



自動運転支援向け76GHz帯高分解能レーダ*

76-GHz High-Resolution Radar for Automatic Driving Support

小河 昇平*
Shohei Ogawa

福永 貴徳
Takanori Fukunaga

山岸 傑
Suguru Yamagishi

山田 雅也
Masaya Yamada

稲葉 敬之
Takayuki Inaba

自動運転の開発が進む中、ITS技術を活用した路車協調システムの高度化が期待されている。例えば日本において、交差点では、右折待ちする車両へ、対向する右折車の影になる直進車を路側センサが捉え情報提供するシステムが実用段階にきている。この路側センサ用途に、分解能を落とさず遠距離測定が可能な多周波ステップCPC方式による76GHz帯レーダを試作開発し、所望の性能を実証した。

The development of automatic driving has increased expectations for advanced ITS technology. To prevent traffic accidents at intersections in Japan, for example, roadside radio units transmit information about oncoming vehicles detected by roadside sensors to vehicles waiting to turn right on the opposing side. This paper describes the prototype of a 76-GHz band radar applicable as a roadside sensor. The radar adopts a multiple-frequency-stepped CPC (complementary phase coded) modulation method characterized by long-range detection without resolution degradation. The performance of this radar was verified in a field experiment.

キーワード：ITS、路車協調システム、ミリ波レーダ、自動運転

1. 緒 言

近年、安全・安心への関心が高まり、安全運転支援や自動運転システムの研究開発や実用化が進んでいる。政府が掲げる2020年交通事故死者数2,500人以下という目標の達成には、ITS^{*1}技術を活用して車両とインフラ設備が情報交換する路車協調システム^{*2}が必要と考えられ、官民連携して実証試験等が進められている。

図1に示した路車協調システムの例（安全運転支援システム）では、路側センサが交差点に進入してくる対向車両の位置や速度等を検出し、その情報を路車間通信により右折車両に提供する。これによりドライバー自身や車載センサでは検出困難な対向車両等を認識することが可能となり右折時の衝突事故防止支援を行う。

路車協調システムに用いられる路側センサは車両の位置等を正確に検出する必要があり、時間帯や天候に影響を受けにくい電波を用いたレーダ技術が注目されている。しかし、複数車線にまたがり、150m以上遠方までの広いエリアの複数車両を検出するためには、遠方でも高分解能な検出性能が要求される。レーダにおいて遠距離性と高分解能はトレードオフの関係にあり、両立は容易ではない。

当社は平成26年度から平成28年度まで総務省による研究開発プロジェクトを国立大学法人電気通信大学と共に受託し、遠距離性と高分解能を両立した76GHz帯ミリ波レーダを開発し⁽¹⁾、路車協調システムを想定した実機実験により性能を実証した。

2. ミリ波レーダ原理

パルスレーダ方式を例として、ミリ波レーダの原理について説明する。直進性の高いミリ波帯の電波をパルス状に送信し、対象物からの反射電波を受信するまでの往復時間で距離を測定する。物体が移動している場合、ドップラー効果^{*3}により送信周波数と異なる周波数の反射波を受信し、その周波数差で速度を算出できる。この時、高い分解能を得るには送信パルス幅を狭くする必要があるが、パルス幅を狭くすると帯域が広がるため、受信の帯域幅を広げる必要があり、雑音が増加し、遠距離性は悪化する。

この問題を解決するため、本稿では国立大学法人電気通信大学が提案する多周波ステップCPC方式⁽²⁾を採用した。この方式は、周波数をステップ状に切替えながらパルスを

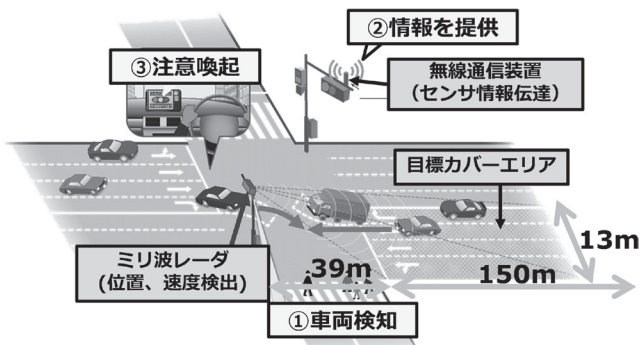


図1 路車協調システム例（安全運転支援システム）

送信することで、送信帯域幅を広げ高分解能にしながら、受信帯域幅は維持し遠距離性を確保でき、遠距離性と高分解能を両立する優れた方式である。多周波ステップCPC方式のシーケンスを図2に示す。

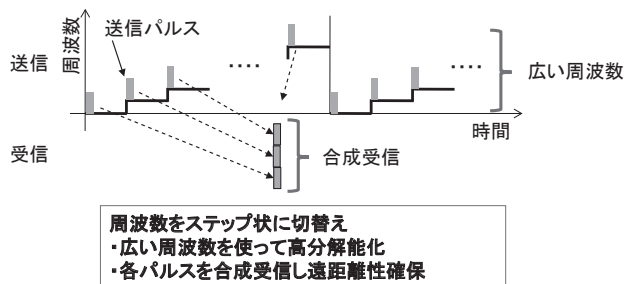


図2 多周波ステップCPC方式のシーケンス

さらに、CPC列 (Complementary Phase Coded)^{*4}に基づき変調した2種類のパルス波を送信し、検出物体からの反射波をそれぞれ相関処理した後に足し合わせることで、SN比 (Signal-to-Noise Ratio) が改善するだけでなく、通常は発生するノイズ (距離軸方向の不要な信号) を抑制でき、さらなる遠距離性や分解能の向上効果を得る。

3. 76GHz帯ミリ波レーダの構成

ミリ波レーダの機能ブロックを図3に示す。レーダモジュールを構成するアンテナ、76GHz回路、ベースバンド回路のそれぞれの特徴について各項にて述べる。

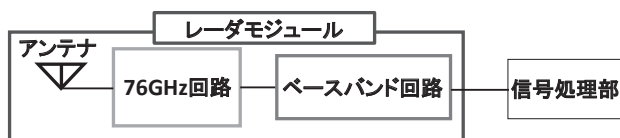


図3 76GHz帯ミリ波レーダ機能ブロック図

3-1 アンテナ

遠距離性と高分解能を実現するには受信SN比を大きくする必要があり、高利得なアンテナが必要である。また、安全運転支援システムでは4車線×150m程度の区間をカバーすることが要求されると考えられ⁽³⁾、広い指向性のアンテナが必要となる。これらを実現するため、アンテナの設計を工夫することで、要求エリアをカバーする指向性を

持ちながらも、高い利得を持つ導波管スロットアンテナを開発した。開発したアンテナの性能を表1に示す。

表1 送信アンテナの性能測定結果

項目	測定値
水平面ビーム幅	20°
垂直面ビーム幅	8°
利得	23dBi

3-2 76GHz回路

高いSN比を実現するため、高利得かつ低雑音なガリウムヒ素 (GaAs) を用いた送受信のアンプと周波数変換器等からなる76GHz帯RFデバイスを開発した。詳細は本冊子の「高分解能路側設置レーダー用RFデバイス」に述べるが、例えば受信系の低雑音アンプは表2に示すように、76GHzという高い周波数ながら、利得30dB、雑音指数 (NF) 5dB以下を実現している。

表2 低雑音アンプのNFおよび利得

受信系低雑音アンプ	測定値
利得	30dB
雑音指数 (NF)	5dB

3-3 ベースバンド^{*5}回路 (周波数ステップ機能)

多周波ステップCPC方式は、周波数を高速に切替える必要がある。単純に複数の発振回路を並列化してスイッチで切替える方式では回路規模が大きくなり高コストとなる。そこで、切替え速度が速いシンセサイザを用いた独自方式のベースバンド回路を小型・低コストで実現した。

試作したベースバンド回路からの送信信号の周波数変化を図4に示す。時間を要することなく、周波数をステップできていることが確認できる。

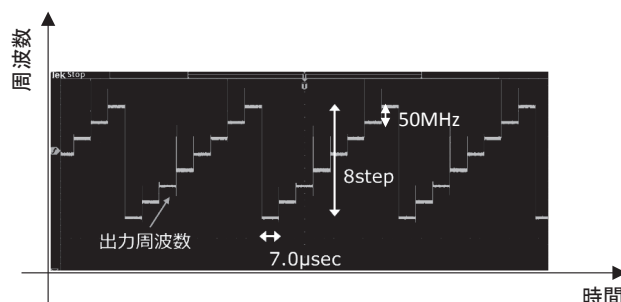


図4 送信周波数の変化

3-4 76GHz帯レーダモジュール

76GHz帯レーダモジュールの外観写真を図5に示す。試作したレーダモジュールは電波法に基づいて、屋外実験に必要な技術基準適合証明を取得した⁽⁴⁾。

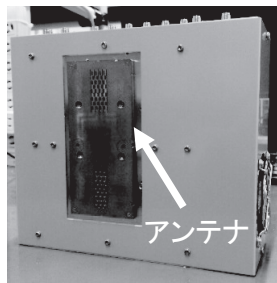


図5 レーダモジュール外観

4. 基本性能確認実験

76GHz帯レーダモジュールと国立大学法人電気通信大学の信号処理装置とを接続し、分解能、遠距離性の確認実験を実施した。

4-1 分解能

分解能を評価するために、2つの反射板の分離検出実験を行った。2つの反射板の距離は、レーダの有効な送信帯域幅430MHzから計算される理論分解能と同等の34cmとした。実験イメージと測定結果を図6に示す。測定結果から、反射板を設置した距離に約34cm離れた2つのピークがあることが確認でき、2つの反射板をそれぞれ分離して検出できていることがわかる。

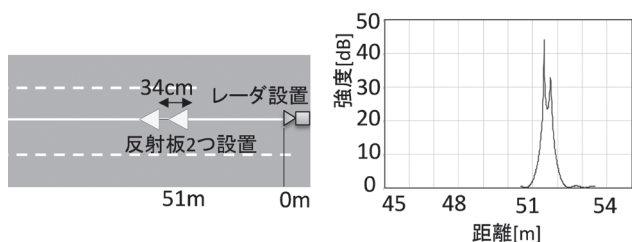


図6 実験イメージと測定結果

4-2 遠距離性

図1に示した目標カバーエリア内における車両検出可否を調査するため、端車線の近端39m地点と遠端189m地点に車両の反射を模擬したレーダ反射断面積が10dBsmの反射板を設置し、SN比を測定した。実験イメージと結果を

図7に示す。所要SN比10dBに対して、189m地点においても10dB程度のマージンがある結果を得た。

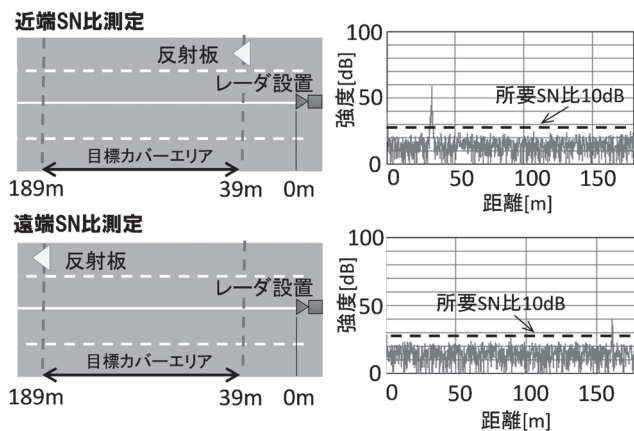


図7 実験イメージと測定結果

5. 車両検出実験

実際の車両検出性能を一般財団法人日本自動車研究所の城里テストコースおよび尼崎市内の公道にて確認した。車両検出実験では、76GHz帯レーダモジュールは当社の信号処理用PCに接続し、検出結果を解析した。

5-1 テストコース実験

一般財団法人日本自動車研究所の城里テストコースにて実用化時には信号灯器柱等に設置することを想定し、高さ6mに76GHz帯レーダを設置し(図8)、2台の車両を追走、並走、追い抜きなどのパターンで走行させた。結果を2例示す。



図8 テストコース実験風景

(1) 追走車両の検出実験

レーダに向かって同一車線上を一定の車間距離を保ちながら走行する2台の車両の検出実験を行った。

追走車両の走行風景を図9に示す。同一車線を一定の車間距離で走行する2台は、レーダから見て速度、角度が同じであり、分離検出が難しい。図10に距離、速度、角度の検出結果を示すが、速度と角度は2台の車両で同じ検出結果となるためグラフ上で重なり、分離できない。しかし、距離の検出結果を見ると、距離200mから距離0m付近まで（時間では、およそ30sから50sまで）は一定距離離れた2台分の検出結果が確認でき、それぞれを分離検出できていることがわかる。

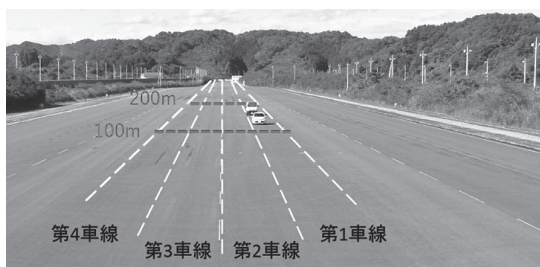


図9 追走車両の検出実験風景

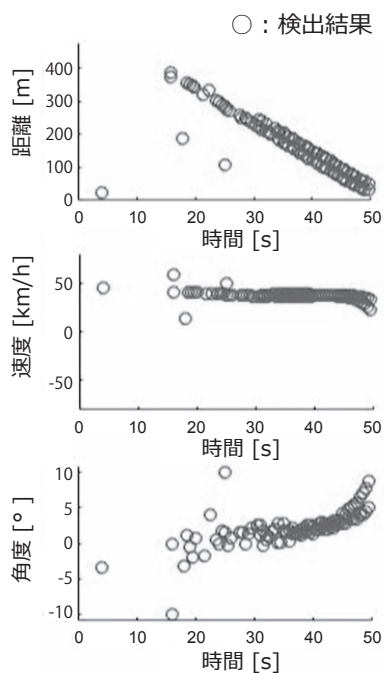


図10 追走車両の検出実験結果

(2) 並走車両の検出実験

隣接する車線上を横並びでレーダに向かって走行する2台の車両の検出実験を行った。

並走車両の走行風景を図11に示す。隣接する車線を並走

する2台は、レーダから見て距離、速度、角度がほとんど同じであり最も分離検出が難しい。レーダを原点として道路を真上から見た距離座標に検出位置をプロットした結果を図12に示す。距離100m以下では、車線2と車線3を車両が走行していることが判別できています。しかし、それ以上では車線を跨いで多くのプロットが見られ、どの車線を

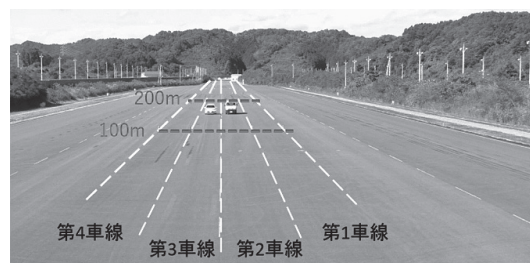


図11 並走車両の検出実験風景

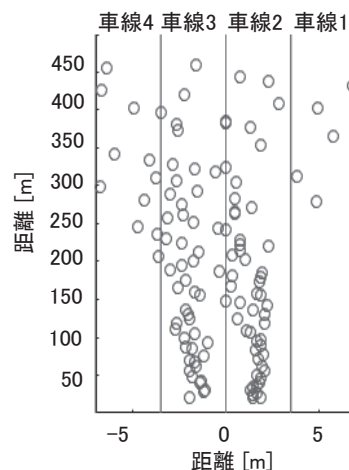


図12 並走時の測定結果（フィルタ処理なし）

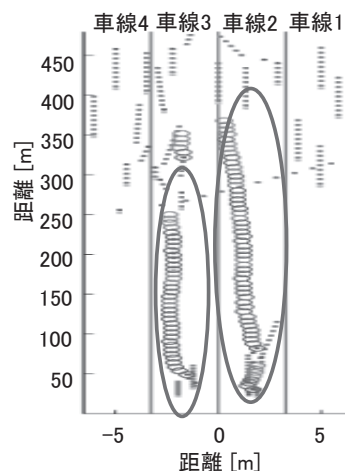


図13 並走時の測定結果（フィルタ処理あり）

走行しているのかが、良くわからない。

そこで更に、並走車両を明確に分離するため、検出結果をカルマンフィルタ^{※6}にて補正した。補正処理した結果を図13に示す。このフィルタ処理をすることで、距離39m～189mの150m区間において、車線2と車線3を車両が並走していることがはっきりとわかる結果を得た。

5-2 実道実験

尼崎市内の実道にて車両検出実験を行った。レーダは図14に示すように歩道橋上に設置した。実験時のカメラ映像にレーダの検出結果を四角枠として重ねて表示させたものを図15に示す。点線枠は、レーダから39m～189mのエリアを示している。検出エリア内を10台以上の車両が走行しているような複雑な走行シーンにおいても車両をそれぞれ分離検出できている。カメラ映像上ではお互いに重なり、目視では見え難い車両についても、検出できていることが確認できる。

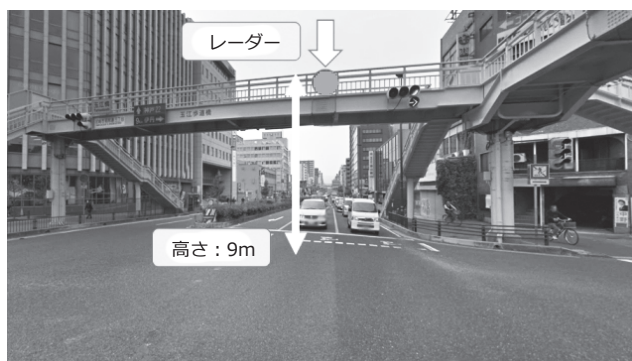


図14 尼崎市市内歩道橋での設置イメージ



図15 尼崎市市内実交通流と検出結果

6. 結 言

自動運転支援向けの76GHz帯路側設置レーダを開発し、分解能34cmと遠距離性189mを両立できることを確認し

た。また、実交通流においても39m～189m×2車線の範囲にいる10台以上の車両をそれぞれ分離して検出できることを確認した。今後は実用化に向けてさらに様々な環境において実験評価を行うことや車載レーダとの耐干渉性機能を開発することを計画している。

本稿は平成26～28年度総務省「電波資源拡大のための研究開発」の「狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダ技術の研究開発」の成果の一部である。

用語集

※1 ITS

Intelligent Transport Systemsの略。情報通信技術を用いて人と道路と車両とをネットワークで接続することにより、交通事故、渋滞などといった道路交通問題の解決を目的とするシステム。

※2 路車協調システム

交通インフラ等の設備と車両が連携して情報交換を行うITSを応用したシステム。

※3 ドップラー効果

電波や音波のような波が移動体で反射すると、移動体の速度に応じて反射された波の周波数が変化する現象。

※4 CPC列 (Complementary Phase Coded)

数学的に相補な関係の2つの符号列に基づき、パルス内を位相変調している。相補な関係なので、それぞれの相関結果を足し合わせることでサイドローブを低減できる。

※5 ベースバンド

変調前、または、復調後の信号の周波数帯域。

※6 カルマンフィルタ

誤差のある観測値を用いて、ある動的システムの状態を推定あるいは制御するための線形フィルタ。

参 考 文 献

- (1) 小河昇平、山田雅也、谷本雄大、稲葉敬之、「多周波ステップCPC方式のための76GHz帯レーダ無線部開発」、電子情報通信学会総合大会(2017年3月22日)
- (2) 渡辺優人、秋田学、稲葉敬之、「多周波ステップCPCレーダの提案と原理検証実験」、電気学会論文誌C、Vol. 135 (2015) No. 3、pp.285-291
- (3) 谷口裕一、大田利文、小林雅文、浦山博史、是枝義輝、「電波活用安全運転支援システム」、SEIテクニカルレビュー第184号(2014年1月)
- (4) 一般社団法人電波産業会、ARIB-STD-T48、「特定小電力無線局 ミリ波レーダ用無線設備 標準規格」

執 筆 者

小河 昇平* : 情報ネットワーク研究開発センター
主査



福永 貴徳 : 情報ネットワーク研究開発センター



山岸 傑 : 情報ネットワーク研究開発センター
グループ長



山田 雅也 : 情報ネットワーク研究開発センター
主幹



稲葉 敬之 : 国立大学法人電気通信大学
情報理工学研究科 教授



*主執筆者