.93	0.47	0.94	0.70	0.23	0.93	0.70
	SR	0.24	0.47	0.47	0.47	0	0.24	0.32
ドップラー幅 (km/h)	LR	1.32	0.44	2.21	1.32	0.88	0.44	1.10
	SR	2.65	0	4.86	0.44	2.21	2.65	2.13

表 5.1.2-10 より下記結論を導くことができる。

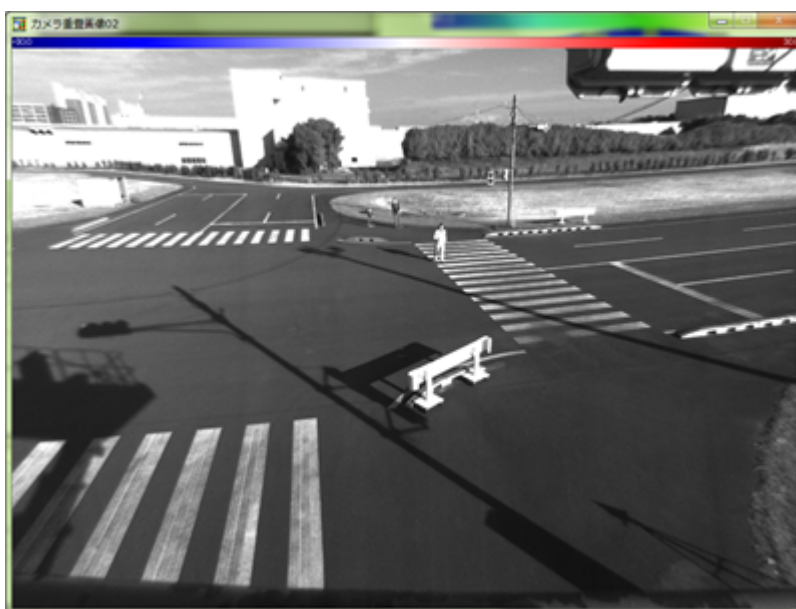
1. 歩行者が横断歩道の中速度で移動する場合、位置によって、レーダーの距離測定値幅とドップラー測定値幅が変動する。
2. 遠距離レーダーと近距離レーダーの測定値を比べると、近距離のドップラー周波数の変動幅が相対的に大きい。

<実験項目3：高速度歩行条件>

図 5.1.2-70 に実験環境のカメラ映像を示す。(a)は LR レーダー位置からのカメラ映像で、(b)は SR レーダー位置視点からのカメラ映像である。歩行者は両側の非道路部分も含む横断歩道を約 40 秒で往復する (平均速度は約 1.25m/s、即ち 4.5km/h)。



(a)



(b)

図 5.1.2-70 高速度歩行者：(a) LR 位置視点映像 (b) SR 位置視点映像

横断歩道における6地点を抽出し測定値の検証を行うため、レーダー測定値より、歩行者に対応する距離~ドップラー2次元プロファイルを算出する。図 5.1.2-71 は LR レーダーの測定値による距離~ドップラー2次元プロファイルを示す。横軸は距離を示し、縦軸はドップラー速度を示す。歩行者がレーダーに近づく方向で移動する場合は、ドップラー速度が正值となる。逆に、歩行者がレーダーから遠ざかる方向で移動する場合は、ドップラー速度が負値となる。

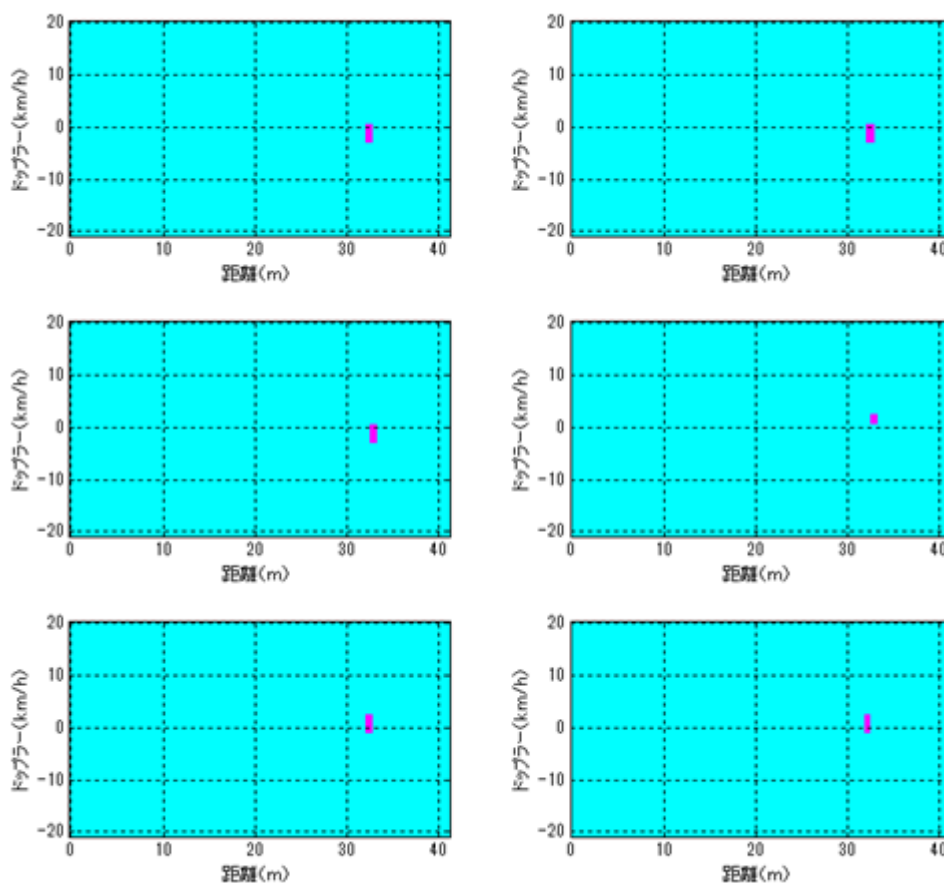


図 5.1.2-71 高速度歩行者の2次元プロファイル (LR レーダー測定値より算出)

同様に、LR レーダーで抽出した同じ6地点に対し、SR レーダーの測定値から算出した距離~ドップラー2次元プロファイルを図 5.1.2-72 に示す。また、高速度歩行者に対し、取得した距離方向の分布幅とドップラー周波数の分布幅を表 5.1.2-11 にまとめた。

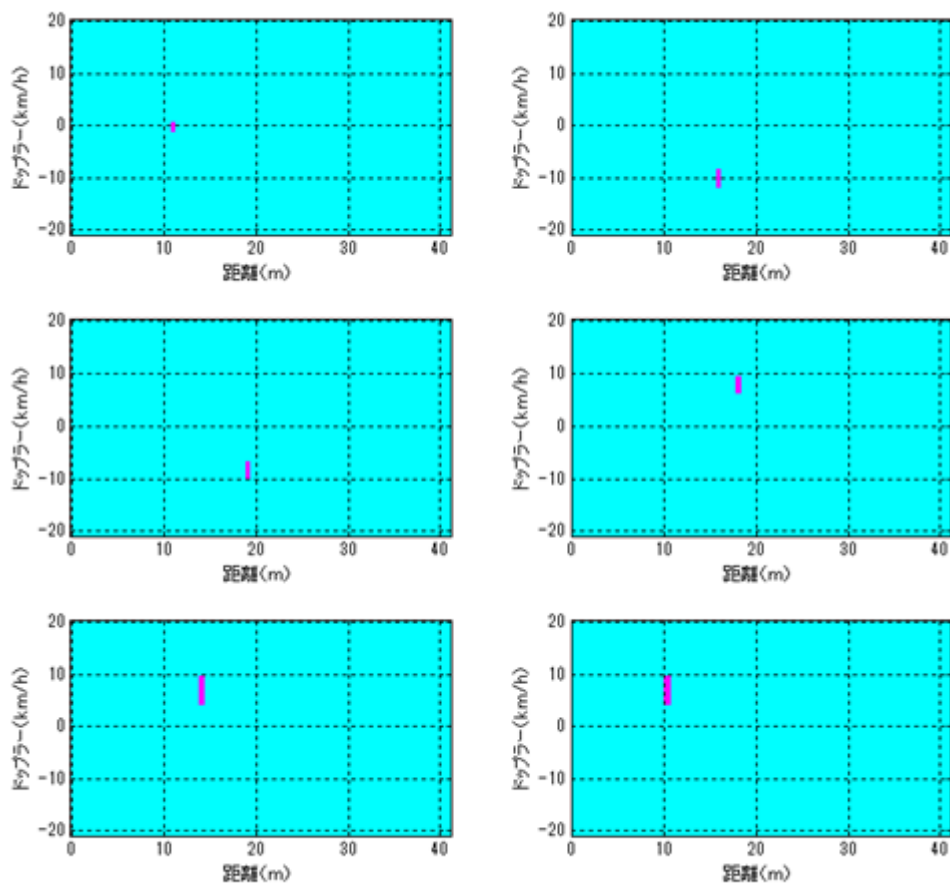


図 5.1.2-72 高速度歩行者の 2 次元プロファイル (SR レーダー測定値より算出)

表 5.1.2-11 高速度歩行者の特徴量抽出実験結果

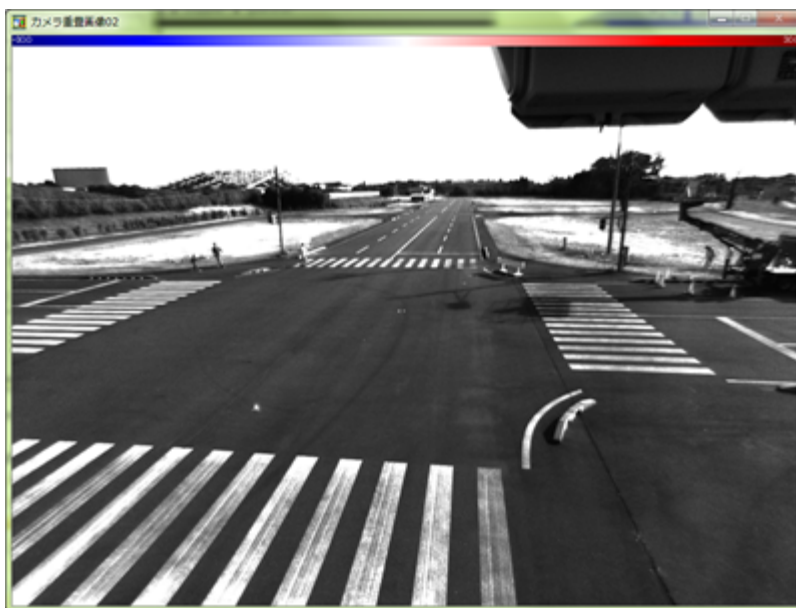
		地点 1	地点 2	地点 3	地点 4	地点 5	地点 6	平均
距離幅 (m)	LR	0.47	0.70	0.47	0.47	0.47	0.46	0.51
	SR	0.24	0.24	0.24	0.47	0.47	0.47	0.36
ドップラー幅 (km/h)	LR	0.88	0.44	0.88	1.32	1.76	0.88	1.03
	SR	0.44	2.65	1.76	2.65	2.65	3.53	2.28

表 5.1.2-11 より下記結論を導くことができる。

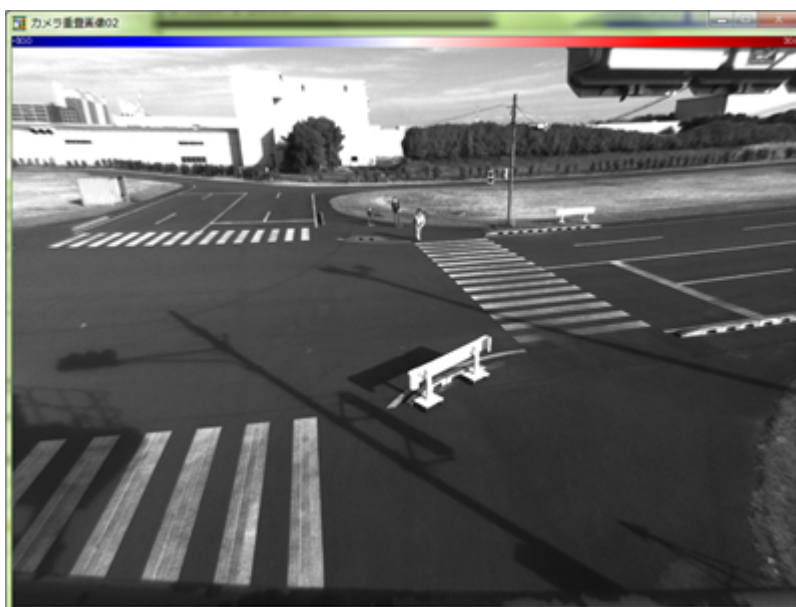
1. 歩行者が横断歩道を高速度で移動する場合、位置によって、レーダーの距離測定値幅とドップラー測定値幅が変動する。
2. 遠距離レーダーと近距離レーダーの測定値を比べると、近距離のドップラー周波数の変動幅が相対的に大きい。

< 静止物体との識別検証 >

交差点の横断歩道の両側にガードレールや縁石などの静止物体を置いた場合がある。レーダー測定信号から静止物体を識別するため、静止物体の反射電力強度とドップラー値を利用できる。具体的に、静止物体からの反射強度値が固定で、且つ同じ位置のドップラー値が0である特徴を利用し、静止物体を識別できる。



(a)



(b)

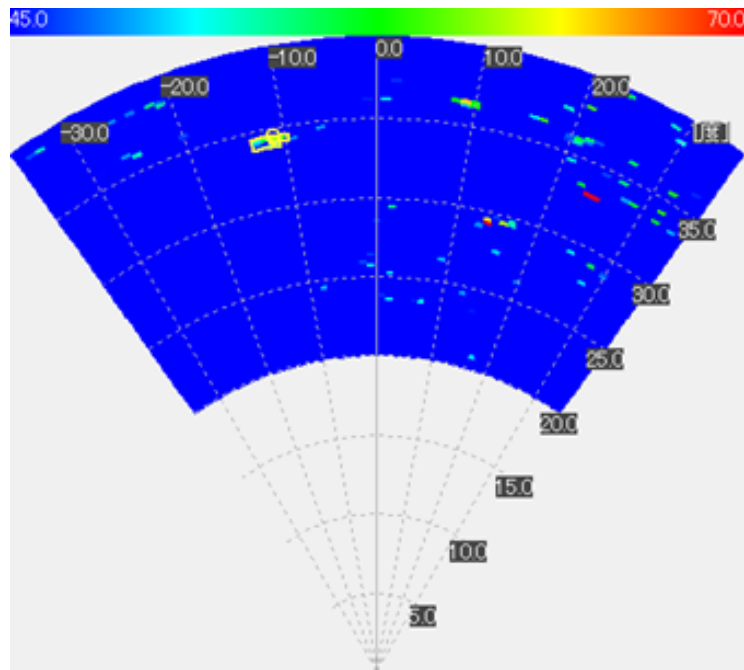
図 5.1.2-73 ガードレールのカメラ映像 : (a) LR 位置視点映像 (b) SR 位置視点映像

図 5.1.2-73 にガードレール特徴を検証するためのカメラ映像を示す。(a)は LR レーダー位置視点のカメラ映像で、(b)は SR レーダー位置視点のカメラ映像である。LR レーダーの検出結果として、反射電力プロファイルとドップラープロファイルを以下の図 5.1.2-74 に示す。その内、(a)は反射電力プロファイル、(b)はドップラープロファイルを示す。

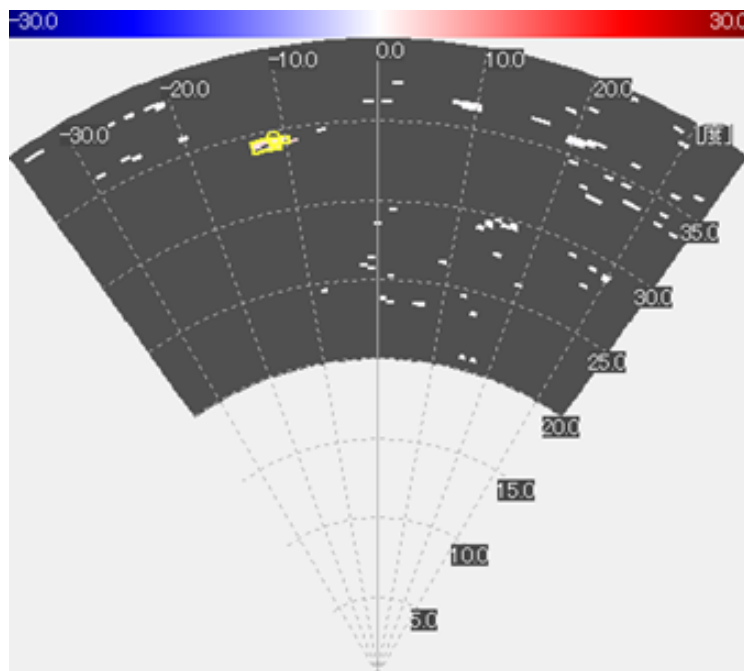
図 5.1.2-74 より、方位角約 15.0 度、距離約 36.0m の位置に強い反射 (図 5.1.2-74 (a) で赤い領域) の存在を確認できる。この強い反射はガードレールからの反射信号である。しかし、ドップラープロファイルの同じ位置からドップラー速度を検出できない (図 5.1.2-74 (b) で白い領域)。つまり、ガードレールを静止物として検出されている。

同様の検出結果を SR レーダーの測定値からでも確認できる。図 5.1.2-75 に SR レーダーの電力プロファイルとドップラープロファイルを示す。

図 5.1.2-75 において、方位角約 10 度、距離約 11m の位置に存在する 2 箇所の強い反射はガードレールからの反射信号である。LR レーダー同様、対応ドップラー速度はゼロである。つまり、SR レーダーからもガードレールを静止物として検出されている。



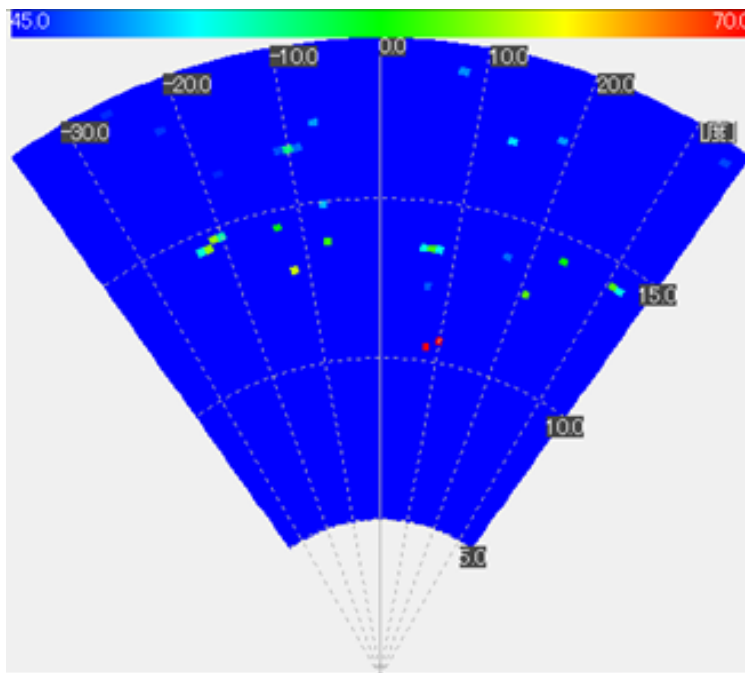
(a)



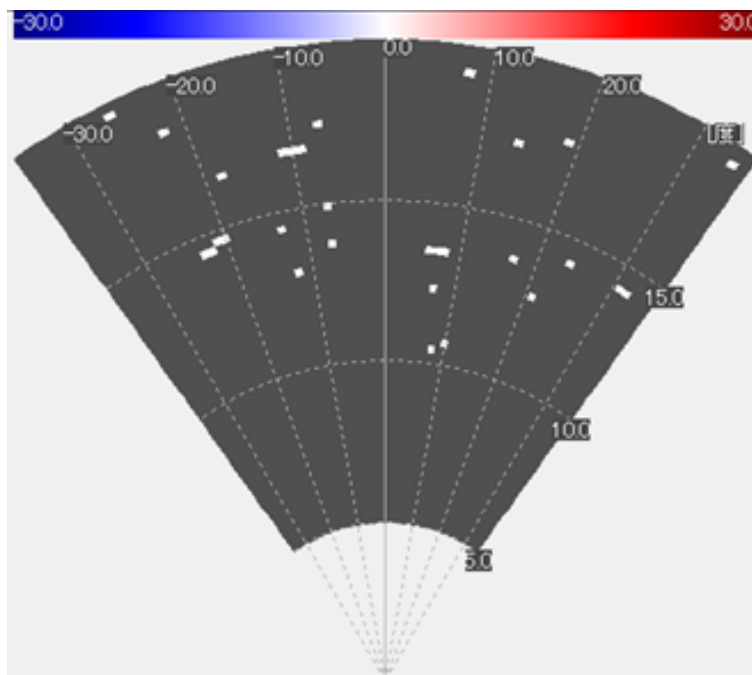
(b)

図 5.1.2-74 LR レーダー検出結果：

(a) 反射電力プロファイル、(b) ドップラープロファイル



(a)



(b)

図 5.1.2-75 SR レーダー検出結果：

(a) 反射電力プロファイル、(b)ドップラープロファイル

<歩行者識別の実証実験まとめ>

距離~ドプラー2次元プロファイルを用いた歩行者の特徴量抽出に取組んだ結果として、以下の結論を導くことができる。

1. 歩行者の移動速度に依らず、その距離測定値の変動幅は、歩行者のレーダーに対する相対距離と相対方向によって変動する。
2. 歩行者に対するドップラー周波数の変動幅は、遠距離レーダーと近距離レーダーの測定値を比べると、近距離の方が相対的に大きい傾向である。
3. 静止物体のみの環境では、79GHz帯レーダーの反射信号にはドップラー周波数が測定されることはない。

以上のことから、歩行者に対してはドップラー周波数測定値の変動幅が特徴量の一つと見なせるだけでなく、レーダーから比較的近距离のエリアにおいて、よりその特徴が明確になる傾向を確認することができた。また、ドップラー周波数の測定を行うことで、静止物体と歩行者の識別が可能であり、原理的にドップラー分解能が高いミリ波帯を使用していることから、歩行者が低速で移動する場合でも有効なアプローチであることが確認された。

5.1.3. ア) -② 交差点死角対策技術の開発

(1) 交差点環境のオクルージョン検証要件

ここでの交差点死角対策検証に関わる実証実験についても同様にして、日本自動車研究所（JARI）の模擬市街路西側コースにおいて実施した。

本実証実験では、車両による歩行者のオクルージョンを検証対象とする。交差点で発生する車両による歩行者のオクルージョンの発生条件は、基本的に、車両、歩行者、レーダーの3者間の幾何関係に依存する。そのため、車両の走行位置、車両の寸法（種類）、歩行者の位置や身長、レーダーの設置高度や俯角などがオクルージョンに影響を与える。但し、車両の走行位置や歩行者の位置は、通常交差点の関連寸法によって限定される。そのため、本実証実験では、歩行者の移動範囲を指定横断歩道に限定し、そして、上記横断歩道に接近する車両による歩行者のオクルージョンを検証する。

まずは、実験環境に合わせてオクルージョンの検証要件を選定した。その結果を表5.1.3-1に示す。ここで、今回の実証実験では、オクルージョンの発生しやすい4車線×2車線交差点を対象とする。

表 5.1.3-1 交差点オクルージョン検証要件

対象物	項目	項目値
交差点種類	4車線×4車線	4車線の車線幅 17m
	4車線×2車線	2車線の車線幅 10m
レーダー設置	高度	5m、2.5m
	俯角	高度に合わせる
車両	走行パターン	直進、右折、左折
	幅員	車1：L4830×W1710×H1525mm 車2：L4400×W1695×H1850mm
歩行者	身長	平均身長（170～175m）

選定した各実験項目に対し、カメラの見え方と比較し、ミリ波レーダーのオクルージョン状況を検証する。また、一部の実験項目に対し、レーザーレーダーの測定結果も提示する。図5.1.3-1に示すように、ミリ波レーダー、カメラ、レーザーレーダーの3台を固定する治具を用いる。図から分かるように、最も高い位置からレーザーレーダー、カメラ、そして79GHz帯のミリ波レーダーを取り付けた。また、図5.1.3-2には、4車線×2車線の交差点環境において、路側の2か所に79GHzレーダーを設置した時の状況を写真で示している。



図 5.1.3-1 3種類のセンサーを設置した固定治具



図 5.1.3-2 交差点に 79GHz レーダーを 2 か所に設置した時の状況

(2) オクルージョン発生のモデリングに向けた交差点環境検証

<4車線×2車線の交差点環境>

図 5.1.3-3 に実験対象の交差点を示す。SR はショートレンジレーダー、LR はロングレンジレーダーの設置位置を示す。A は測定対象となる横断歩道を示す。

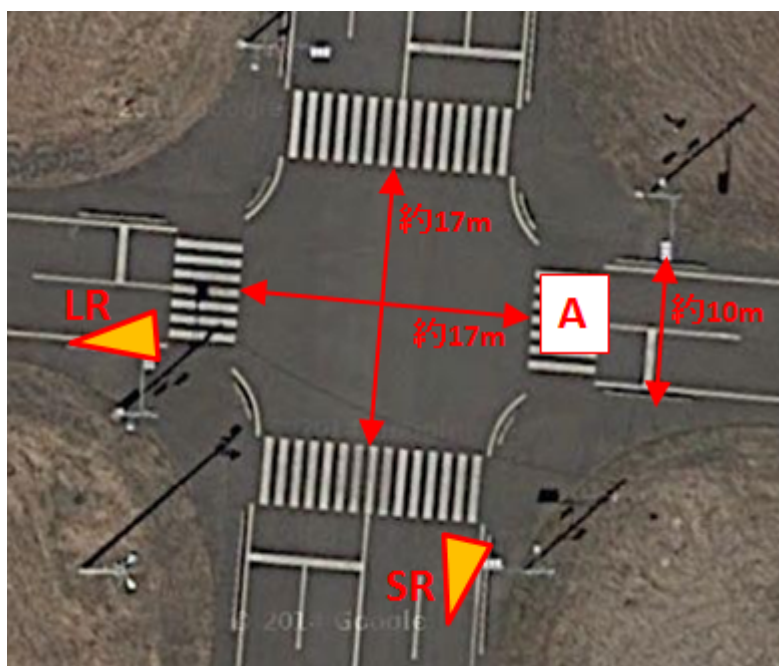


図 5.1.3-3 4車線×2車線交差点

4車線×2車線交差点で実施する実験項目を表 5.1.3-2 に示す。

表 5.1.2-2 実験項目

実験項目 1	レーダー設置高度 2.5m、車両右左折
実験項目 2	レーダー設置高度 2.5m、車両直進
実験項目 3	レーダー設置高度 5m、車両右左折
実験項目 4	レーダー設置高度 5m、車両直進

<実験項目1：レーダー設置高度 2.5m、車両右左折>

図 5.1.3-4 のカメラ映像に実験項目1における車両と歩行者との位置関係を示す。その内、図 5.1.3-4 (a)は LR レーダー位置視点、図 5.1.3-4 (b)は SR レーダー位置視点の映像である。



(a)



(b)

図 5.1.3-4 実験項目1のカメラ映像：(a)LR レーダー位置視点、(b)SR レーダー位置視点

図に示したように、歩行者2人が異なる方向から同じ横断歩道を渡る。同時に、大きさの異なる2台の車両が異なる方向から上記横断歩道を右左折する。以下、説明を簡単にするため、黒い右折車を車両1、白い左折車を車両2、進行方向が画面左→右の歩行者を歩行者1、画面右→左の歩行者を歩行者2と表記する。

実験項目1において、79GHzレーダーの設置高度は2.5mで、カメラの設置高度は2.9mである。

歩行者と車両間の距離はレーザーレーダーの測定値から取得できる。実験項目1において、歩行者と車両との最短距離は約4.8m（歩行者とレーザーレーダー間の距離28.5m、車とレーザーレーダー間の距離23.7m）である。

カメラ映像から、歩行者にオクルージョンが起きている時のフレームを選定し、検証対象とする。但し、カメラ映像に対する画像認識を実施していないため、人間の主観判断でオクルージョン映像を選定する。79GHzレーダー性能の評価方法として、映像でオクルージョンが起こった期間中のレーダー測定フレームに対し、歩行者の検出率を検証する。

また、交差点死角対策の基本構成を検証するため、異なる位置に設置したLRレーダーとSRレーダーを併用した場合の検出率、つまり、どちらか1台でも検出できた比率、も検証する。

表5.1.3-3に実験項目1の検証結果を示す。その内、LR検出率はLRレーダーのみを利用する場合の検出率で、LR+SR検出率はLRレーダーとSRレーダーを併用する場合の検出率を表す。また、実験において、79GHzレーダーのフレーム率はカメラのフレーム率と等しい。

表 5.1.3-3 実験項目1の検証結果

	車両1対歩行者1	車両2対歩行者2
映像オクルージョンフレーム数	21	17
79GHzレーダーの歩行者検出率	LR : 16/21、 LR+SR : 21/21	LR : 10/17、 LR+SR : 17/17

以下では、79GHz レーダーによる検出結果を例示する。

図 5.1.3-5 には選定したオクルージョン映像例を示している。この映像において、歩行者 2 が車両 2 によって隠されている。図 5.1.3-6 に同時刻の LR レーダーの検出結果をドップラープロファイルで示す。LR レーダーの測定値において、-13 度、30mm 付近で表示された黄色いマークは検出した歩行者 2 を表し、-10 度、24m 付近で表示された黄色いマークは検出した車両 2 を表す。図 5.1.3-5 と図 5.1.3-6 から分かるように、カメラ映像ではオクルージョンが観測された場合でも、79GHz レーダーでは歩行者を車両から分離検出できるケースもある。

更に、79GHz レーダーを対向設置する効果を以下に例示する。図 5.1.3-7 (a) にオクルージョン映像の一例 (LR レーダー位置視点) を示し、図 5.1.3-7 (b) に相応の LR レーダーで測定されたドップラープロファイルを示す。この場合、オクルージョンの影響で LR レーダーでは歩行者を検出できなかった。しかし、図 5.1.3-8 に示すように、SR レーダー位置視点から見ればオクルージョンが起こっていない。図 5.1.3-8 (a) は同時刻の SR レーダー位置視点のカメラ映像を示し、図 5.1.3-8 (b) は相応の SR レーダーで測定されたドップラープロファイルを示す。図 5.1.3-8 (b) から分かるように、SR レーダーは通常通りで歩行者を検出できている。

結論として、交差点を右左折する車両の場合、LR レーダーにとってはオクルージョンが起こった場合でも、SR レーダーにとってはオクルージョンが起こっていないことを確認できた。



図 5.1.3-5 オクルージョン映像例

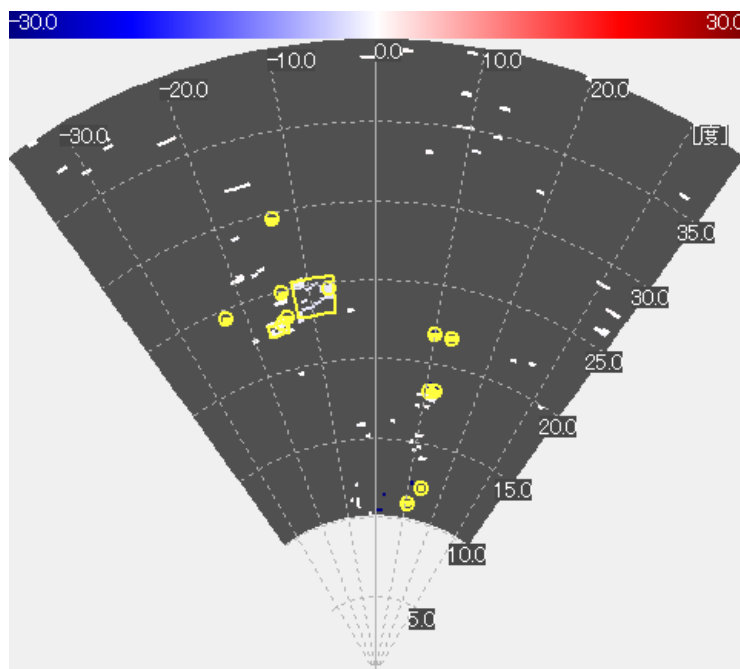
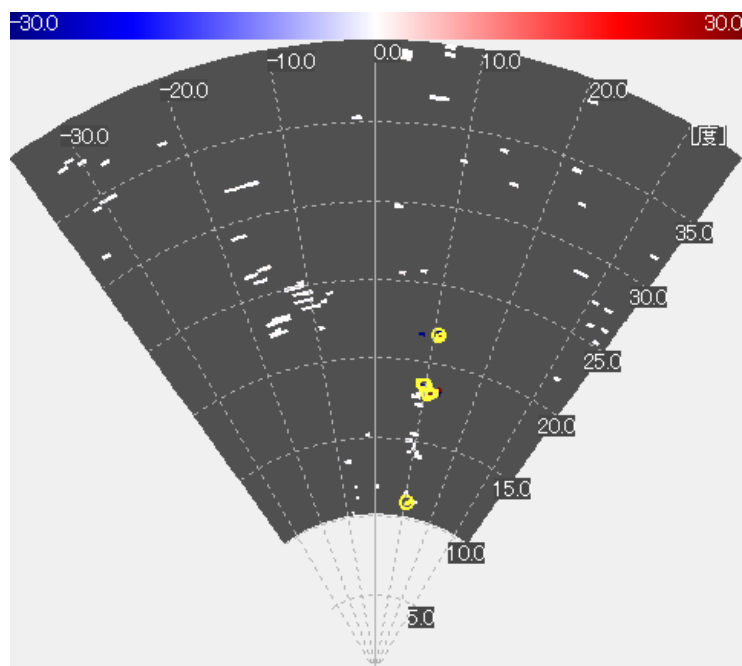


図 5.1.3-6 LR レーダーの検出例



(a)

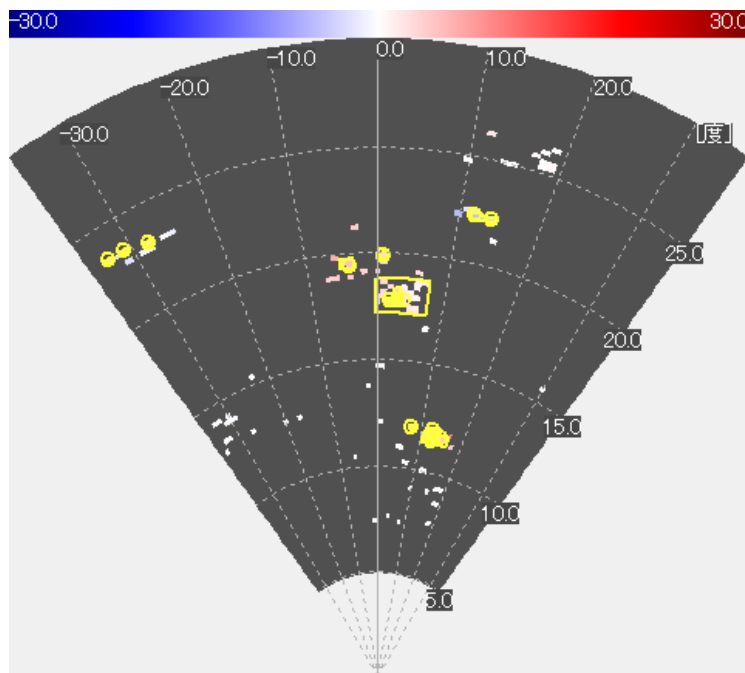


(b)

図 5.1.3-7 LR レーダーの未検出例 : (a)カメラ映像、(b)ドップラープロファイル



(a)



(b)

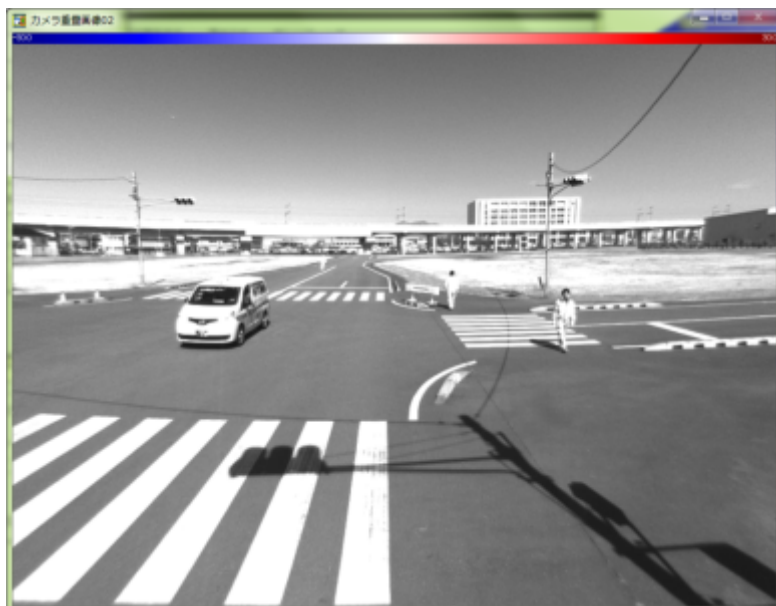
図 5.1.3-8 SR レーダーの検出例 : (a)カメラ映像、(b)ドップラープロファイル

<実験項目2：レーダー設置高度2.5m、車両直進>

図5.1.3-9のカメラ映像に実験項目2における車両と歩行者との位置関係を示す。その内、図5.1.3-9(a)はLRレーダー位置視点、図5.1.3-9(b)はSRレーダー位置視点の映像である。



(a)



(b)

図5.1.3-9 実験項目2のカメラ映像：(a)LRレーダー視点、(b)SRレーダー視点

図に示したように、歩行者2人が異なる方向から同じ横断歩道を渡る。同時に、大きさの異なる2台の車両が同じ方向から上記横断歩道に並行する車線を走行する。以下、説明を簡単にするため、先行車両（黒）を車両1、後続車両（白）を車両2、進行方向が車両と同じの歩行者を歩行者1、車両と反対方向の歩行者を歩行者2と表記する。

実験項目2において、79GHzレーダーの設置高度は2.5mで、カメラの設置高度は2.9mである。

歩行者と車両間の距離をレーザーレーダーの測定値から確認できる。実験項目2において、歩行者と車両との最短距離は約8.4m（歩行者とレーザーレーダー間の距離26.8m、車とレーザーレーダー間の距離18.4m）である。カメラ映像から、歩行者にオクルージョンが起こっている時のフレームを選定し、検証対象とする。但し、カメラ映像に対する画像認識を実施していないため、人間の主観判断でオクルージョン映像を選定する。79GHzレーダー性能の評価方法として、映像オクルージョンが起こった期間中のレーダー測定フレームに対し、歩行者の検出率を検証する。

また、交差点死角対策の基本構成を検証するため、異なる位置に設置したLRレーダーとSRレーダーを併用した場合の検出率、つまり、どちらか1台でも検出できた比率、も検証する。

表5.1.3-4に実験項目2の検証結果を示す。その内、LR検出率はLRレーダーのみを利用する場合の検出率で、LR+SR検出率はLRレーダーとSRレーダーを併用する場合の検出率を表す。また、79GHzレーダーのフレーム率はカメラのフレーム率と等しい。

表 5.1.3-4 実験項目2の検証結果

	車両1対歩行者1	車両2対歩行者2
映像オクルージョンフレーム数	5	6
79GHzレーダーの歩行者検出率	LR : 4/5、 LR+SR : 5/5	LR : 4/6、 LR+SR : 6/6

以下では、79GHz レーダーによる検出結果を例示する。

図 5.1.3-10 に選定したオクルージョン映像例を示している。映像において、歩行者 2 が車両 2 によって身体の一部が隠されている。図 5.1.3-11 に同時刻の LR レーダーの検出結果をドップラープロファイルで示す。LR レーダーの測定値において、方位-10 度、距離 27m 付近で表示された黄色いマークは検出した歩行者 2 を表し、方位-13 度、距離 18m 付近で表示された黄色いマークは検出した車両 2 を表す。図 5.1.3-10 と図 5.1.3-11 から分かるように、カメラ映像ではオクルージョンが観測された場合でも、レーダーでは歩行者を車両から分離検出できるケースもある。

更に、79GHz レーダーを対向設置する効果を以下に例示する。図 5.1.3-12 (a) にオクルージョン映像の一例 (LR レーダー位置視点) を示し、図 5.1.3-12 (b) に相応 LR レーダーのドップラープロファイルを示す。この場合、オクルージョンの影響で LR レーダーでは歩行者を検出できなかった。しかし、図 5.1.3-13 に示すように、SR レーダー位置視点から見ればオクルージョンが起こっていない。図 5.1.3-13 (a) は同時刻の SR レーダー位置視点のカメラ映像を示し、図 5.1.3-12 (b) は相応の SR レーダードップラープロファイルを示す。図 5.1.3-12 (b) から分かるように、SR レーダーは通常通りで歩行者を検出できている。

結論として、交差点を直進する車両の場合、LR レーダーにとってはオクルージョンが起こった場合でも、SR レーダーにとってはオクルージョンが起こっていないことを確認できた。



図 5.1.3-10 オクルージョン映像例

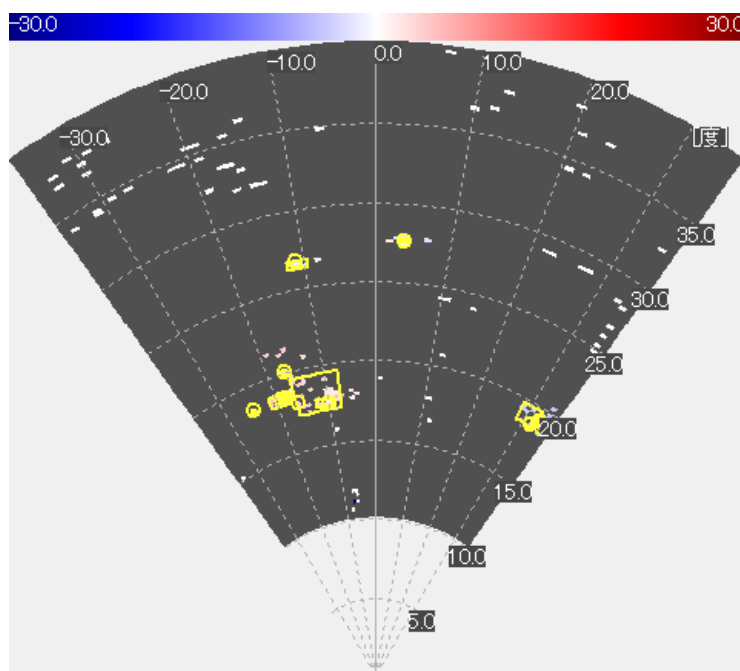
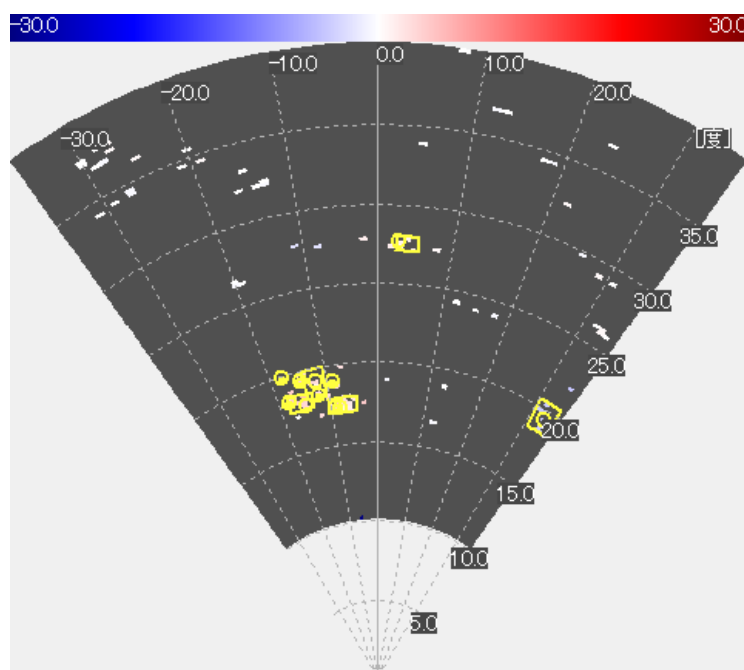


図 5.1.3-11 LR レーダーの検出例



(a)

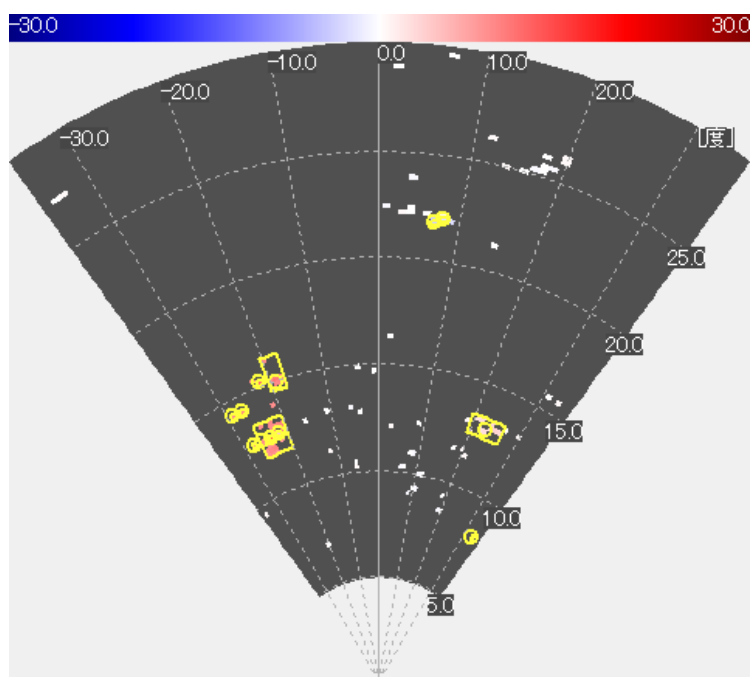


(b)

図 5.1.3-12 LR レーダーの未検出例 : (a)カメラ映像、(b)ドップラープロファイル



(a)



(b)

図 5.1.3-13 SR レーダーの検出例 : (a)カメラ映像、(b)ドップラープロファイル

<実験項目3：レーダー設置高度5m、車両右左折>

図5.1.3-14のカメラ映像に実験項目3における車両と歩行者との位置関係を示す。その内、図5.1.3-14(a)はLRレーダー位置視点、図5.1.3-14(b)はSRレーダー位置の映像である。



(a)



(b)

図5.1.3-14 実験項目3のカメラ映像：(a)LRレーダー位置視点、(b)SRレーダー位置視点

図に示したように、歩行者2人が異なる方向から同じ横断歩道を渡る。同時に、大きさの異なる2台の車両が異なる方向から上記横断歩道を右左折する。以下、説明を簡単にするため、黒い右折車を車両1、白い左折車を車両2、進行方向が画面左→右の歩行者を歩行者1、画面右→左の歩行者を歩行者2と表記する。

実験項目3において、79GHzレーダーの設置高度は5mで、カメラの設置高度は5.4mである。

歩行者と車両間の距離をレーザーレーダーの測定値から確認できる。実験項目3において、歩行者と車両との最短距離は約3m（歩行者とレーザーレーダー間の距離27.3m、車とレーザーレーダー間の距離24.3m）である。カメラ映像から、歩行者にオクルージョンが起こっている時のフレームを選定し、検証対象とする。但し、カメラ映像に対する画像認識を実施していないため、人間の主観判断でオクルージョン映像を選定する。79GHzレーダー性能の評価方法として、映像オクルージョンが起こった期間中のレーダー測定フレームに対し、歩行者の検出率を検証する。

また、交差点死角対策の基本構成を検証するため、異なる位置に設置したLRレーダーとSRレーダーを併用した場合の検出率、つまり、どちらか1台でも検出できた比率、も検証する。

表5.1.3-5に実験項目3の検証結果を示す。その内、LR検出率はLRレーダーのみを利用する場合の検出率で、LR+SR検出率はLRレーダーとSRレーダーを併用する場合の検出率を表す。また、79GHzレーダーのフレーム率はカメラのフレーム率と等しい。

表 5.1.3-5 実験項目3の検証結果

	車両1対歩行者1	車両2対歩行者2
映像オクルージョンフレーム数	23	15
レーダーの歩行者検出率	LR : 20/23、 LR+SR : 20/23	LR : 10/15、 LR+SR : 15/15

以下では、79GHz レーダーによる検出結果を例示する。

図 5.1.3-15 に選定したオクルージョン映像例を示している。映像において、歩行者 2 が車両 2 によって身体の一部が隠されている。図 5.1.3-16 に同時刻の LR レーダーの検出結果をドップラープロファイルで示す。LR レーダーの測定値において、方位-18 度、距離 30m 付近で表示された黄色いマークは検出した歩行者 2 を表し、方位-10 度、距離 25m 付近で表示された黄色いマークは検出した車両 2 を表す。図 5.1.3-15 と図 5.1.3-16 から分かるように、カメラ映像ではオクルージョンが観測された場合でも、レーダーでは歩行者を車両から分離検出できるケースもある。

また、例示していないが、実験項目 1 や実験項目 2 と同様、79GHz レーダーを対向設置する効果も表 5.1.3-5 より確認できる。



図 5.1.3-15 オクルージョン映像例

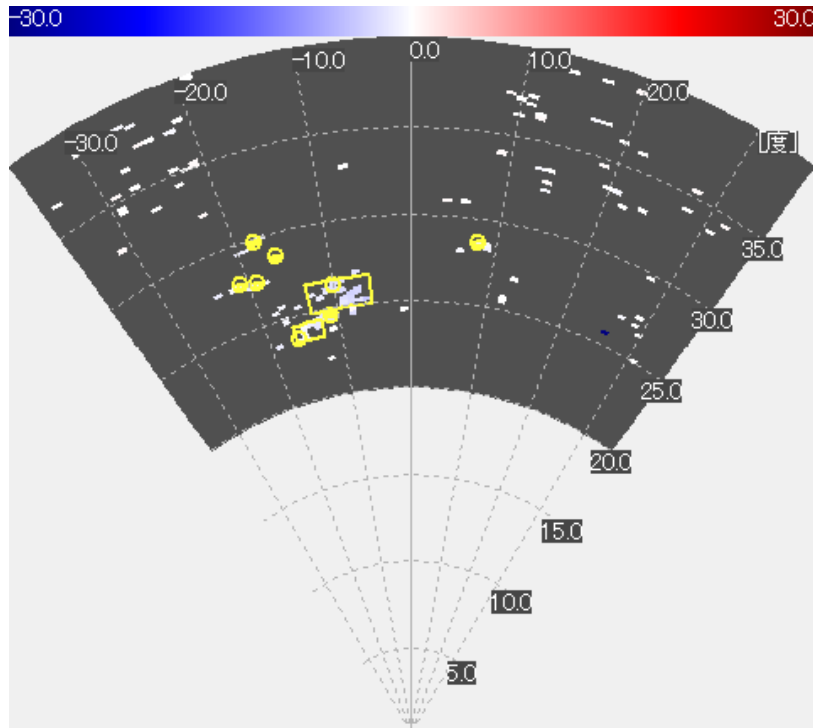


図 5.1.3-16 LR レーダーの検出例

<実験項目4：レーダー設置高度5m、車両直進>

図5.1.3-17のカメラ映像に実験項目4における車両と歩行者との位置関係を示す。その内、図5.1.3-17(a)はLRレーダー視点位置、図5.1.3-17(b)はSRレーダー視点位置の映像である。



(a)



(b)

図5.1.3-17 実験項目4のカメラ映像：(a)LRレーダー位置視点、(b)SRレーダー位置視点

図に示したように、歩行者2人が異なる方向から同じ横断歩道を渡る。同時に、大きさの異なる2台の車両が同じ方向から上記横断歩道に並行する車線を走行する。以下、説明を簡単にするため、先行車両（黒）を車両1、後続車両（白）を車両2、進行方向が車両と同じの歩行者を歩行者1、車両と反対方向の歩行者を歩行者2と表記する。

実験項目4において、79GHzレーダーの設置高度は5mで、カメラの設置高度は5.4mである。

歩行者と車両間の距離をレーザーレーダーの測定値から確認できる。実験項目4において、歩行者と車両との最短距離は約9m（歩行者とレーザーレーダー間の距離27.5m、車とレーザーレーダー間の距離18.5m）である。カメラ映像から、歩行者にオクルージョンが起こっている時のフレームを選定し、検証対象とする。但し、カメラ映像に対する画像認識を実施していないため、人間の主観判断でオクルージョン映像を選定する。79GHzレーダー性能の評価方法として、映像オクルージョンが起こった期間中のレーダー測定フレームに対し、歩行者の検出率を検証する。

また、交差点死角対策の基本構成を検証するため、異なる位置に設置したLRレーダーとSRレーダーを併用した場合の検出率、つまり、どちらか1台でも検出できた比率、も検証する。

表5.1.3-6に実験項目4の検証結果を示す。その内、LR検出率はLRレーダーのみを利用する場合の検出率で、LR+SR検出率はLRレーダーとSRレーダーを併用する場合の検出率を表す。また、79GHzレーダーのフレーム率はカメラのフレーム率と等しい。

表 5.1.3-6 実験項目4の検証結果

	車両1対歩行者1	車両2対歩行者2
映像オクルージョンフレーム数	4	5
79GHzレーダーの歩行者検出率	LR : 3/4、 LR+SR : 4/4	LR : 5/5、 LR+SR : 5/5

以下では、79GHz レーダーによる検出結果を例示する。

図 5.1.3-18 に選定したオクルージョン映像例を示す。映像において、歩行者 2 が車両 2 によって身体の一部が隠されている。図 5.1.3-19 に同時刻の LR レーダーの検出結果ドップラープロファイルを示す。LR レーダーの測定値において、方位-10 度、距離 27m 付近で表示された黄色いマークは検出した歩行者 2 を表し、方位-15 度、距離 20m 付近で表示された黄色いマークは検出した車両 2 を表す。図 5.1.3-18 と図 5.1.3-19 から分かるように、カメラ映像ではオクルージョンが観測された場合でも、レーダーでは歩行者を車両から分離検出できるケースもある。

また、例示していないが、実験項目 1 や実験項目 2 と同様、79GHz レーダーを対向設置する効果も表 5.1.3-6 より確認できる。



図 5.1.3-18 オクルージョン映像例

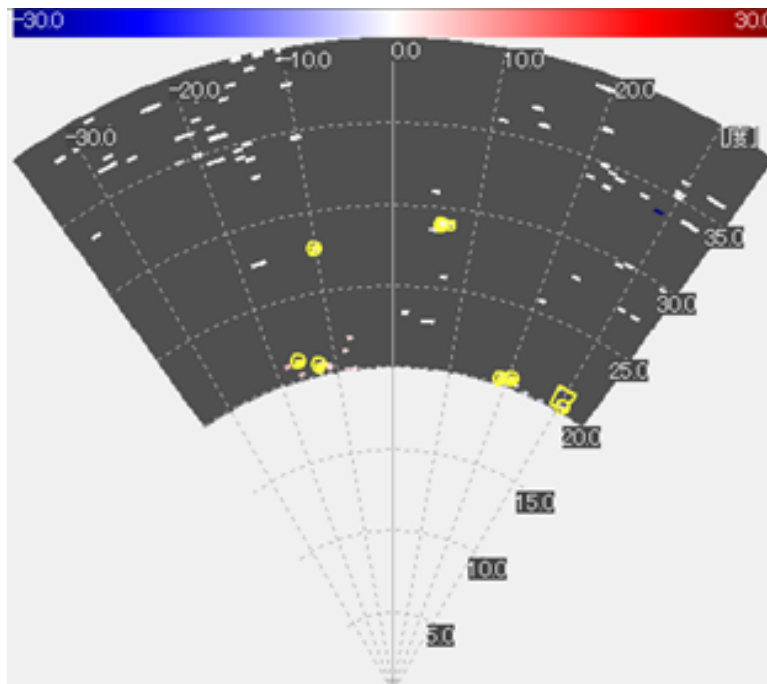


図 5.1.3-19 LR レーダーの検出例

<レーザーレーダーを用いた測定>

図 5.1.3-20 に写真を示す、Velodyne 社製のレーザーレーダーを測位データのリファレンスとして利用した。

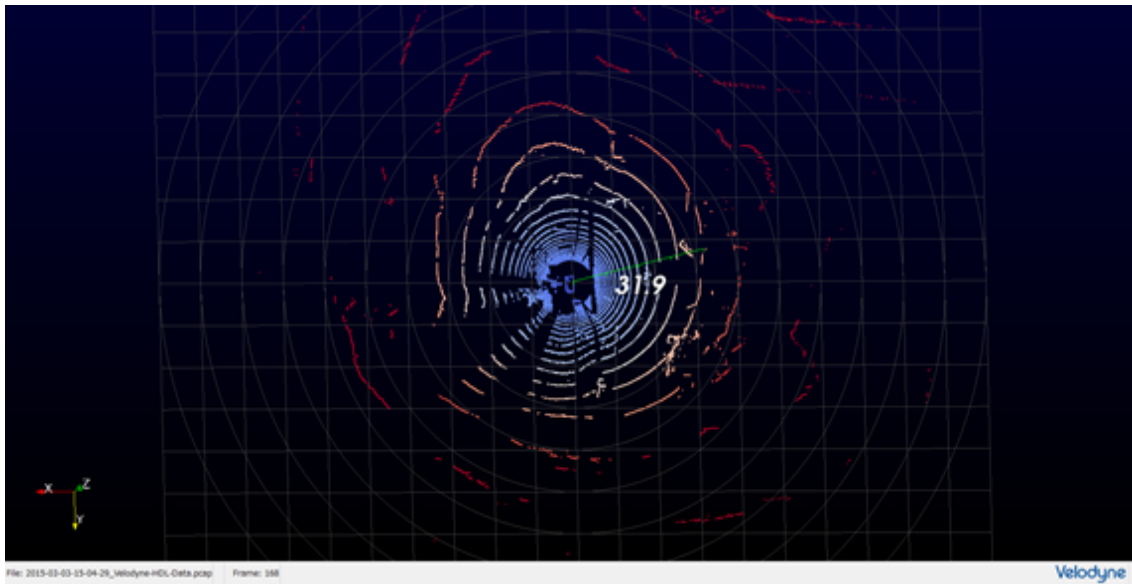
図 5.1.3-21 に示したカメラ映像に対するレーザーレーダーの測定結果を図 5.1.3-22 に示す。図 5.1.3-22 (a) は、レーザーレーダーが左折車両の後にいる歩行者を測定できた状況を示し、レーザーレーダーと歩行者との距離は 31.9m である。歩行者に対するレーザーレーダーの測定値は点群中の 1 点である。図からも分かるように 1 枚のレーザーレーダーフレームから歩行者を自動認識することはほぼ不可能である。図 5.1.3-22 (a) の認識結果は、人間が背景情報を把握した上で、複数のフレームを丁寧に追跡し、動きルートに従い歩行者を抽出した結果である。図 5.1.3-22 (b) では、同じフレームにある車両の位置を示す。車両は L 字の枠で示されている。車両とレーザーレーダーとの距離は 27.1m である。図 5.1.3-22 (c) は、その後レーザーレーダーにおいて発生したオクルージョンの状況を示す。レーザーレーダーから 32.6m 離れた所にいるはずの歩行者が車両にオクルージョンされ、測定できない状況となっている。



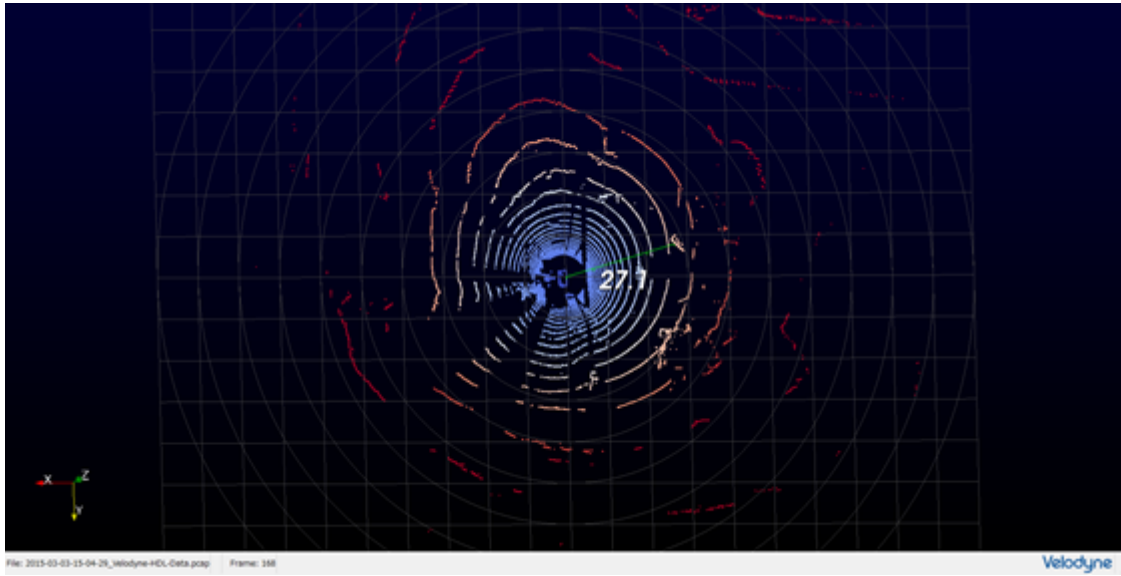
図 5.1.3-20 測位リファレンス用のレーザーレーダー
(左：長距離用、右：近距離用)



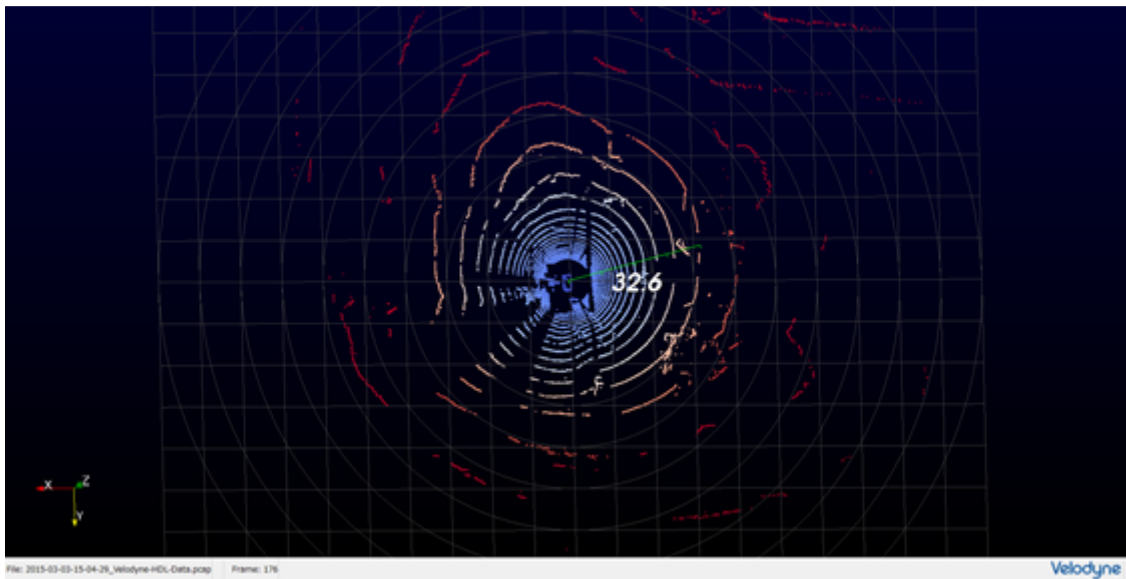
図 5.1.3-21 測定シーンのカメラ映像



(a)



(b)



(c)

図 5.1.3-22 レーザーレーダーの測定例

5.2. 技術課題イ) レーダー間干渉低減技術の開発

5.2.1. 取り組み内容

①耐干渉性能の実証実験

複数の搬送波周波数等を選択できる 79GHz 帯レーダーユニットを、基準の干渉信号源として導入することを検討する。その上で、インフラレーダーとして試作開発する小型の 79GHz 帯レーダーユニットが被る干渉特性について、実験室やテストコース等の再現性が確保された電波空間で実測する。

(該当物品費：79GHz 帯パルスレーダー装置、レーダー実験用調節治具、79GHz 帯レーダー標準リフレクタ)

(該当その他経費：伝搬シミュレーションソフトウェア、伝搬シミュレーションモデル作成、テストコース・試験設備期間借用、レーダー実験作業支援)

5.2.2. イ) -① 耐干渉性能の実証実験

(1) 交差点におけるミリ波帯伝搬のシミュレーション

インフラレーダーと車載レーダーの間の相互干渉は、周波数、時間が一致した場合だけでなく空間、つまり互いのアンテナ指向性が一致した場合に発生する。実環境では、路側に設置されるインフラレーダーユニットと自動車のバンパー内等に取り付けられる車載レーダーユニットとの位置関係やその向きによって、発生する干渉波のレベルが変動するようになる。

本研究開発では、実際の交差点環境での伝搬実験によってレーダー間の干渉評価を行っていく事前の検討として、ミリ波帯の電波伝搬特性を考慮した伝搬シミュレーションによる解析を実施する。この伝搬シミュレーションでは、実際の地物の形状をモデル化することで、路面による反射経路等を、効率的に解析、把握することができる。

図 5.2.2-1 に示すように、伝搬シミュレーションでは、パナソニック構内の交差点を対象として、地物や検出対象の形状をモデル化した上で、その材質に対するミリ波帯の比誘電率や導電率をパラメータとして与えている。また、79GHz 帯パルスレーダー装置に使用されるアンテナの指向性も考慮されている。その上で、レイトレース法によりミリ波帯の散乱特性を解析することで、3次元空間の伝搬経路を推定している。なお、この図において、すべてのレイ（橙色の線）が集約している点が、ミリ波レーダーユニットの取り付け位置である。

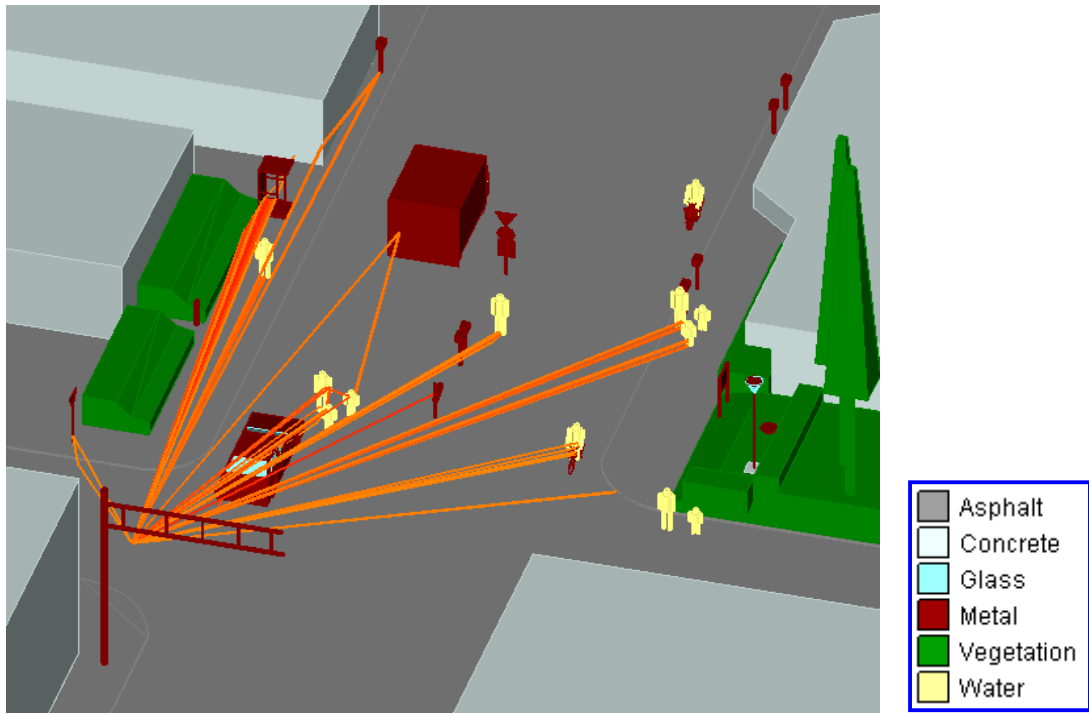


図 5.2.2-1 (a) レイトレース法による交差点環境の 3次元伝搬シミュレーション

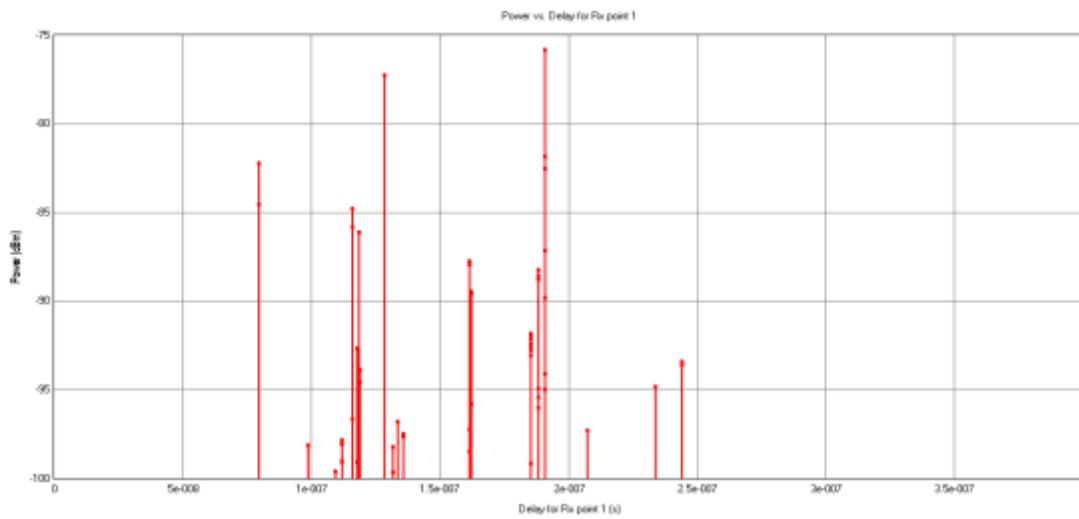


図 5.2.2-1 (b) 遅延 (距離) の電力プロファイル

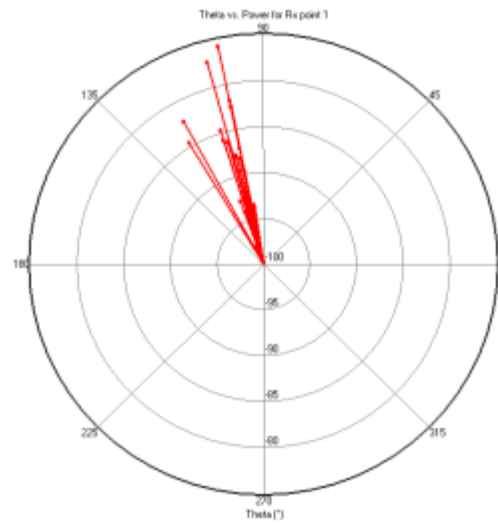
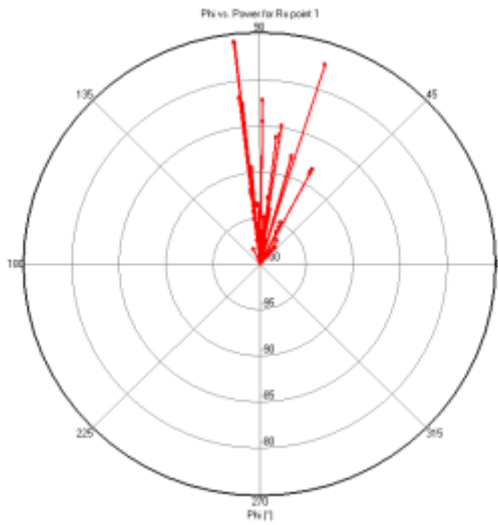


図 5.2.2-1 (c) 方位角の電力プロファイル

図 5.2.2-1 (d) 俯角の電力プロファイル

図 5.2.2-1 (b) は、図 5.2.2-1 (a) の 3 次元伝搬シミュレーションによって取得された、79GHz 帯レーダーのエコー（反射波）に関する遅延時間（伝搬距離）対受信電力のプロファイル推定結果を示している。また、図 5.2.2-1 (c) は、図 5.2.2-1 (a) の 3 次元伝搬シミュレーションによって取得された、79GHz 帯レーダーのエコー（反射波）に関する水平面の方位角対受信電力のプロファイル推定結果を示しており、同様にして、図 5.2.2-1 (d) は、この場合地上高 5m 程度に設置されているレーダーユニットから見た鉛直面の俯角対受信電力のプロファイル推定結果を示している。つまり、図 5.2.2-1 (b) から図 5.2.2-1 (d) の結果を 3 次元空間に投影したのが、図 5.2.2-1 (a) になっている。

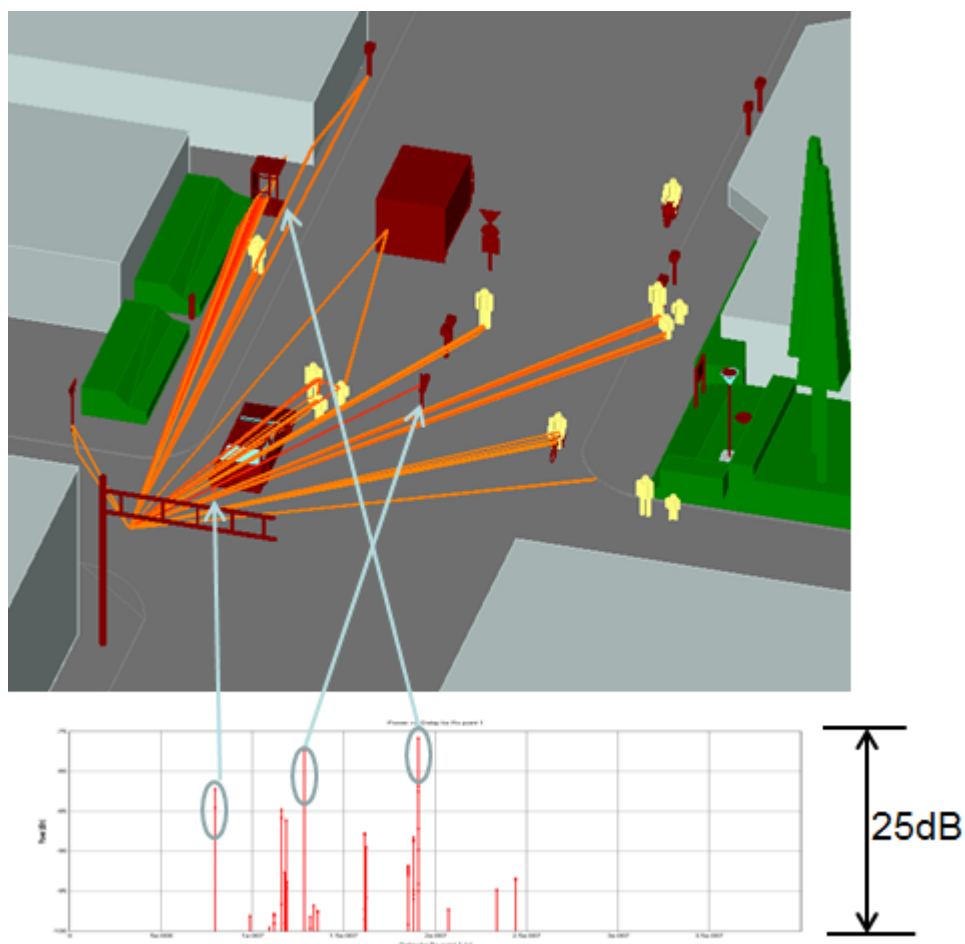


図 5.2.2-2 ミリ波レーダーの支配的なエコーとその散乱点の推定

ここで図 5.2.2-2 は、仮にレーダー装置のダイナミックレンジを狭めてみることで、支配的なエコーを解析した例である。つまり、この交差点環境では、静止物である金属製の入館カードリーダーや路面の反射波が再反射する車両の前面下部体等が、ミリ波レーダーで測定される強度の強いエコーだということが分かる。また、路面に直角する形状となる路肩からも背景クラッタとなるような強いエコーが発生することが分かる。

このように、交差点など実環境の伝搬特性を事前に傾向として把握できるだけでなく、79GHz 帯ミリ波レーダーによって実際に測定されるデータにおいて支配的なエコーの散乱点を推定することができる。

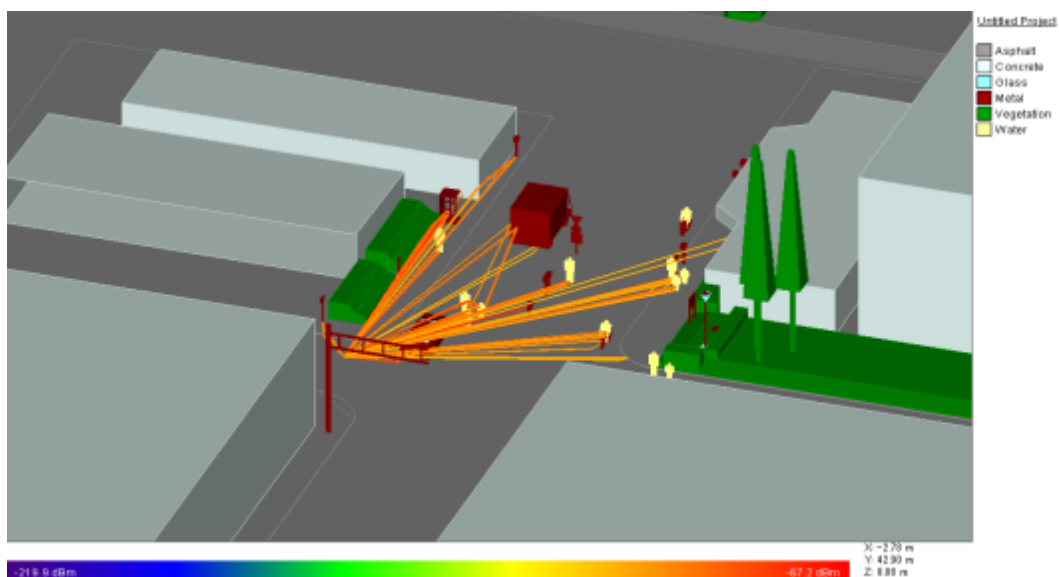


図 5.2.2-3 (a) 3次元伝搬シミュレーション (ダイナミックレンジ: 35dB)

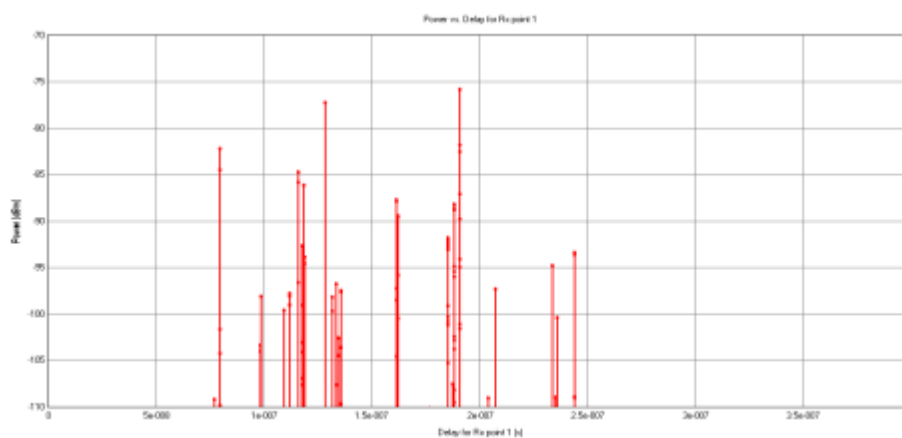


図 5.2.2-3 (b) 遅延 (距離) の電力プロファイル

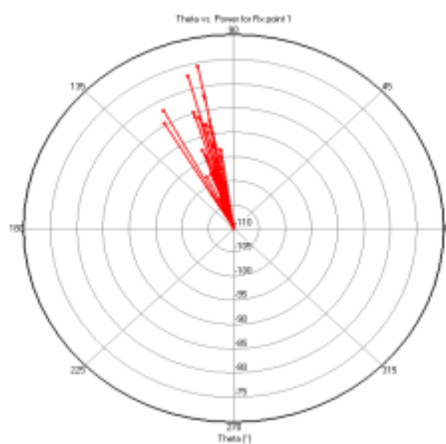


図 5.2.2-3 (c) 方位角の電力プロファイル

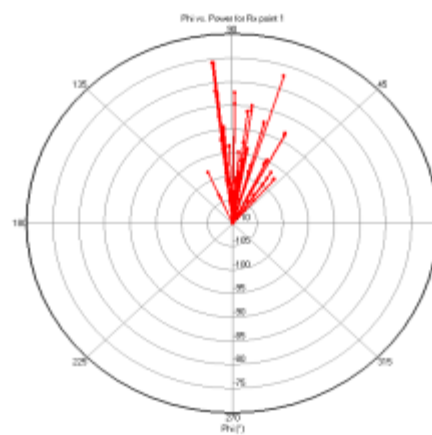


図 5.2.2-3 (d) 俯角の電力プロファイル

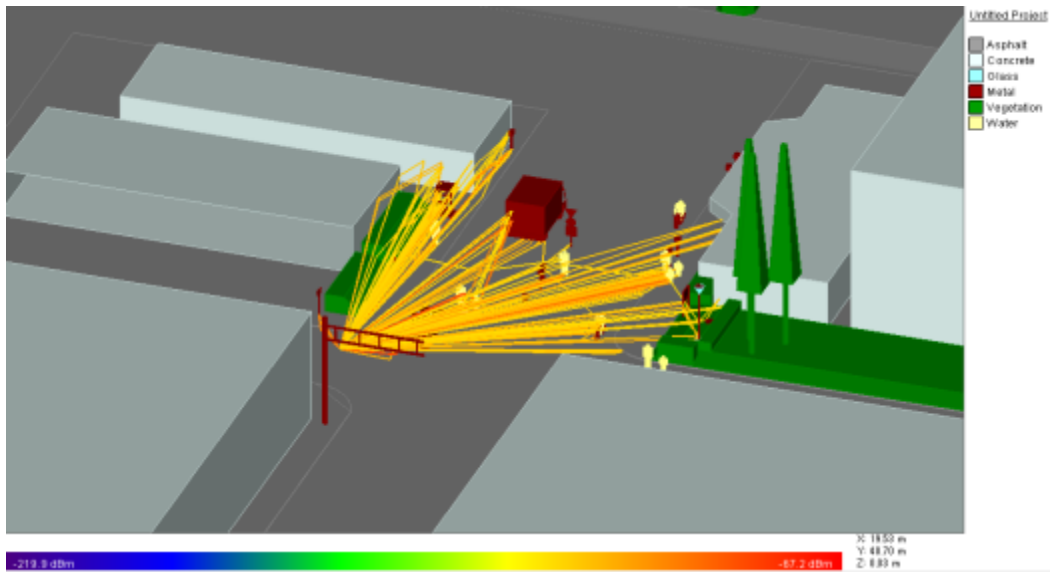


図 5.2.2-4 (a) 3次元伝搬シミュレーション (ダイナミックレンジ: 45dB)

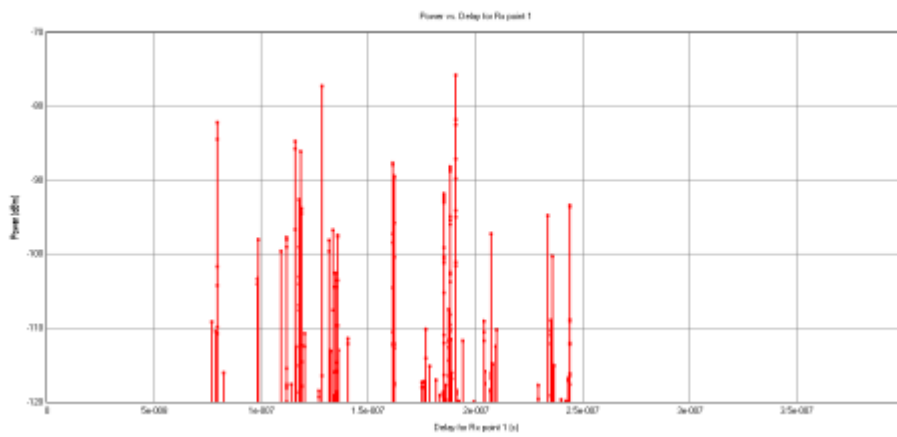


図 5.2.2-4 (b) 遅延 (距離) の電力プロファイル

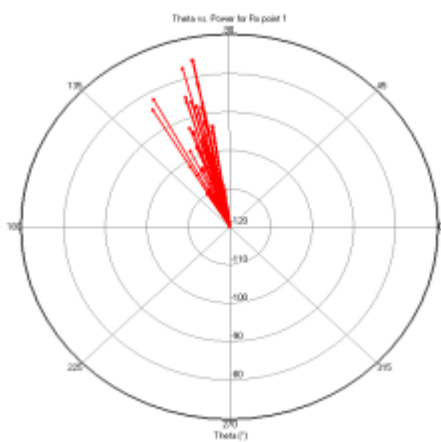


図 5.2.2-4 (c) 方位角の電力プロファイル

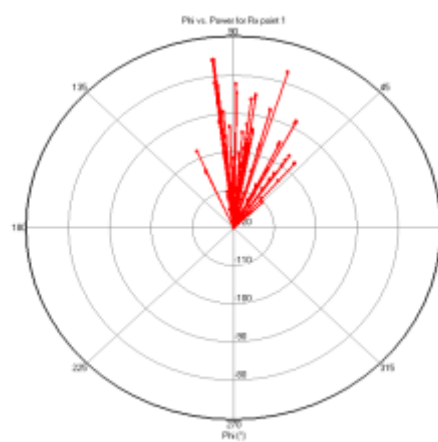


図 5.2.2-4 (d) 俯角の電力プロファイル

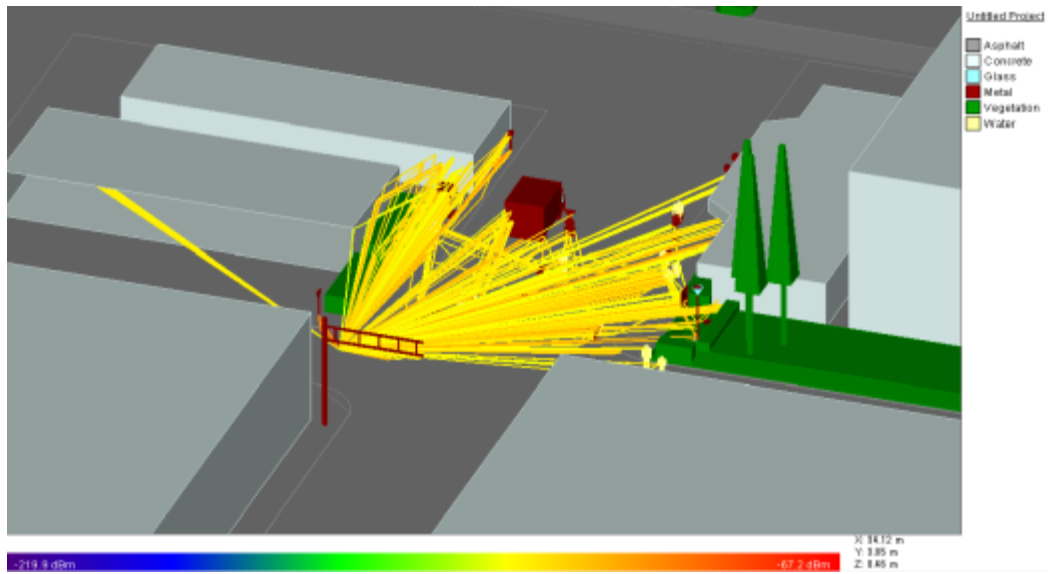


図 5.2.2-5 (a) 3次元伝搬シミュレーション (ダイナミックレンジ: 55dB)

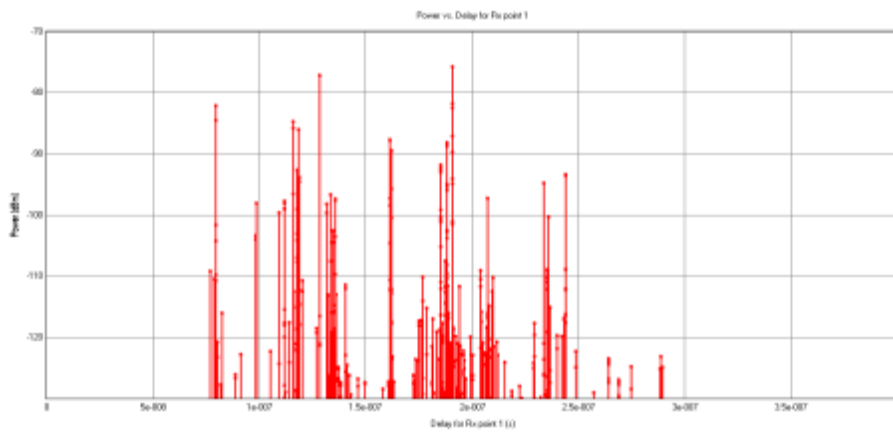


図 5.2.2-5 (b) 遅延 (距離) の電力プロファイル

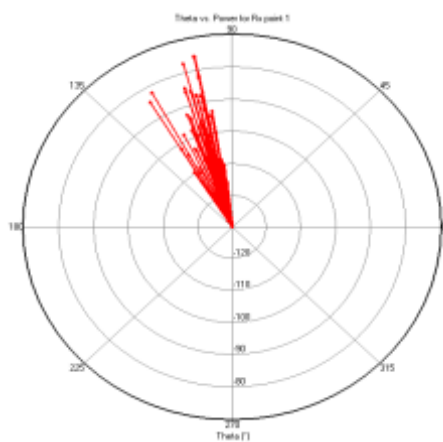


図 5.2.2-5 (c) 方位角の電力プロファイル

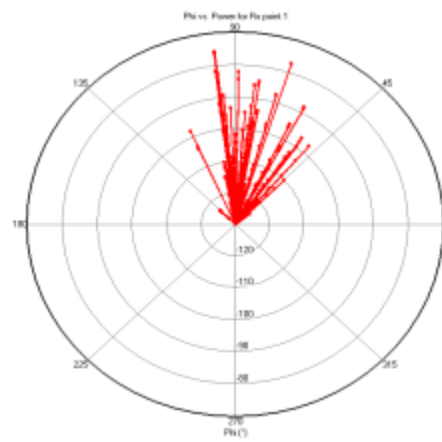


図 5.2.2-5 (d) 俯角の電力プロファイル

図 5.2.2-3～図 5.2.2-5 には、レーダー装置のダイナミックレンジを 10dB 毎に増やしていった場合について、地上高 5m 程度の 79GHz 帯ミリ波レーダーが測定するエコープロファイルの変化を示している。これら結果から分かることは、所謂レーダーの感度を高めてダイナミックレンジを増やしていくと、より遠方の歩行者や自転車が検出できる可能性が高まる一方で、比較的近距离のエリアでは支配的なエコーだけでなく多数の散乱波も観測されるようになることが分かる。

ミリ波レーダーによって対象物を分離、検出するためには、レーダー装置の内部ノイズだけでなく、このような背景ノイズと見なせる散乱波への対策が課題となる。つまり、背景ノイズを抑圧する、もしくは検出処理時のエコー強度に対する閾値を最適化するといったアルゴリズムの検討が必要になる。このアルゴリズム検討では、降雨時や降雪時の背景ノイズの変化を考慮することで、より実用性の高い技術を確立することができるため、技術課題ウ) 耐環境性能補償技術の開発において取り組む予定となっている。

以上のように、平成 26 年度は、実際の交差点を対象として、ミリ波レーダーに使用されるアンテナ指向性と考慮した伝搬シミュレーションを実施することで、路面や路肩等における散乱特性を把握した。これにより、ミリ波レーダーエコーの振る舞いに支配的であり、見通し伝搬経路以外に考慮する必要がある地物等を推定することができたため、次年度以降に実施する予定の干渉評価実験に向けた知見を得ることができた。

(2) 屋内環境におけるレーダー間干渉基礎実験

インフラレーダーとして試作開発する小型の 79GHz 帯レーダーユニットは、所謂レンジサイドローブ抑圧特性に優れる相補符号化パルス方式を採用している。

図 5.2.2-6 に示すように、このレーダー方式は、送信側で、符号化されたパルス系列に対して位相回転を与えた上で、受信側でコヒーレント積分を実行することにより、ミリ波帯 RF 回路や広帯域アナログ信号処理回路で生じる DC オフセットなどの影響を抑える工夫がなされている。結果として、この符号化パルスレーダー方式では、符号拡散利得と位相回転を含むコヒーレント加算利得等による 60dB 程度の信号処理利得が実現ようになる。したがって、同一周波数帯を使用する他のレーダーからの干渉波に対しても、理論的には、この利得に相当するだけの干渉抑圧効果が期待される。

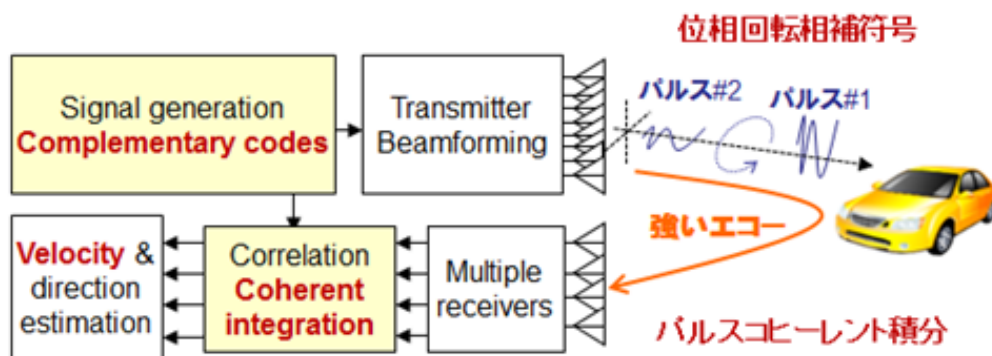


図 5.2.2-6 位相回転とコヒーレント積分を含む符号化パルス方式

以下に示す図 5.2.2-7 (a) は、実験室内において、擬似的に強い干渉波が到来するようにした条件を作り出した上で、レーダー検出結果としてこの干渉波がどのように観測されるかを確認した画像を示している。この干渉実験では、79GHz 帯における同一の搬送波を使用し、同一の符号系列を送信するように設定された 2 台のレーダー装置を使用した。これら 2 台の 79GHz 帯を使用したレーダー装置は、図 5.2.2-7 (a) の画像において、手間と左奥にそれぞれ距離 5m 程度を離して置かれている。

このような実験条件の下で、手前側のレーダー装置が、左奥側にある別のレーダー装置から送信信号である干渉波を観測したレーダープロファイルの測定結果が、図 5.2.2-7 (b) の電力プロファイルおよび図 5.2.2-7 (c) のドップラープロファイルである。これら図から分かるように、この実験環境では、2 台のレーダー装置から最も近い距離に存在する「柱」で反射されたとみられる強い干渉波が実測されている。特に、図 5.2.2-7 (c) から分かるように、79GHz 帯ミリ波レーダーの干渉波は到来方向とドップラー周波数の領域において、偏りの在る傾向を示すことが確認できる。

以上のように、屋内環境において擬似的に強干渉波が到来する条件（同一搬送波、同一符号化の条件）を生成して、79GHz 帯のレーダーによる方向とドップラーの推定により、干渉波に特有の振る舞いを定性的に把握することができた。つまり、干渉波は、到来方向とドップラー周波数において、偏りの在る分布の傾向を示すことが実測によって確認された。

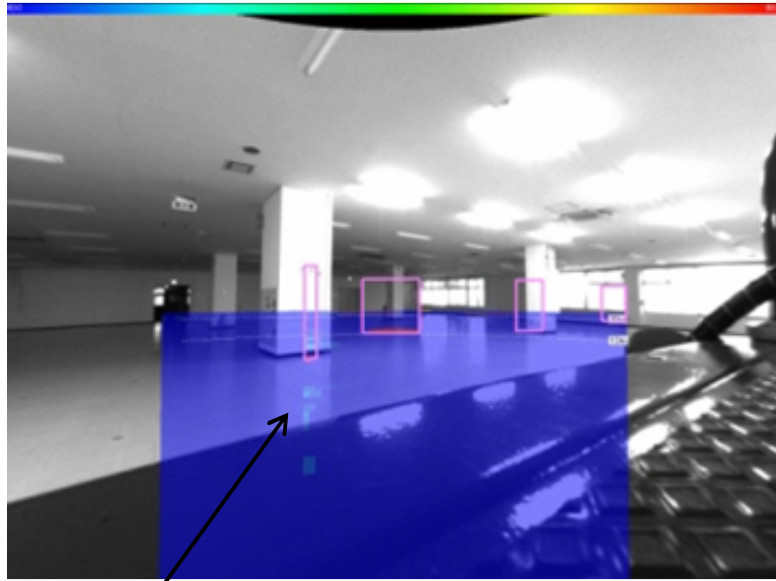


図 5.2.2-7 (a) レーダー検出結果

柱の方向から
干渉波が到来

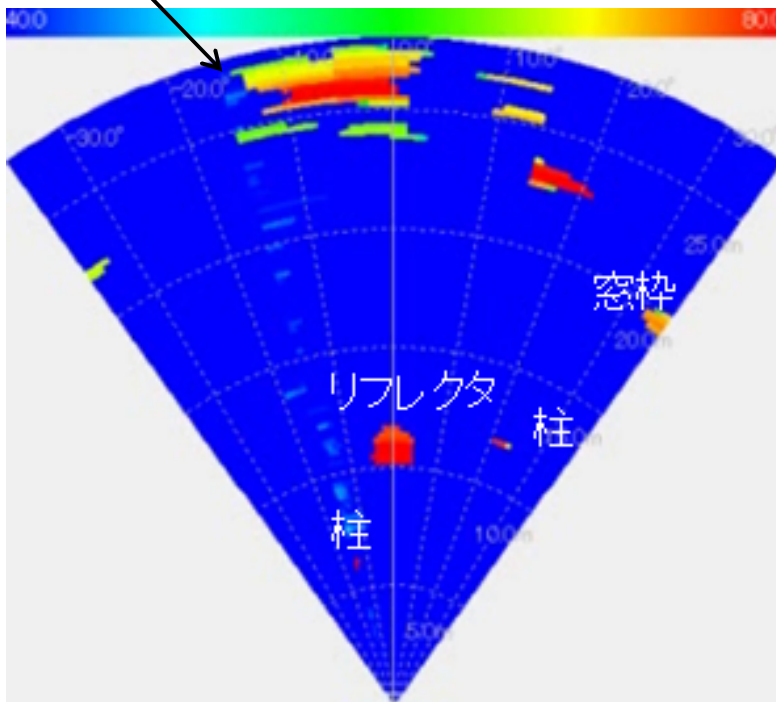


図 5.2.2-7 (b) 電カプロフィール

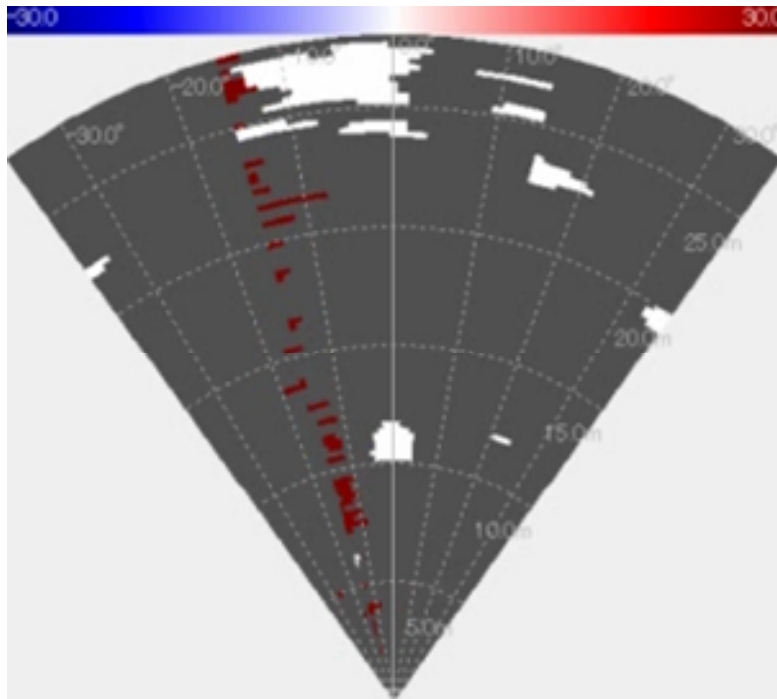


図 5.2.2-7 (b) ドップラープロファイル

図 5.2.2-7 屋内環境における 79GHz 帯レーダー間干渉波の測定データ

次に、符号化パルス方式が実装された 79GHz 帯パルスレーダー装置を用いて、より定量的な耐干渉性能評価を実施したので、その評価実験結果について詳細に報告する。

<与干渉用の 79GHz 帯レーダー>

79GHz 帯パルスレーダー装置が被る干渉特性を実測するために、車載レーダー等の他レーダーシステムを模した与干渉源として、総務省委託「79GHz 帯レーダーシステムの高度化に関する研究開発」において取得された 79GHz 帯広角走査実証 RF 装置を利用している。

与干渉源とする 79GHz 帯広角走査実証 RF 装置の外観を図 5.2.2-8 に示す。また、79GHz 帯広角走査実証 RF 装置は、搬送波周波数を 78GHz、79GHz、80GHz に切り替えることが可能である。また、図 5.2.2-9 に送信アレイアンテナ 8 素子を合成したビームパターンを図示しており、ビームの半値角は約 12 度である。

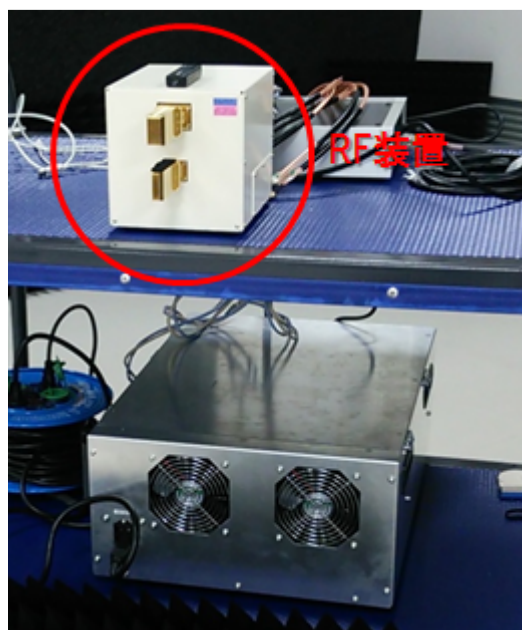


図 5.1.2-8 与干渉源とする 79GHz 帯広角走査実証 RF 装置の外観

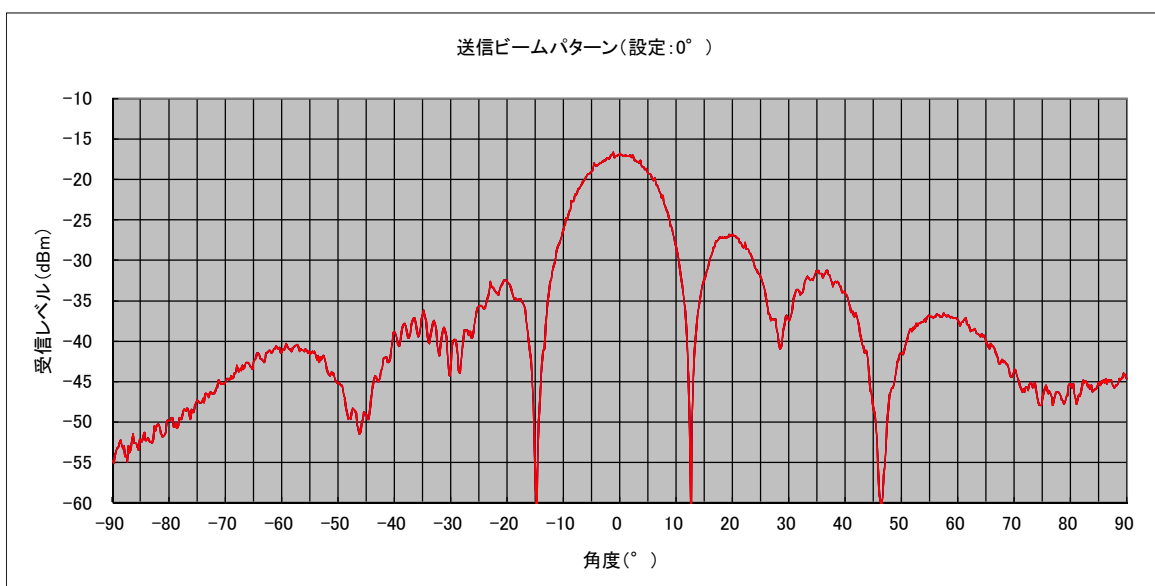


図 5.1.2-9 79GHz 帯広角走査実証 RF 装置の送信ビームパターン (8 素子合成)

<レーダー間干渉実験の実験環境>

レーダー間干渉実験時のデータ測定環境を図 5.2.2-10 に示す。図に示すように、与干渉用レーダーと被干渉レーダーである 79GHz 帯符号化パルスレーダー装置を正対させた上で、約 10m 離して設置した。また、79GHz 帯パルスレーダー装置から見た与干渉用レーダー後方の壁面までの距離は約 14m であった。なお、79GHz 帯パルスレーダー装置の偏波面と与干渉用レーダーの偏波面をそろえるため、与干渉用レーダーは RF 装置を 90 度回転させて設置している。

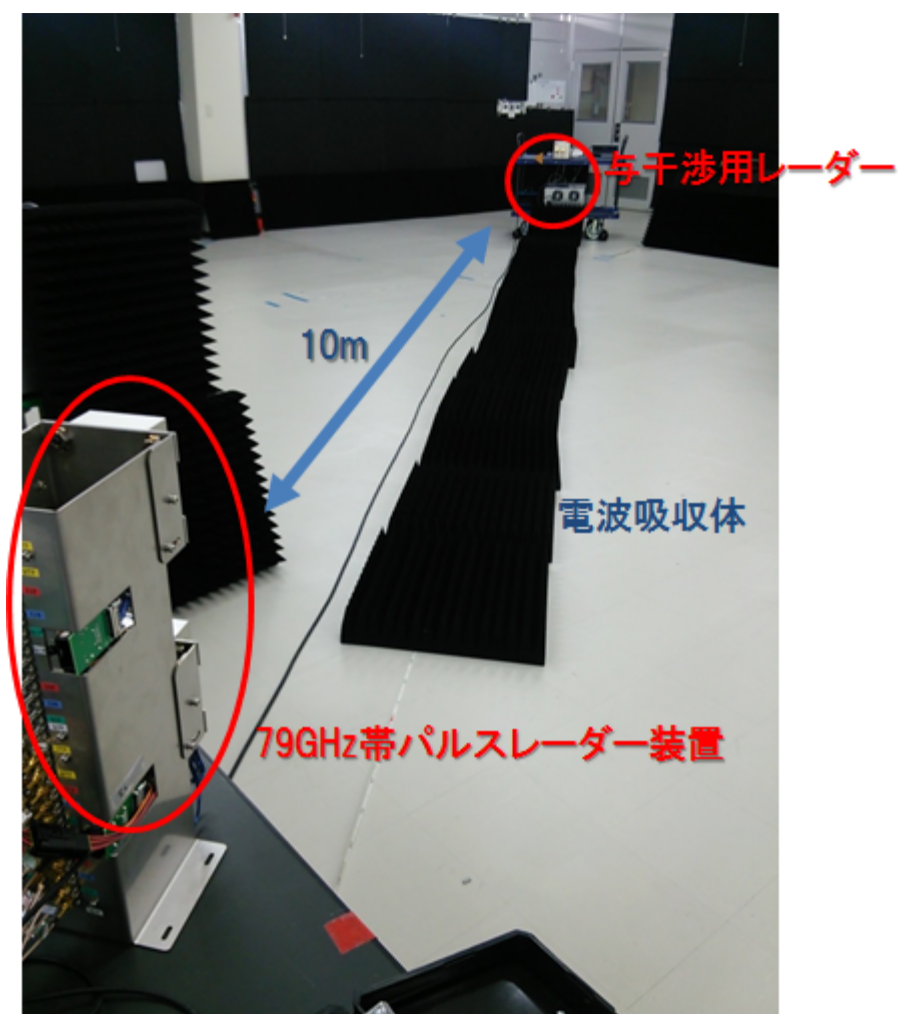


図 5.2.2-10 レーダー間干渉実験時のデータ測定環境

また、図 5.2.2-10 に示すように、79GHz 帯パルスレーダー装置はレーダーモジュールの俯角を変えて測定できる機構にしており、レーダーモジュールの垂直面のビームパターンに基づいて、レーダー間干渉の空間的な相関性を定量評価できる実験系になっている。

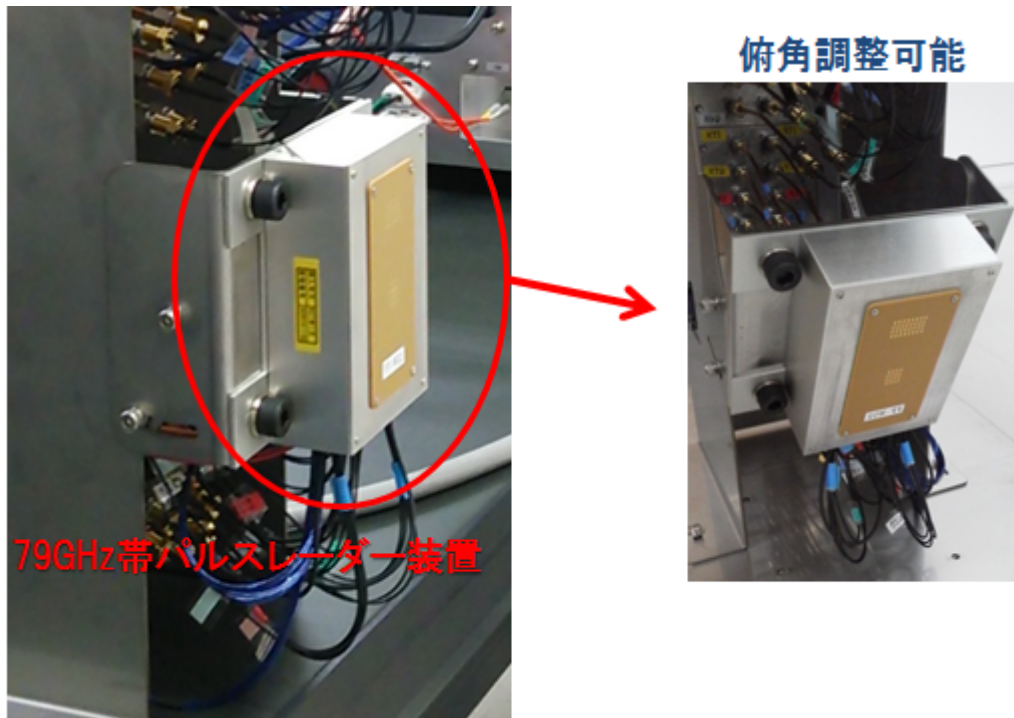


図 5.2.2-10 79GHz 帯パルスレーダー装置のレーダーモジュール俯角調整機構

<レーダー間干渉実験における測定結果 >

はじめに、与干渉用レーダーからの電波の発信が無い状態において、79GHz 帯パルスレーダー装置が出力した反射（エコー）強度の測定結果を図 5.2.2-11 に示す。図は横軸に方位、縦軸に距離、色づけはデシベル値による反射レベルを示した、方位-距離の反射強度分布である。10m 付近の正面（0 度）方向に確認できる比較的強いレベルの反射は与干渉レーダー装置の筐体で生じている。また、14m 付近の正面方向からの反射は壁面で生じている。つまり、与干渉用レーダーを動作させない条件では、この図のような物体の存在が確認できる反射強度分布となる。

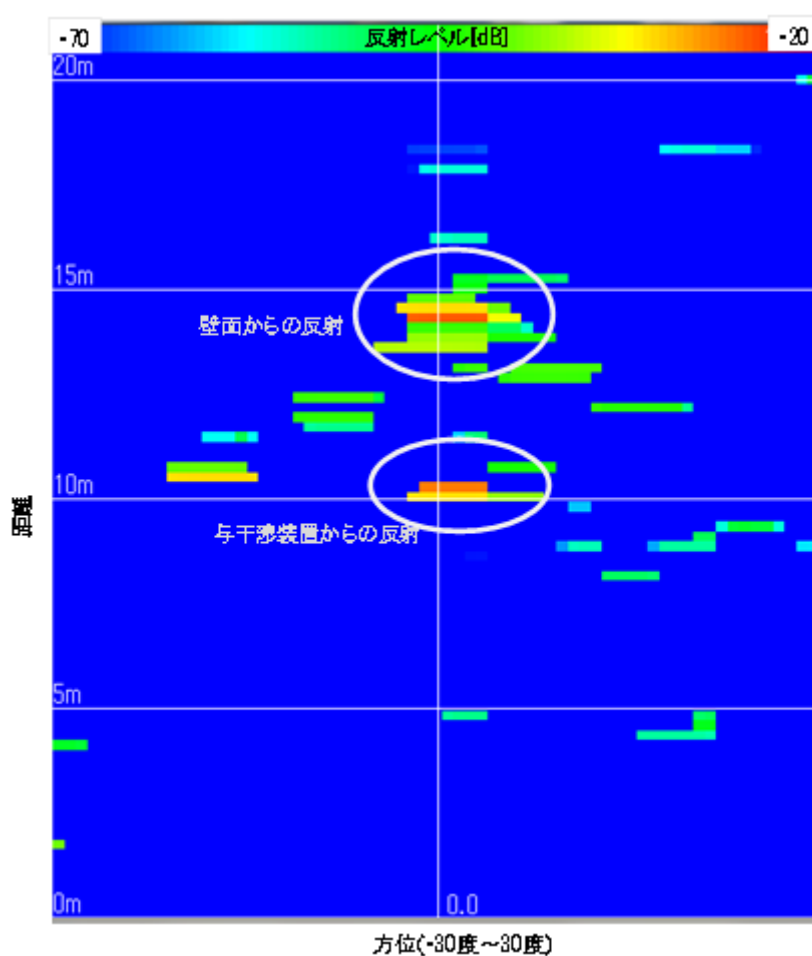


図 5.2.2-11 方位-距離の反射強度分布

(79GHz 帯パルスレーダー装置レーダーモジュールの俯角 0 度、干渉源送信無し)

次に、与干渉用レーダーから被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置と同じ搬送波周波数で、同じ符号化パルスと同じ周期で送信する条件において、79GHz 帯パルスレーダー装置が出力した反射強度の測定結果を図 5.2.2-12 に示す。与干渉用レーダーが動作していない場合の図 5.2.2-11 と比較すると、与干渉用レーダー装置を設置した正面方向にノイズレベルの上昇が確認された。しかしながら、このような非常に厳しい干渉発生条件のものであっても、与干渉用レーダーの存在およびその後方の壁面の存在は確認できた。

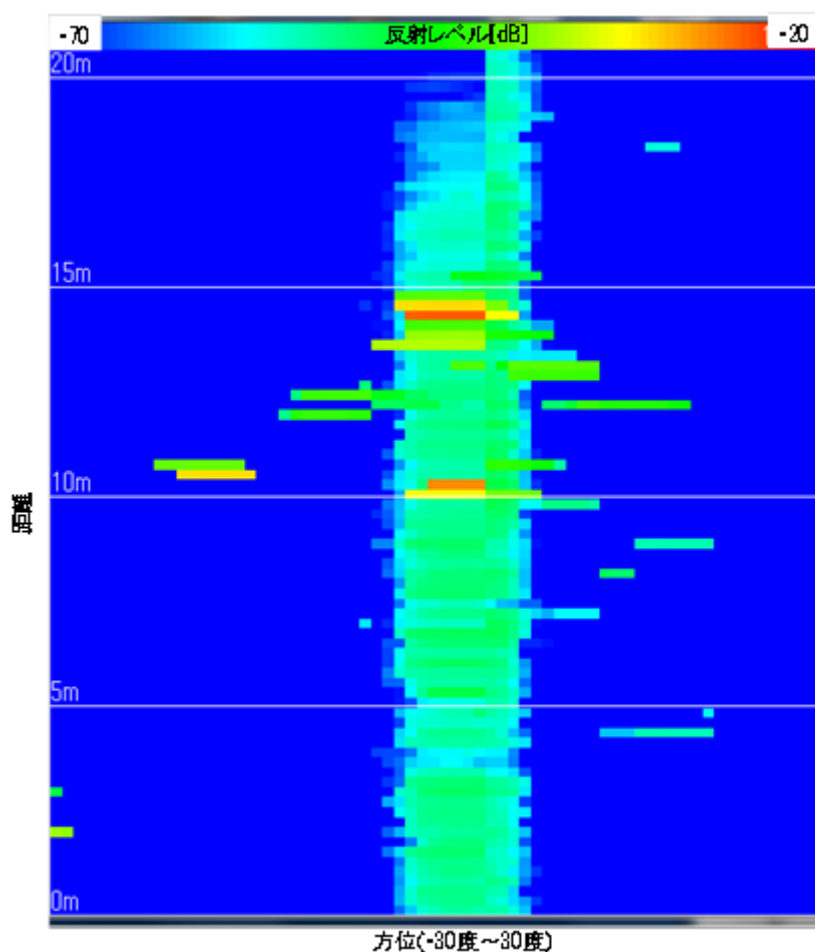


図 5.2.2-12 方位-距離の反射強度分布
(干渉源が同じ周波数、同じ周期でパルスを送信する条件)

その次に、与干渉用レーダーから送信している 79GHz 帯パルスレーダー装置と同じ周波数、同じ符号化パルスを異なる周期で送信する条件（79GHz 帯パルスレーダー装置のパルス送信周期を 2.5 倍程度に設定した）において、79GHz 帯パルスレーダー装置が出力した反射強度の測定結果を図 5.2.2-13 に示す。図 5.2.2-12 と比較すると、干渉によって生じるノイズフロアの上昇が相対的に減少していることが確認された。

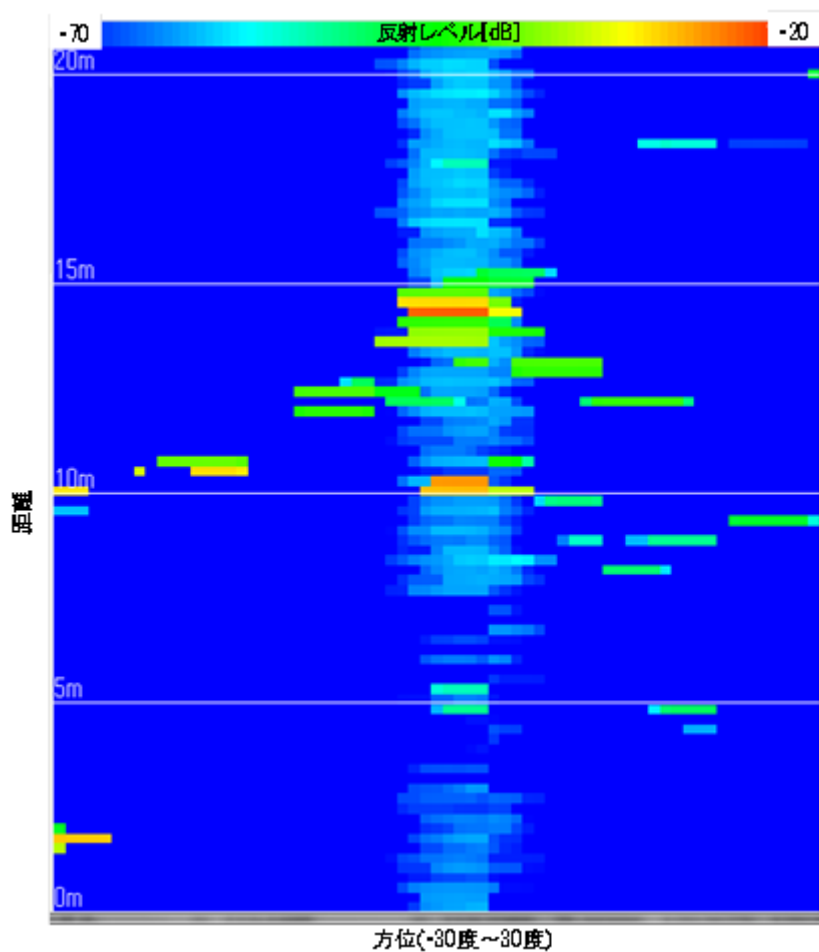


図 5.2.2-13 方位・距離の反射強度分布
(干渉源が同じ周波数だが異なる周期でパルスを送信する条件)

ここまでに述べた、与干渉用レーダーからの電波の発信が無い状態、および与干渉用レーダーから被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置と同じ周波数で、同じ符号化パルスを送信した条件と、パルスの送信周期を変えた条件の各々について、被干渉レーダーが測定した遅延プロファイルを図 5.2.2-14 に示す。

この図から、非常に厳しい干渉条件である、距離約 10m で正対設置された与干渉用レーダーからの同じ周波数、同じ周期のパルス送信によって、被干渉側レーダーで測定される遅延プロファイルのノイズフロアが 10dB 程度、上昇していることを確認した。また、距離にもよるが、パルスの送信周期が互いに異なるような条件にすることで、干渉によるノイズフロア上昇を 5dB~10dB 程度抑圧できることも確認した。

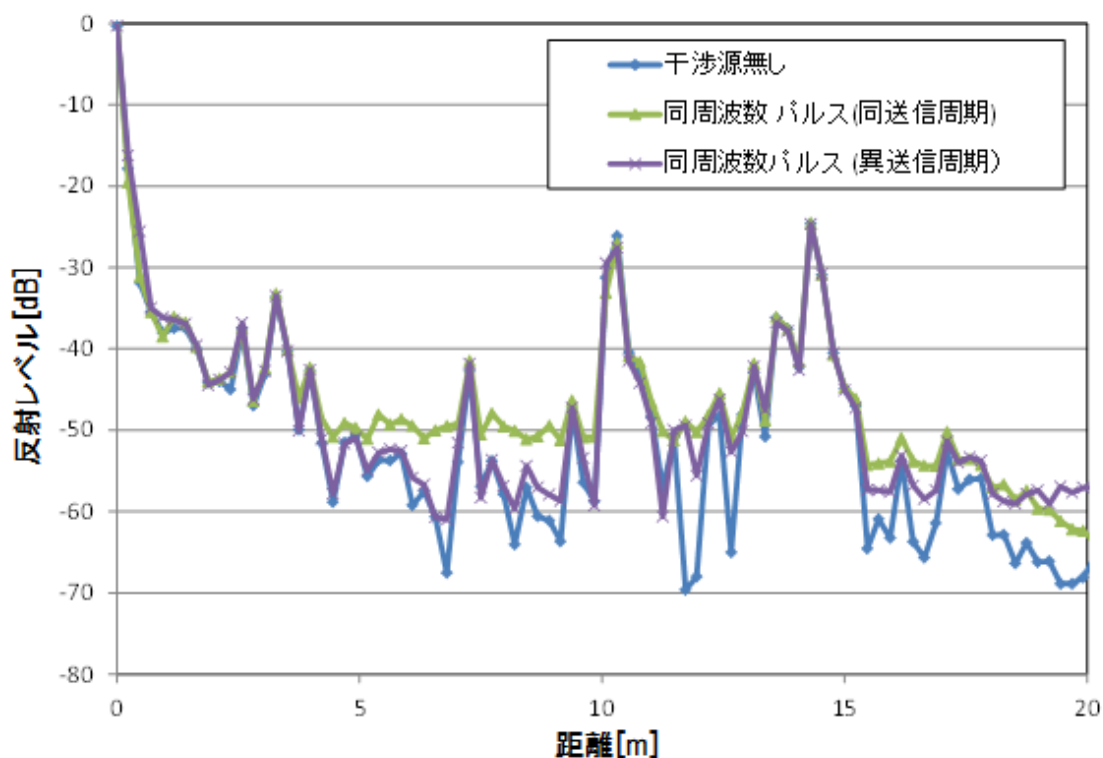


図 5.2.2-14 遅延プロファイルを用いた干渉信号の違いによる特性比較
(干渉源無しの場合および送信パルスの周期を変えた各条件)

次に、与干渉用レーダーから、被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置と同じ符号化パルスと同じ周期で送信する条件において、被干渉側のレーダーモジュールの俯角を 5 度ずつ可変しながら 79GHz 帯パルスレーダー装置で取得された反射強度の測定結果を、図 5.2.2-15 から図 5.2.2-21 に示す。レーダーモジュールの俯角を大きくしていくことで、干渉によるノイズフロアが減少していくことを確認した。

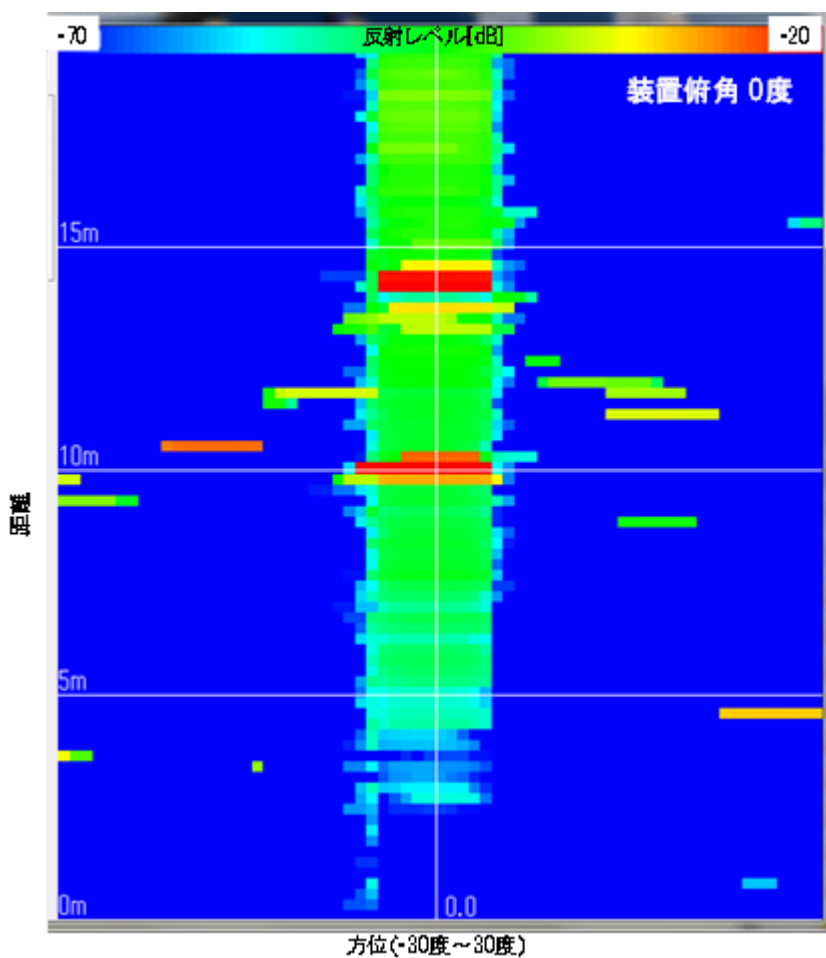


図 5.2.2-15 方位・距離の反射強度分布

(干渉源が同じ周波数、同じ周期でパルスを送信する条件で、79GHz 帯パルスレーダー装置レーダーモジュールの俯角 0 度)

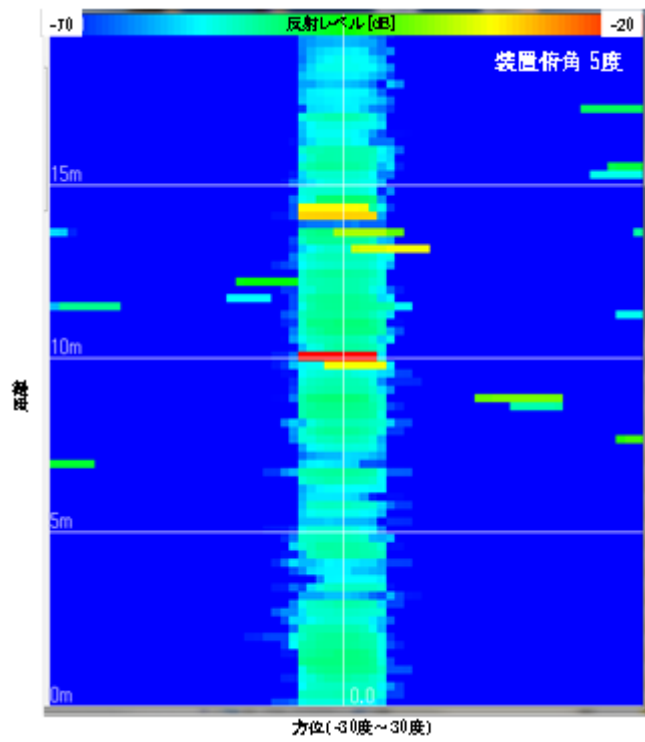


図 5.2.2-16 方位・距離の反射強度分布 (俯角 5 度)

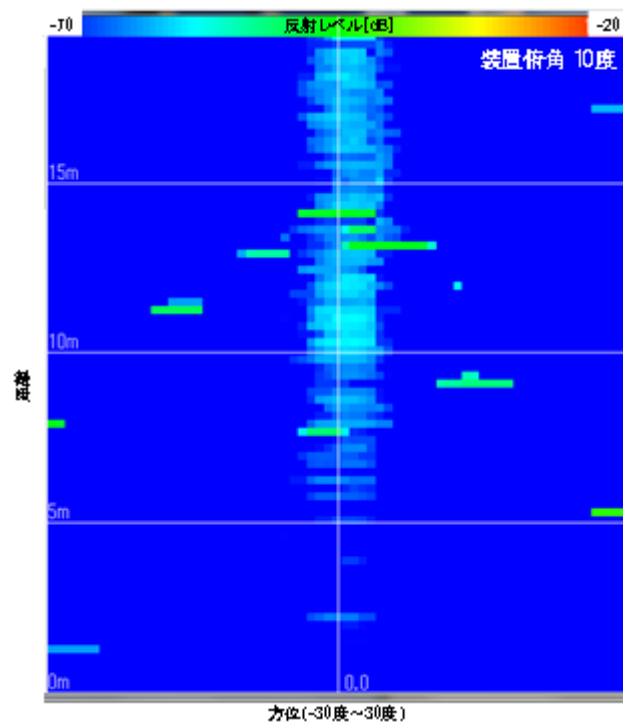


図 5.2.2-17 方位・距離の反射強度分布 (俯角 10 度)

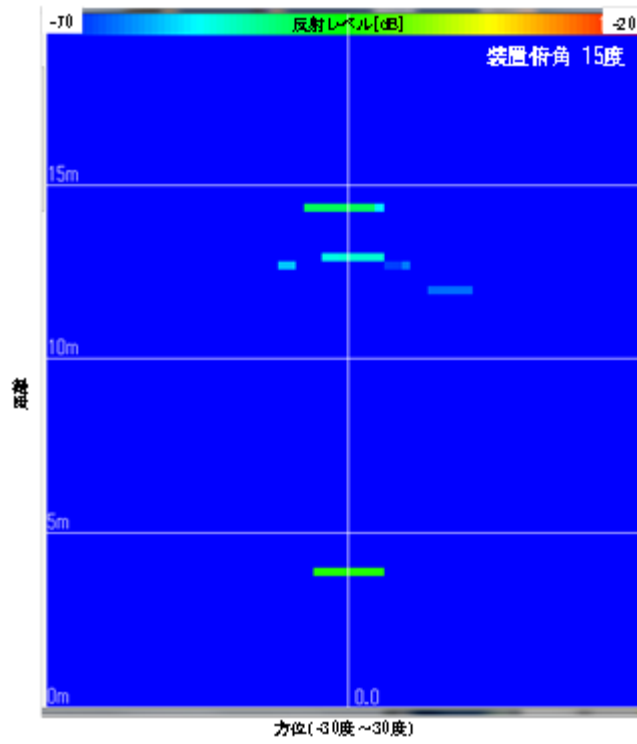


図 5.2.2-18 方位・距離の反射強度分布 (俯角 15 度)

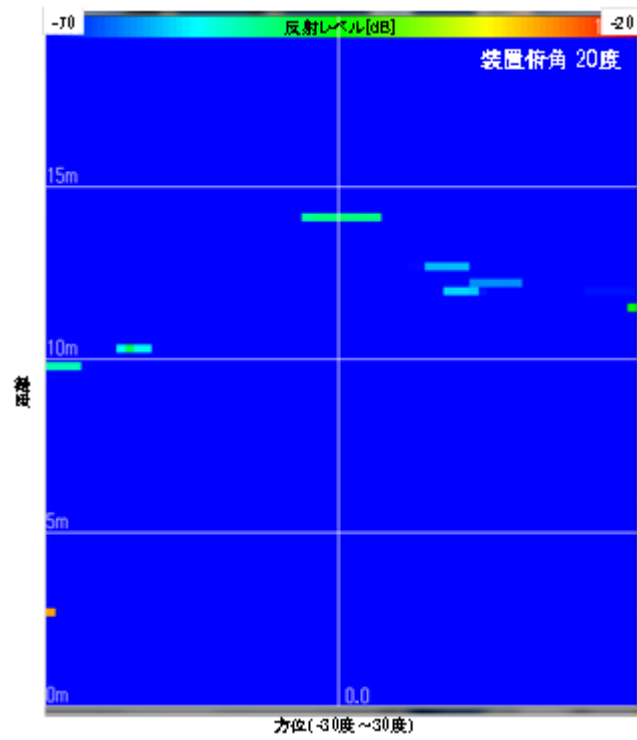


図 5.2.2-19 方位・距離の反射強度分布 (俯角 20 度)

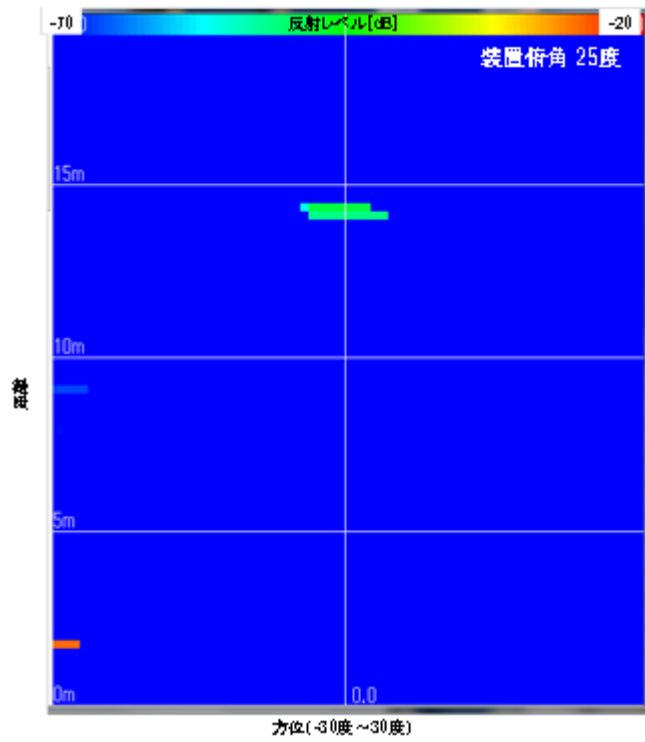


図 5.2.2-20 方位・距離の反射強度分布 (俯角 25 度)

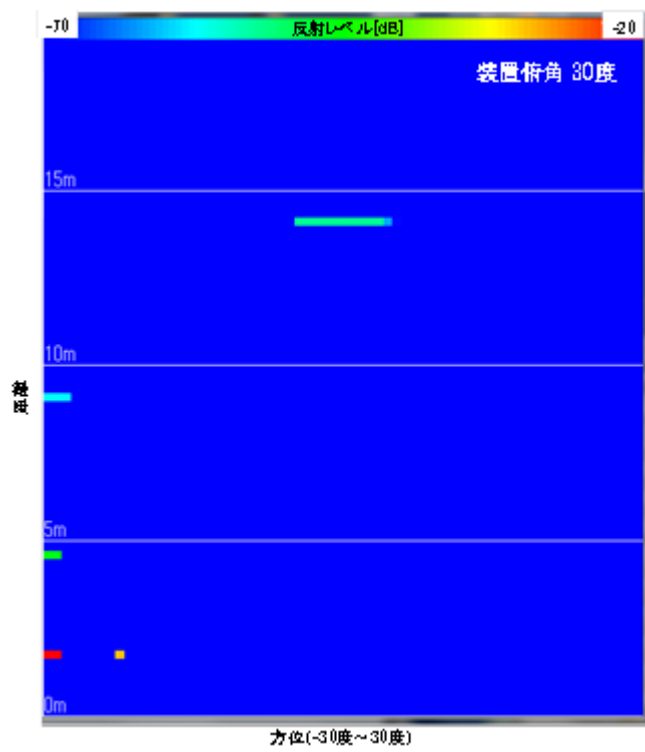


図 5.2.2-21 方位・距離の反射強度分布 (俯角 30 度)

図 5.2.2-22 には、ここまでに述べた、与干渉用レーダーから被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置と同じ符号化パルスと同じ周期で送信する条件において、レーダーモジュールの俯角を変えながら、被干渉レーダーが測定した各々の遅延プロファイルを示している。また、図 5.2.2-23 には本干渉実験に使用した被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置において、79GHz 帯レーダーモジュールに実装されている受信用平面アレイアンテナの垂直面（YZ 面）ビームパターンを示している。

図 5.2.2-23 のビームパターンを踏まえて図 5.2.2-22 を眺めると、干渉信号によって生じるノイズフロアは、レーダーモジュールの俯角によって変化するが、これは干渉波の到来方向に対する被干渉側アンテナのビームパターンと相関があることが分かる。

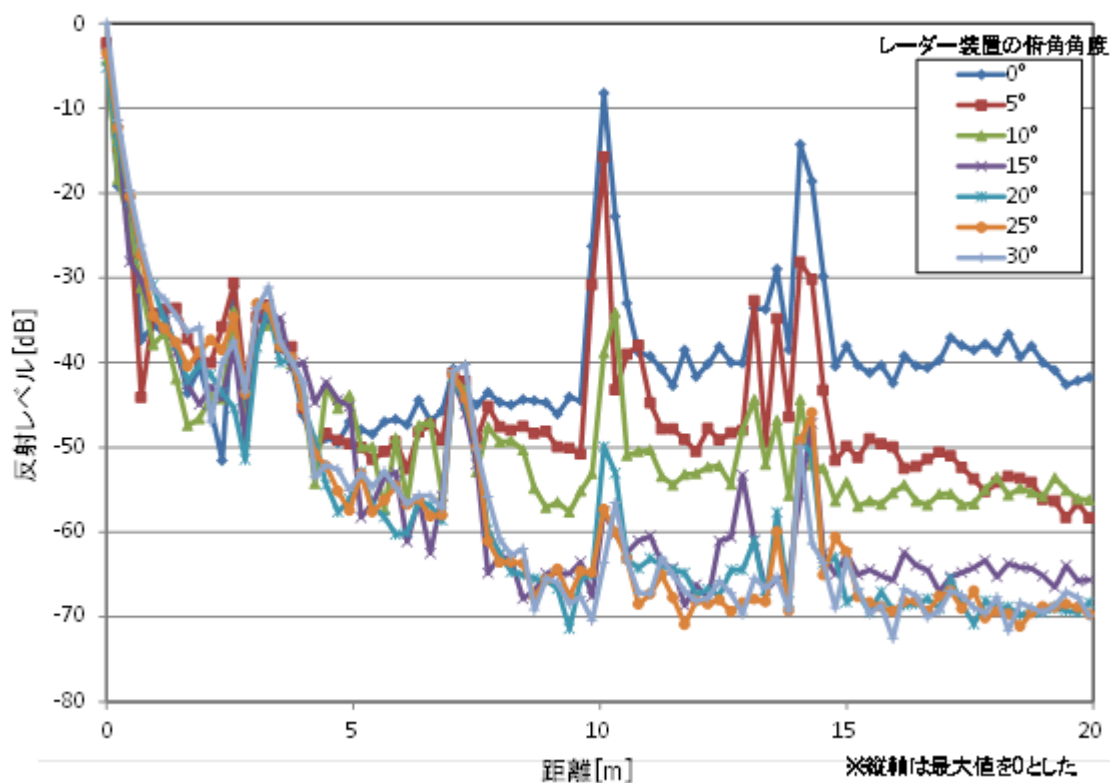


図 5.2.2-22 遅延プロファイルを用いたアンテナ俯角の違いによる特性比較
 (干渉源が同じ周波数、同じ周期でパルスを送信する条件、
 79GHz 帯パルスレーダー装置レーダーモジュールの俯角を変えた各条件)

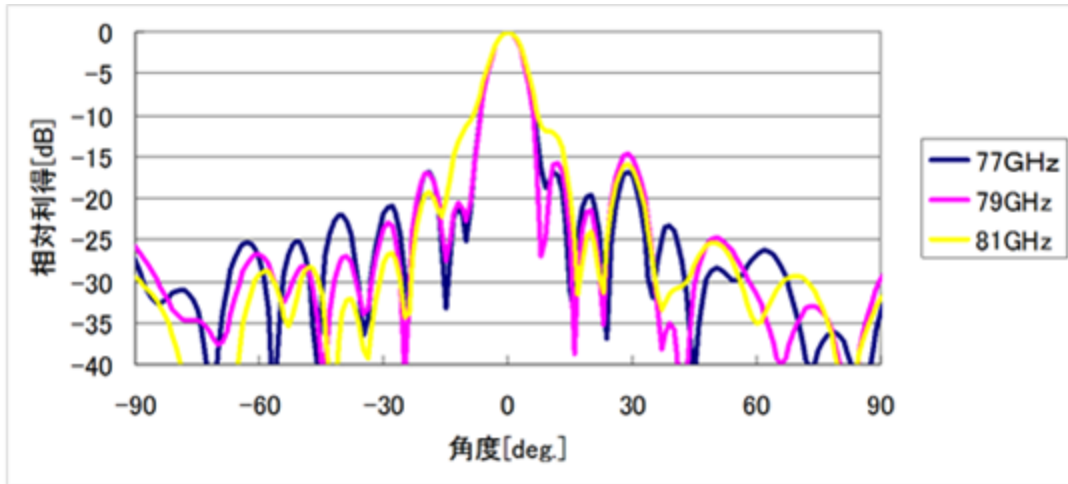


図 5.2.2-23 79GHz 帯レーダーモジュールの垂直面ビームパターン

さらに、図 5.2.2-24 には、与干渉用レーダーと被干渉側の 79GHz 帯パルスレーダー装置の搬送波周波数を 2GHz シフトした場合の反射強度分布（右図）を、同じ搬送波周波数とした場合の反射強度分布（左図）と比較して示している。この図から確認できるように、占有帯域幅以上に搬送波周波数をシフトすることで、干渉によるノイズレベル上昇は発生しなくなる。

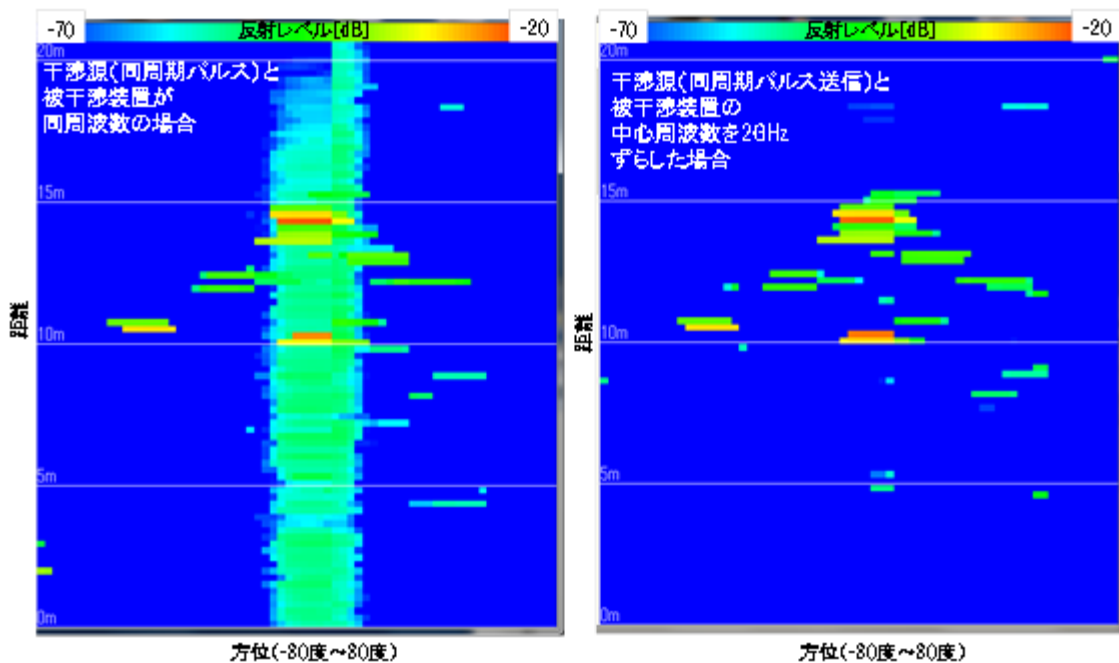


図 5.2.2-24 干渉源の周波数を変更した場合の方位・距離の反射強度分布（干渉源は同送信周期のパルス列を送信。左：同周波数、右：別周波数）

<干渉基礎実験のまとめと考察>

平成 26 年度に開発試作した 79GHz 帯パルスレーダー装置に対し、既得の 79GHz 帯広角走査実証 RF 装置を干渉源として用いて、屋内環境におけるレーダー間干渉の基礎実験を実施した。

距離 10m の近接した条件における 79GHz 帯レーダー間の干渉影響としては、与干渉用レーダーが、被干渉側と同じ周波数、同じ符号化パルスと同じ周期で送信する条件では、ノイズレベルを 10dB 程度まで上昇させることが確認された。また、同じ周波数、同じパルス波形であっても、互いに異なる周期でパルス列を送信する条件とすることで、干渉によるノイズレベルの上昇を 5dB~10dB 程度まで抑圧できることを確認した。さらに、干渉によって生じるノイズは、対向させた与干渉レーダーと被干渉レーダーの設置角度により変化し、そのレベルは被干渉側の 79GHz 帯レーダーモジュールのアンテナビームパターンと相関性が高いことも確認した。

今回の実験結果を踏まえると、互いのレーダー間干渉を低減、回避するためには、使用周波数をシフトする対策以外に、同じ周波数帯を使用する場合でも、互いに異なるパルス送信周期とするデバイスのパラメータ設定や送受アンテナのビームパターンを考慮したセンサー設置を行うことが有効だと考えられる。特に、今回実施した干渉発生条件は、レーダー間の距離が 10m でレーダーを互いに正対させた非常に厳しい条件であったことを考慮すると、実環境においてもこれらの対策は、レーダー間干渉によって生じるノイズレベルとそれに伴う誤検出を抑圧するのに有効なアプローチだと考える。

5.3. 技術課題ウ) 耐環境性能補償技術の開発

5.3.1. 取り組み内容

①耐環境性能の実証実験

降雨試験場において79GHz帯の伝搬特性に関する基礎データの取得等を実施して、インフラレーダーとしての回線設計とレーダーユニットの構想設計へ反映する。具体的には、降雨時の実験データ等による回線設計の精査する中で、所要の感度と視野角を同時に実現するために必要となるレーダーユニットの構成検討に取り組む。

(該当物品費：79GHz帯レーダー試験システム、79GHz帯パルスレーダー装置、レーダー実験用調節治具、79GHz帯レーダー標準リフレクタ)

(該当その他経費：テストコース・試験設備期間借用、レーダー実験作業支援)

5.3.2. 耐環境性能の実証実験

(1) 試験場における降雨時伝搬データの解析結果

ここでは、降雨試験場（公益財団法人鉄道総合技術研究所、国立市）において測定、取得された79GHz帯レーダーの伝搬特性に関するサンプルデータの解析を実施したので報告する。

図5.3.2-1(a)は、降雨試験時の全体構成を示しており、時間雨量を設定して雨を降らせる空間は天井までの高さが5m、天井には26ヶ所に水栓ノズルが取り付けられている。また、79GHz帯のレーダーと今回の対象物とした人との距離は10mとしており、図5.3.2-1(a)において右側の壁面と対象物との距離は約6mであった。くわえて、図5.3.2-1(b)は、実際に降雨試験中の様子を示した写真であり、カメラでは対象物を捉えることが困難となるような強い降雨条件も再現できる試験環境となっている。

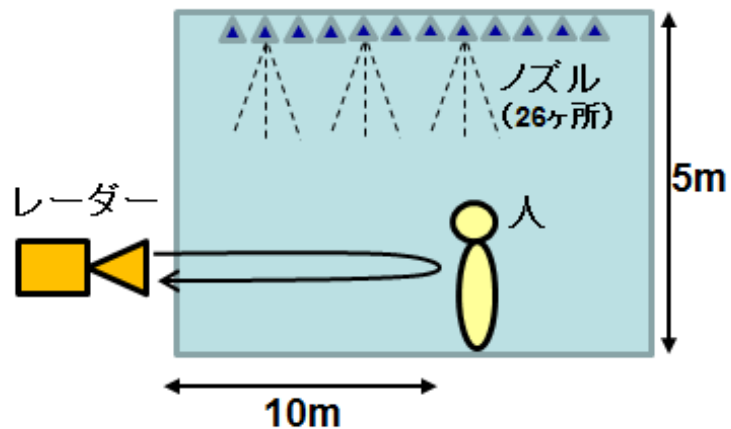


図 5.3.2-1 (a) 降雨試験時の構成概要



図 5.3.2-1 (b) 降雨試験時の様子

図 5.3.2-1 降雨実験装置を用いた 79GHz 帯レーダー伝搬実験環境

以下では、図 5.3.2-1 に示したような試験環境において、時間雨量 0mm、10mm、50mm および 200mm に設定された降雨の条件で、79GHz 帯レーダーを用いて測定されたデータに対する解析結果を説明する。

まずは、一般に非常に激しい雨であり、車の運転は危険とされる降雨条件と知られている降雨量 50mm/h の場合について、図 5.3.2-2 ではレーダーエコー強度の電力頻度分布を用いた解析例を示している。降雨量 0mm/h（雨なしの条件）との電力頻度分布の中央値を比較した結果、このデータでは 2dB 以下の差異であった。図 5.3-2 から確認できるが、対象物を人とした今回の場合、エコー強度の変動が降雨量による伝搬特性の変動よりも支配的であった。

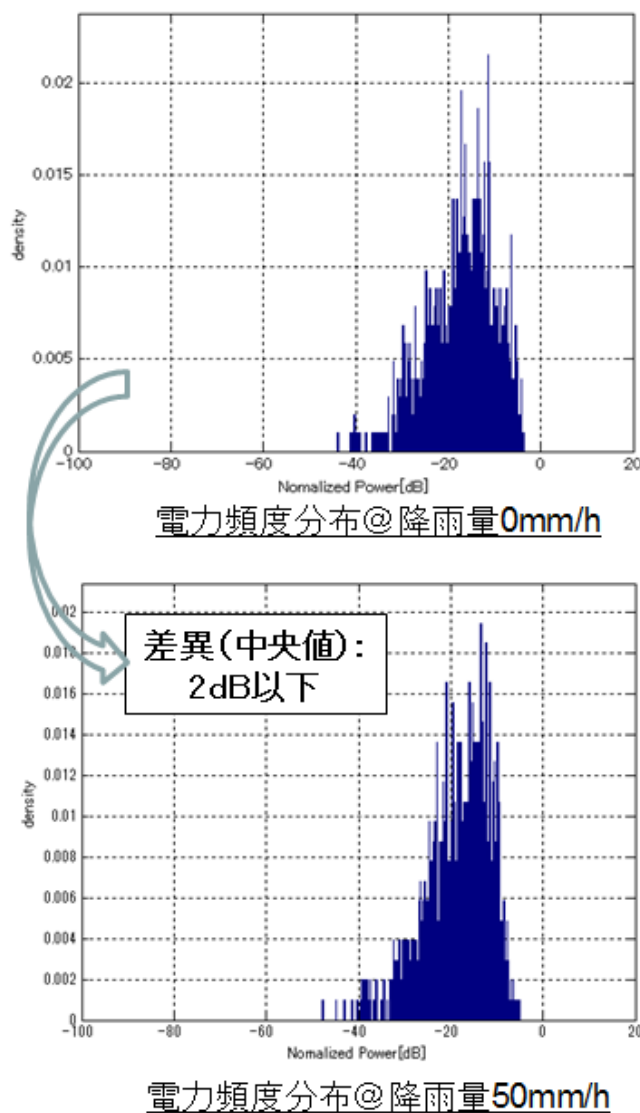


図 5.3.2-2 降雨量の変化に伴うエコー強度の電力頻度分布比較

次に示す図 5.3.2-3 (a) から図 5.3.2-3 (d) は、時間雨量の変化に対して、79GHz 帯レーダーで測定された遅延（距離）プロファイルデータを示している。

図 5.3.2-3 (a) の図中に記載されているが、距離プロファイルでは、人からのレーダーエコーと同時に、実験環境の床面における凹凸や壁面で散乱されたエコーも観測された。実際、時間雨量が増加すると床面の凹凸が水面に変化するため、レーダーへ戻ってくるような散乱エコーが減少していることが分かる。くわえて、今回の試験で行った伝搬距離が 10m の条件では、50mm/h や 200mm/h といった非常に激しい雨であっても、人からのエコーが検出可能であることも分かる。

また、図 5.3.2-4 (a) から図 5.3.2-4 (d) には、各降雨条件において検出された人からレーダーエコーの時間変動について、電力値の発生頻度分布を算出した結果を示しているおり、さらに、Weibull（ワイブル）分布を用いたデータフィティングした結果も追記されている。図 5.3.2-4 の全体を眺めると確認できるが、人からのエコー強度変動については、ワイブル分布によるモデリングが適していると考えている。

さらに、これら降雨時の 79GHz 帯伝搬特性に関する実験解析のまとめとして、図 5.3.2-5 には、時間雨量毎に取得されたレーダーエコー分布についてその変化を示すとともに、図 5.3.2-6 では、図 5.3.2-5 に示されたエコー分布の中央値について、その変化をグラフにして傾向を示している。

全体として、時間雨量に対するサンプルデータの量が少ないのと、対象物を変えた場合の解析も必要であることから、これらの点を考慮した追加データの取得が日必要と考えられる。

以上のように、平成 26 年度は、降雨試験場（時間雨量 0mm～200mm）において取得され 79GHz 帯伝搬特性に関わるサンプルデータの解析を実施した。この解析結果に対して、本研究開発の運営委員会において有識者からは、強い降雨の伝搬特性について追加データの取得が必要であり、大型の試験設備等を使用することによる、雨粒の粒径が 79GHz の波長と同程度となる条件での実験やデータ解析が重要との指摘があった。

よって今後は、100mm/h 程度の条件を中心に追加データを取得していく。なお、平成 27 年度は、大型の試験設備において、雨粒の粒径が波長と同程度となる条件で実験、データ解析を実施する予定である。

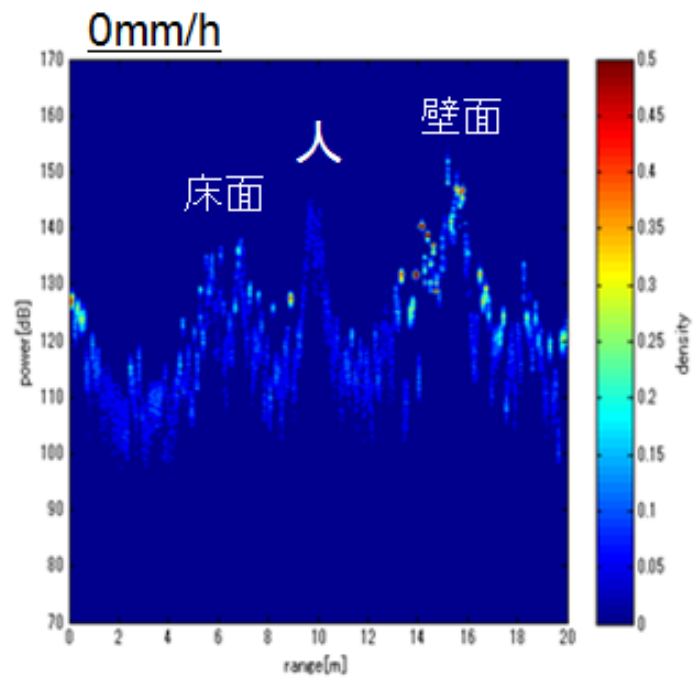


図 5.3.2-3 (a) 時間雨量 0mm

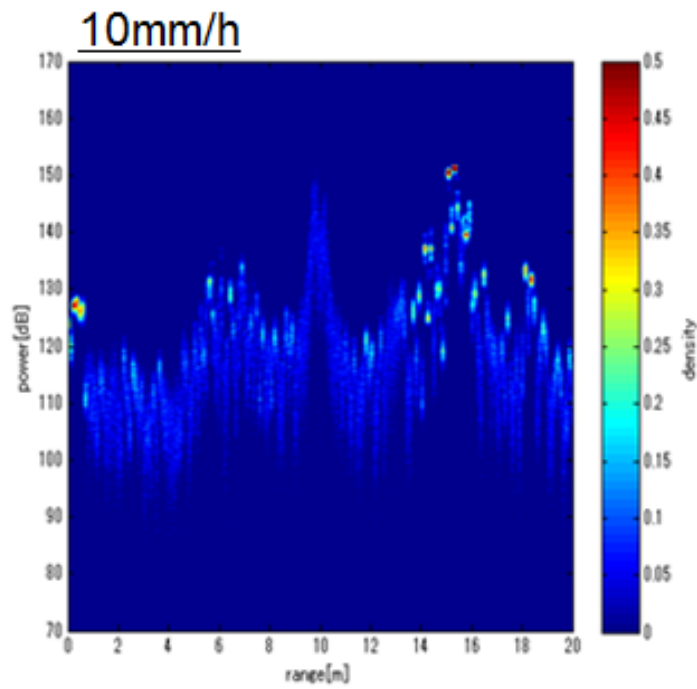


図 5.3.2-3 (b) 時間雨量 10mm

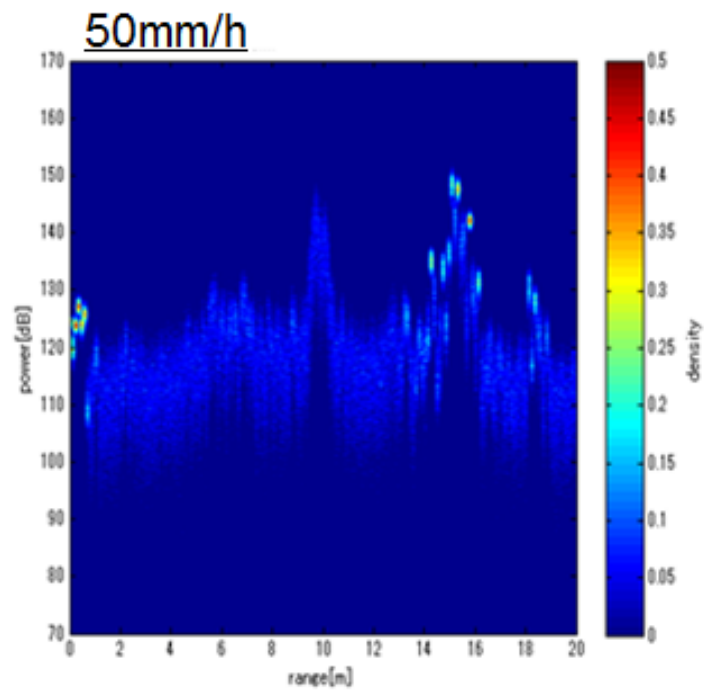


図 5.3.2-3 (c) 時間雨量 50mm

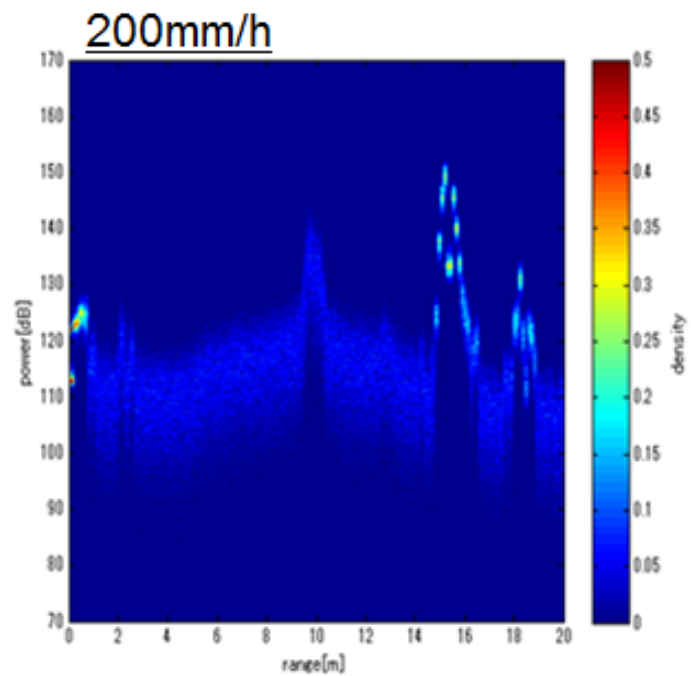


図 5.3.2-3 (d) 時間雨量 200mm

図 5.3.2-3 降雨量の変化に伴う遅延（距離）プロファイルの比較

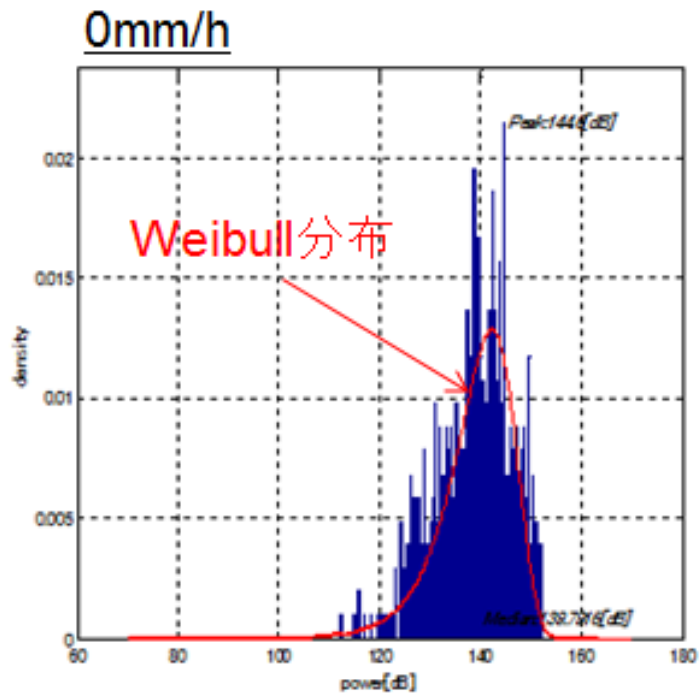


図 5.3.2-4 (a) 時間雨量 0mm

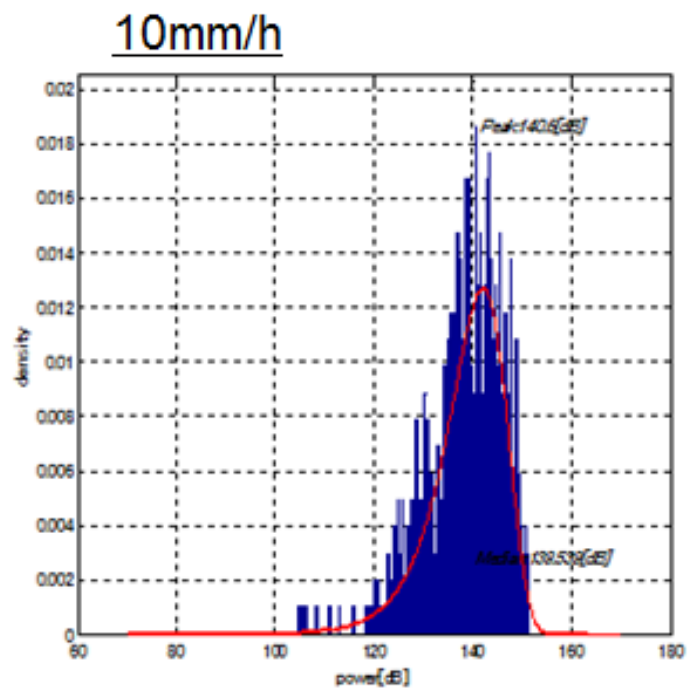


図 5.3.2-4 (b) 時間雨量 10mm

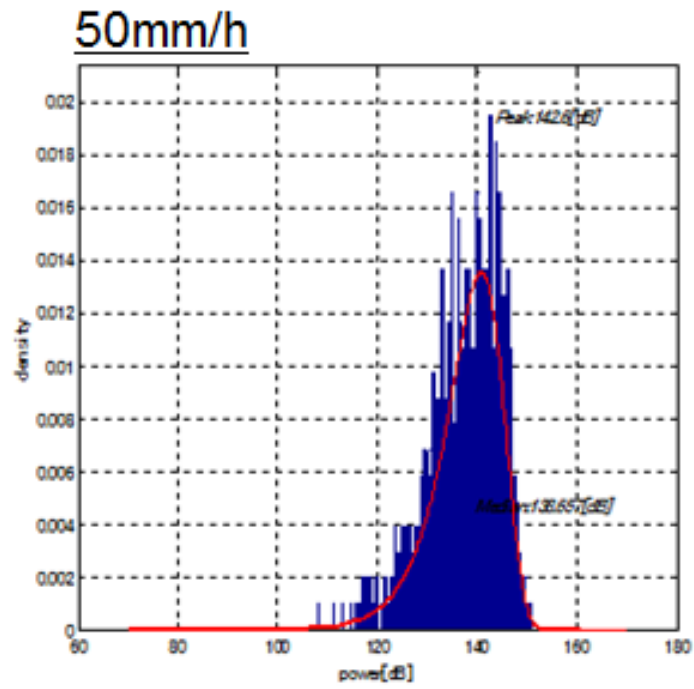


図 5.3.2-4 (c) 時間雨量 50mm

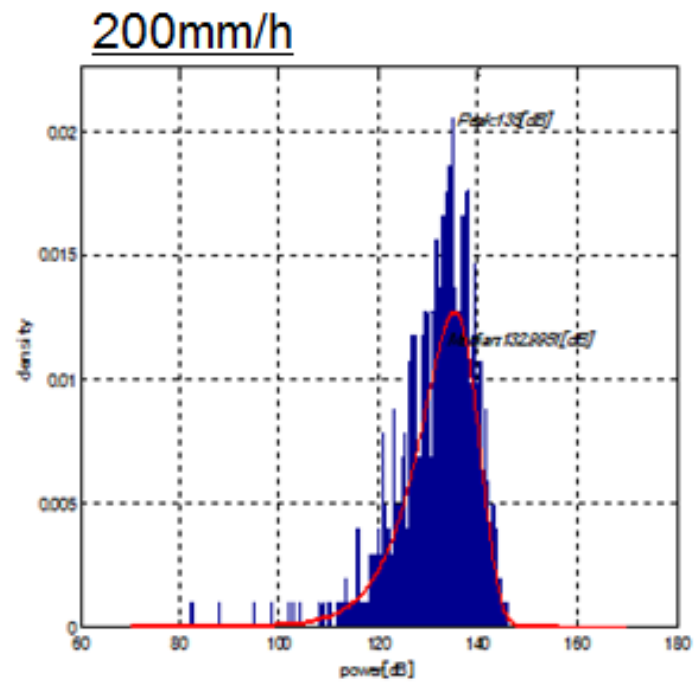


図 5.3.2-4 (d) 時間雨量 200mm

図 5.3.2-4 降雨量の変化に伴う電力頻度分布の比較

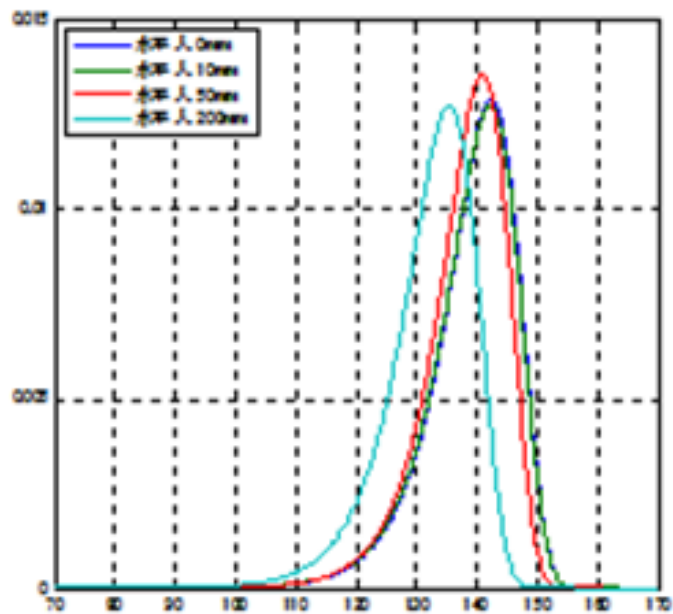


図 5.3.2-5 Weibull 分布を用いた電力頻度分布のモデリング

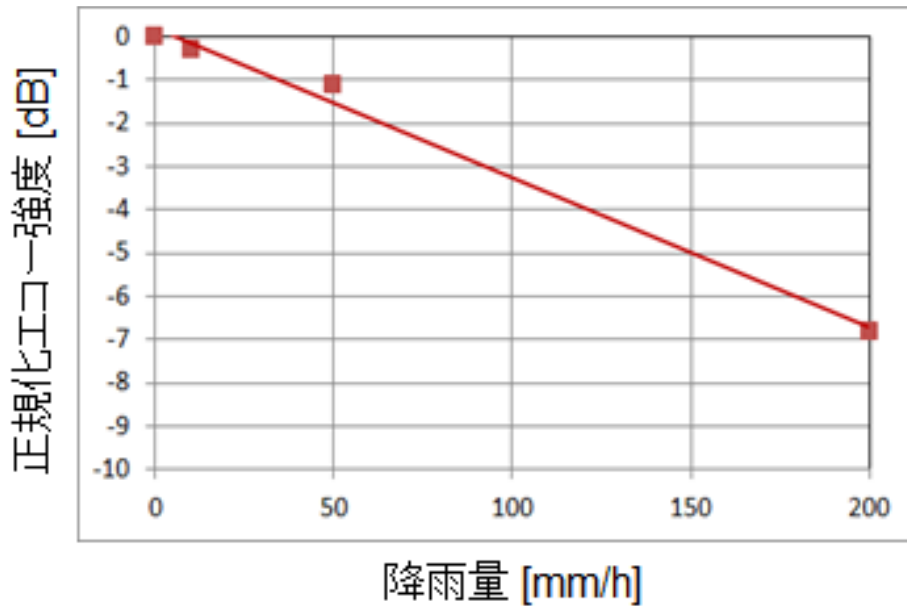


図 5.3.2-6 79GHz 帯における降雨減衰量の推定例 (伝搬距離 10m)

(2) 79GHz 帯レーダー試験システムを用いた基本性能評価

ここでは、屋外実証実験による実測データの取得に向けた事前確認として、屋内環境における 79GHz 帯レーダー試験システムを用いた 79GHz 帯パルスレーダー装置の基本性能評価を行ったのでその結果を報告する。

平成 26 年度に導入したキーコム社製の 79GHz 帯レーダー試験システムは、屋内でレーダー測距精度、速度精度が確認できるミリ波レーダーの試験システムである。図 5.3.2-7 に 79GHz 帯レーダー試験システムの外観を示す。図に示すように、受信アンテナで 79GHz 帯の RF 信号を受信し、コントローラー PC で設定したパラメータに従った信号処理を行ったのち、送信アンテナから信号を受信したのと同じ方向に同一周波数の 79GHz 帯 RF 信号を送出する。

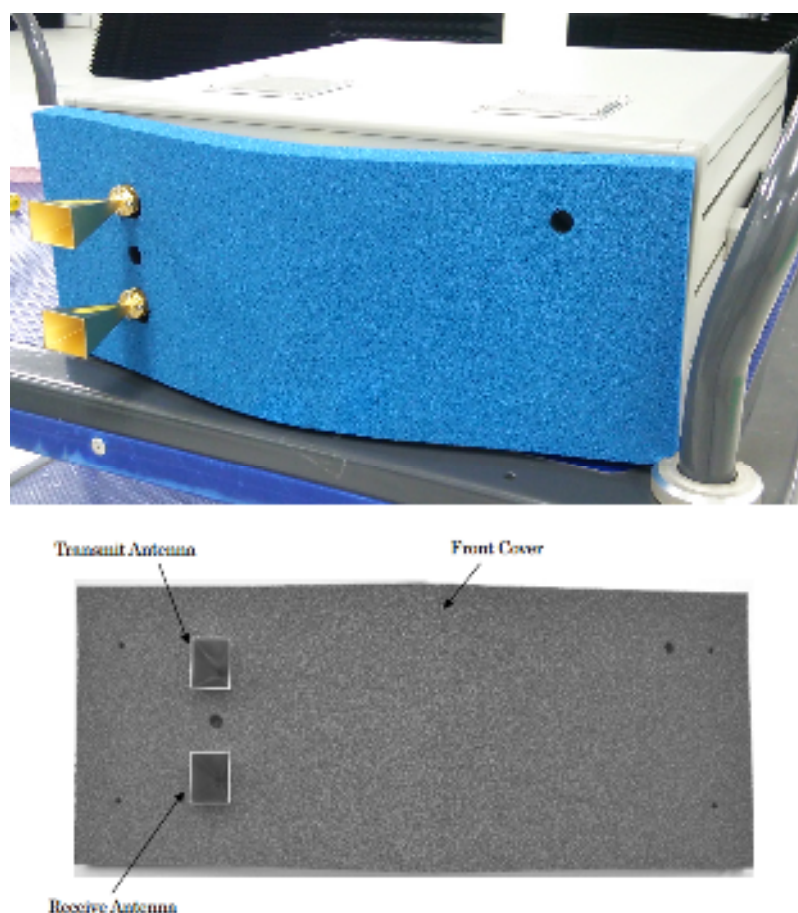


図 5.3.2-7 79GHz 帯レーダー試験システムの外観
(上：試験システム全体、下：79GHz 帯の信号送受面)

図 5.3.2-8 は、79GHz 帯レーダー試験システムを制御するコントローラーPC に搭載された制御用アプリケーション画面の一例である。図示のように、コントローラーPC に搭載された本制御用アプリケーションにより、設定する擬似ターゲットまでの距離、ドップラー周波数およびレーダー断面積について調節することができる。

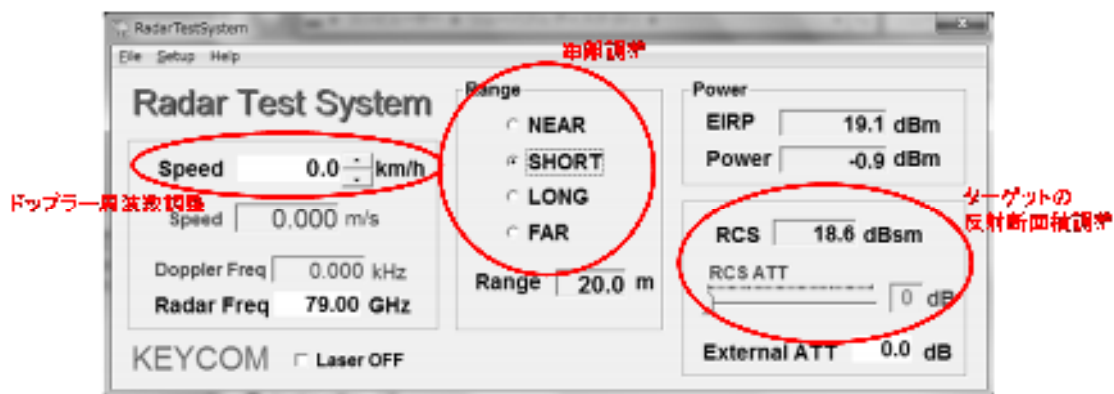


図 5.3.2-8 試験システムの制御用アプリケーション画面例

図 5.3.2-9 に、79GHz 帯レーダー試験システムを用いた性能評価実験の概要と、設定可能なパラメータ概要を示す。図に示したように、評価対象の 79GHz 帯パルスレーダー装置は、試験システムと正対して 2m 離してビームのメインローブ方向に設置する。また、設定可能なパラメータは、ターゲットの距離 (5m、20m、40m、100m) と移動速度 (ドップラーシフト量の設定による) およびターゲットのレーダー断面積である。ただし、レーダー断面積は距離によって設定できる値の範囲が異なる。

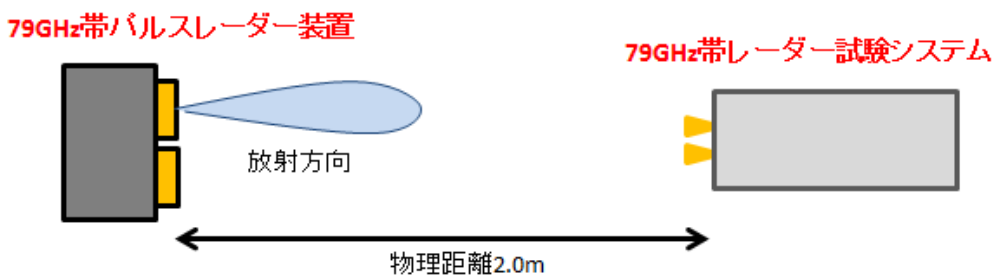


図 5.3.2-9 試験システムを用いた実験環境とパラメータ概要

図 5.3.2-10 に、79GHz 帯レーダー試験システムを用いて、79GHz 帯パルスレーダー装置の性能評価を行った結果の一例を示す。図に示したのは、79GHz 帯パルスレーダー装置が出力する遅延プロファイルであり、横軸に距離、縦軸に反射レベルを示している。縦軸の反射レベルは、ベースバンド基板に搭載した AD コンバータのフルスケールで正規化したデシベル値である。0m 地点の強い反射レベルは、送信アンテナから受信アンテナに直接飛び込む折り返し信号によるものである。また、約 15m 先までに確認されるいくつかの反射は、2m 先においた試験システムの周辺に置かれた物体からの反射であると推察される。ここでは、79GHz 帯レーダー試験システムのパラメータを、20m 先にレーダー断面積+10dBsm 相当の物体を設定した場合の遅延プロファイルを示している。20m 距離地点に反射レベルとして-44.3dB のピークが確認できる。

同様に 79GHz 帯レーダー試験システムのパラメータを変更しながら、設定した各々の各レーダー断面積および距離における反射レベルの一覧を表 5.3.2-1 に、グラフで図示したものを図 5.3.2-11 に示す。試験システムに設定された擬似ターゲットのレーダー断面積をパラメータとして、遅延プロファイルの測定により取得されたターゲットの反射レベルが変化していることが確認できる。

なお、79GHz 帯パルスレーダー装置の性能評価としては、歩行者相当のレーダー断面積 (RCS) として-15dBsm の設定条件をピックアップすると、この条件においても SNR>+10dB を確保できていることが分かる。

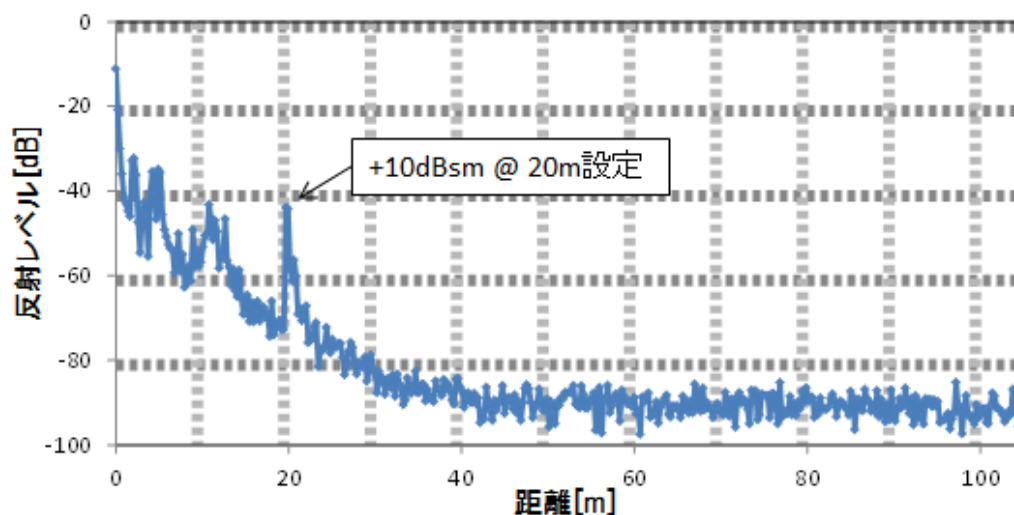


図 5.3.2-10 遅延プロファイルを用いた試験システムによる反射レベル測定例

表 5.3.2-1 試験システムによる擬似ターゲットの反射レベル測定結果

反射断面積設定値[dBsm]	レーダー試験システム ターゲット設定距離	
	20m	40m
+20	-34.2 dB	-43.1 dB
+15	-39.0 dB	-48.4 dB
+10	-44.3 dB	-53.3 dB
+5	-49.5 dB	-58.8 dB
0	-54.4 dB	-63.3 dB
-5	-	-68.7 dB
-10	-	-73.3 dB
-15	-	-77.6 dB

※ノイズレベルは約-90dB

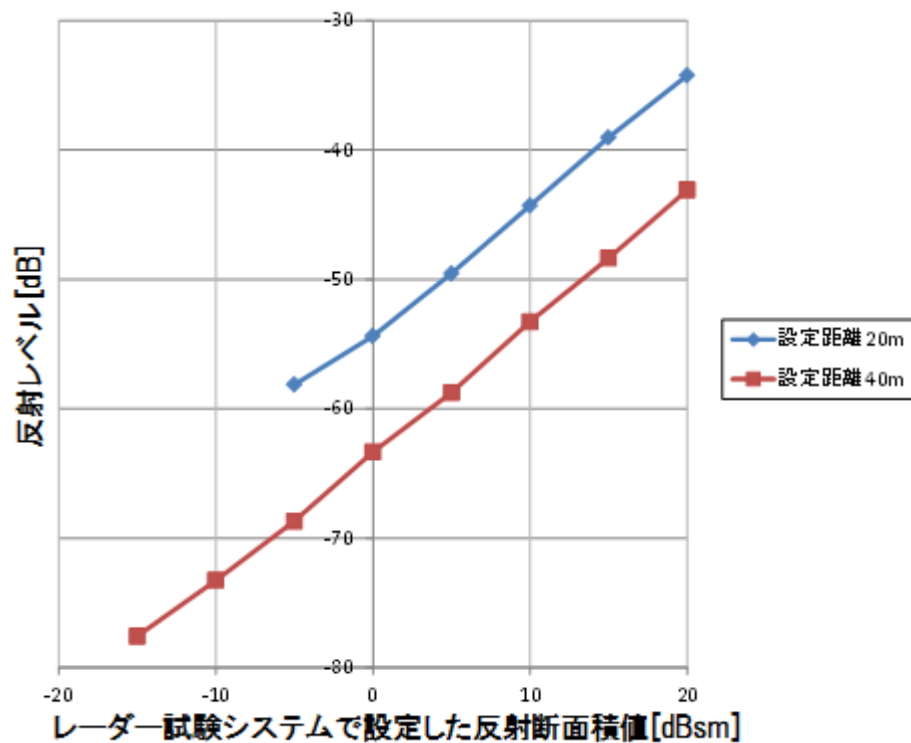


図 5.3.2-11 試験システムによる擬似ターゲットの反射レベル測定結果

6. 研究発表などの成果

研究成果指標としては、特許出願 1 件および口頭発表 2 件を実施し、平成 26 年度の目標を達成することができた。

表 6-1 研究成果指標

年度 目標	H26 年度 実績	H27 年度 目標	H28 年度 目標	H29 年度 目標	H30 年度 目標	合計
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
特許出願数	1 件 (0 件)	3 件 (1 件)	3 件 (2 件)	2 件 (1 件)	1 件 (1 件)	10 件 (5 件)
査読付き誌上 発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	2 件 (1 件)
査読付き口頭 発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	2 件 (1 件)	2 件 (1 件)	1 件 (0 件)	6 件 (3 件)
その他の誌上 発表数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	3 件 (0 件)
口頭発表数	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)	10 件 (0 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	3 件 (3 件)

※ 括弧内は海外における取り組み分

表 6-2 特許出願

No.	発明の名称	筆頭者
1	物体検出装置および物体検出方法	劉 偉傑

表 6-3 口頭発表

No.	タイトル	発表先	発表者 (筆頭)	発表日
1	次世代ミリ波センシング技術	展示会 Panasonic 「Wonder Japan Solutions!」	中川 洋一	平成 27 年 2 月 12 日
2	インフラレーダーシステム 技術の開発	講演会「情報通信が 支える次世代の ITS」	中川 洋一	平成 27 年 3 月 6 日

7. アウトカム目標に向けた取り組み

7.1. 標準化活動

<目標>

先進国のみならず、新興国でも近い将来に社会課題となる交通事故削減に向けた国際電波法の整備に貢献していくため、WRC-15に向けた事前の審議を担当するITU-Rの会合等に参画することで、79GHz帯レーダーの安全支援用途における技術の標準化に積極的に係わる。また、ITS情報通信システム推進会議において、ミリ波レーダーに係わる国内の標準化検討を主導する立場（ミリ波WG主査）を担い、WRC-15の決議を踏まえたARIB標準規格の更新や、ARIBをはじめ関係諸機関と連携したITU-Rへの寄書提案等についても取り組む。

<進捗・成果>

ITU-Rの標準化会合に参画し、ドイツ等と連携しつつ、79GHz帯レーダーがITS用途として広く普及促進されるように技術基準策定を計画通りに推進している。具体的には、79GHz帯周波数分配に係るWRC-15議題の検討として、ITU-R SG5 WP5B会合へ継続的に参画した。総務省/ARIBの主管するWRC-15向けCPM（Conference Preparatory Meeting）テキストおよび干渉計算レポートの作成を支援してきた結果、ITU-Rの作業計画に沿った進捗を得ている。

7.2. 実用化の取り組み

<目標>

小型、低コストを実現する79GHz帯のレーダーデバイス技術開発と、高信頼性を実現するインフラレーダーシステム技術開発を連動させることで、事業化フェーズへの速やかな移行につなげていく。つまり、様々な分野への応用展開とグローバルな普及促進を見込み、高い技術的要件が求められる次世代のITSを事業化の中心に据えて、市場への早期投入を目指した取り組みを推進する。

<進捗・成果>

実用化に向けたコストダウンの取り組みの一環として、当初予定に加え、高速道路会社への取り組み紹介と開発技術の説明および意見交換を実施し、スマートICへのセンサー応用検討に先行着手することができた。降雪等の影響が少なくレーンを通する車両等を安定して検知するセンサーとして期待されており、具体的な仕様検討を進めつつ、平成27年度よりフィールド実証を行うことを検討している。

7.3. 研究開発運営委員会

<目標>

本研究開発の全期間を通じた効率的な推進のためには、急激な変化が見込まれる市場環境や、欧州を中心とした諸外国の動向などに対応した国際競争力分析等の広範な知見・見識を有する専門化や有識者からの助言は不可欠である。よって、本研究開発では、学識経験者、有識者が参画する研究開発運営委員会を設置する。平成 26 年度において 2 回の研究開発運営委員会を開催する。第 1 回は研究開発計画、達成目標に関して評価、助言をいただくとともに研究開発の進捗状況の共有と方向性の確認を行い、第 2 回は研究開発成果の妥当性および平成 27 年度以降の研究開発計画、達成目標について評価、助言いただく。

<進捗・成果>

SIP 自動走行システムでは、推進委員会傘下のシステム実用化 WG 等において、システム実用化の推進、出口戦略に関する調査・検討等が進められているおり、特に早期導入、海外展開のための課題が議論されている。「ICT を活用した次世代 ITS の確立」のうち「インフラレーダーシステム技術の開発」においても、社会実装を担う警察庁がインフラレーダーへの要求条件の検討に取り組むことによって、実際の交通環境を踏まえたより実用性の高い研究開発成果が志向されている。

そこで、「インフラレーダーシステム技術の開発」では、平成 26 年度の実施計画に沿って研究開発運営委員会を設置するに伴い、交通センサーとしての社会実装を実現するために、実際の交通環境を踏まえた議論が必要であり、ITS およびレーダーの各分野における有識者として、以下の 3 名を研究開発運営委員会の委員として選定した。

まず、委員長には、東京大学生産技術研究所教授の大口敬氏を選定、招聘した。大口教授は、交通制御工学を専門として、特に都市街路の交差点における交通安全の確保に対して幅広い技術の可能性の検討にも取り組んでいる。近年では、ITS 世界会議東京 2013 において International Program Committee Chair を務める等、研究の第一線で活躍中である。くわえて、ITS 分野のヒューマンインターフェースに関する研究実績を有する慶應義塾大学工学部管理工学科教授の大門樹氏、およびレーダー分野の信号処理等では国際的にも著名な京都大学大学院情報学研究科教授の佐藤亨氏を選定した。将来の路車協調システムとしての実用化を目指す上で、ヒューマンインターフェースに関する知見は、運転者への通知方法に対する制約条件に基づいたセンサー取得情報処理やリアルタイム性の検討において必須となるものである。また、レーダー信号処理による対象物の識別、判別の機能実現とその性能見極めについては、厳密な理論の裏付けに基づく実験結果への考察が求められるため、学術的な見地からの評価、助言が重要である。

その上で、平成 27 年 1 月 20 日には第 1 回の研究開発運営委員会を開催し、さらに 3 月 4 日には実証実験の現場である JARI 所有のテストコース（つくば市）において第 2 回の研究開発運営委員会を開催し、研究開発の試作物やデータの測定状況を視察いただくことができた。



図 7.3-1 JARI テストコースにおける（つくば市）実証実験の様子