

安心安全社会の実現に向けた79 GHzミリ波レーダ技術

Development of 79 GHz Band Radar for Realizing Safe Mobility

安木 慎
Makoto Yasugi

岸上 高明
Takaaki Kishigami

小林 聖峰
Kiyotaka Kobayashi

中川 洋一
Yoichi Nakagawa

佐藤 亘
Wataru Sato

要 旨

車同士の出会い頭・右左折時事故や歩行者などを巻き込む事故を減少させるため、筆者らは、79 GHzミリ波レーダ技術によるインフラレーダシステムの開発を進めている。79 GHz帯のミリ波レーダは、広い周波数帯域が利用できることで高い距離分解能を実現できるため、歩行者の分離検出が求められるインフラレーダに適している。筆者らは、独自の符号化パルス技術により、人体からの微弱な反射波であっても車両と分離して検出可能なレーダ方式を開発した。また、屋外設置を考慮した小型の79 GHzミリ波レーダモジュールを開発して車両相当の反射断面積を有するリフレクタと歩行者の分離検出機能を検証し、インフラレーダに求められる分解能を実現した。

Abstract

In order to reduce car accidents involving pedestrians we have been developing an infrastructure radar system using 79 GHz millimeter-wave radar technology. Since a wide frequency band is available for 79 GHz band millimeter-wave radar, it can achieve a high range resolution. Therefore, it is suitable for infrastructure radar system which is required to detect and separate pedestrians. Against this background, we have developed a series of advanced radar methods which are suitable for detecting pedestrians, and a compact 79 GHz millimeter-wave radar module. Using these methods and prototype radar, we have confirmed the detection function for pedestrians and vehicles.

1. はじめに

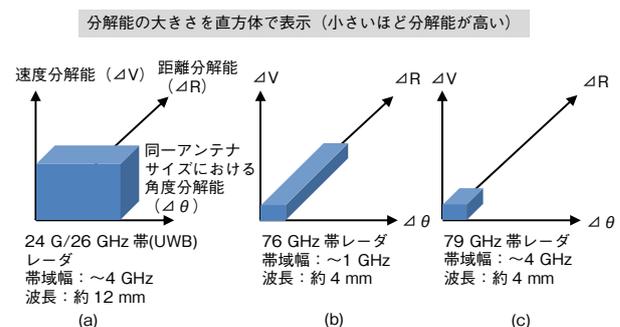
日本において、自動車は移動手段として日常生活に定着している一方、交通事故による死傷者数は約79万人、死亡者数は4373人（2013年）と、社会的問題の1つとなっている[1]。2008年以降、人対車両の死亡者数が車両相互や車両単独よりも多数を占めるようになり、また、その総数が横ばい傾向であることから、日本政府では2018年を目途に交通事故による死亡者数を2500人以下にするという目標を掲げ、国土交通省が中心となり先進安全技術検討、事故分析などに基づく安全基準策定、アセスメントによるユーザーの理解や普及促進などを進めている[2]。

こうした背景を受けて、情報通信や制御技術を活用して自動車の安全性を向上させるITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）の開発・実用化が進展している。近年では、車両単独システムでは事故の軽減や回避が比較的難しい出会い頭事故、交差点右左折事故などへの対策として、高所から俯瞰（ふかん）してセンシングするインフラレーダについての検討も進められており、車両間通信や路車間通信などを用いたインフラ協調型の安全運転システムを開発するにあたり、歩行者、自転車などの小さなターゲットを検知できる高分解能なミリ波レーダへの期待が高まっている[3]。

ミリ波レーダは、耐候性（夜間、逆光、雨霧など）に

優れており、前方車両検知による追従や衝突軽減機能など、車両への導入が先行してきた。前述の通り、インフラレーダには車両の検知に加えて歩行者の検知も求められる。歩行者の分離検知には数10 cmオーダーの距離分解能が必要とされることから、従来の24 G/76 GHz帯とは別の新たな周波数帯の開拓が必要であり、79 GHz帯レーダの国際的な導入が検討されている[3]。

第1図は、24 G/26 GHz帯レーダ (a)、76 GHz帯レーダ (b) および79 GHz帯レーダ (c) を、縦軸に速度、横軸に距離、奥方向に角度、それぞれの分解能を軸にして比較したものである[4]。いずれの軸においても、小さいほど分解能が優れていることを表す。速度分解能は速度計測のための計測時間が等しければ波長に比例するので79



第1図 分解能に優れた79 GHz帯レーダ

Fig. 1 Higher range resolution 79 GHz radar

GHz帯レーダ(c)が最も高い速度分解能を有する。また、アンテナサイズを限定した場合、波長が短いほうがより多くのアンテナを配列できて、ビーム幅の狭いアンテナを構成できるので、79 GHz帯レーダ(c)が最も高い角度分解能を有する。さらに、広い帯域幅を用いるほど高い距離分解能を有するので、76 GHz帯レーダ(b)よりも広い帯域幅が割り当てられる79 GHz帯レーダ(c)のほうが距離分解能が高い。このように79 GHz帯レーダは、距離・速度・角度すべてにおいて、24G/26 GHz帯レーダや76 GHz帯レーダよりも優れた分解能を持つ。特に、インフラレーダの目的とする歩行者の分離検出のためには、数10 cmレベルの高い分解能が求められ、それを実現できるのは79 GHz帯レーダのみである。

筆者らは交差点監視をはじめとするITS用途での実用化を目指した79 GHzミリ波レーダ技術の開発に取り組んでいる。本稿では、インフラレーダとして必要な技術要件と、それに基づいて開発した79 GHzミリ波レーダ技術について述べる。

2. インフラレーダに求められる技術要件

交差点などのインフラレーダは、地上高数mの比較的高所に設置することが想定される。国内の主要交差点形状(3車線対向、20 m車道幅)に対応したセンサシステムが、対角2台のインフラレーダで実現できれば、設置コストの低減により、社会インフラとしての普及促進が図られる。2台のセンサで交差点内を死角なく監視するためには、40 mの検知距離と110°超の視野角が求められる。

また、歩行者だけでなく高速で侵入する車両をリアルタイム監視して情報通知する必要があるため、100 ms以下での更新頻度を実現するアンテナ走査や信号処理の高速化も求められる。さらに実フィールドでは、移動する複数の歩行者が近接する条件や、歩行者の背後に車両などの比較的大きな物体が存在する条件においても検出性能を劣化させないことが要求される。具体的には、歩行者を分離するために必要な距離20 cm以下、および40 m先で車線幅程度の位置精度を確保するために必要な角度分解能5°以下の、高精度な分離性能を達成しなければならない。第1表にこの検討に基づいたインフラレーダに求められる技術要件をまとめる。

このような要件を満たす79 GHzレーダにより、ドライバーや歩行者が視認困難な位置にある車両、二輪車、歩行者を検知し、その情報を車載装置や交通情報板などを通じて提供することで、筆者らは、出会い頭衝突や右折時衝突などといった事故の削減への寄与を目指している。

以降の章において、本要件を実現する独自のミリ波レ

ーダ技術について説明する。

第1表 インフラレーダに求められる要件

Table 1 Requirements for infrastructure radar

検知対象	歩行者, 二輪車, 四輪車
検知距離範囲	5 mから40 m
方位視野角	110°
距離分解能	20 cm
方位角度分解能	5°
データ更新周期	100 ms以下

3. 79 GHzミリ波レーダの高精度化

3.1 人体と車両の分離検出を目的とした符号化パルス技術

歩行者の反射波強度は、車両に対して1/1000 (-30 dB)以下にもなり、筆者らが開発するミリ波レーダには、この微弱な反射波を検知するための高い感度性能が求められる。さらに、車や道路標識、信号などの強反射体が歩行者の周囲に存在する場合でも、歩行者からの反射波を分離して検出するためには、レーダ反射波の受信利得を高め、かつ、処理利得向上時に発生するターゲット位置でない場所に現れる偽のピーク(レンジサイドローブ)を抑えるレーダ方式が必要となる。

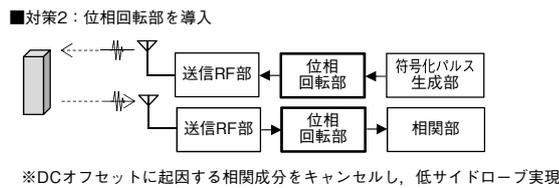
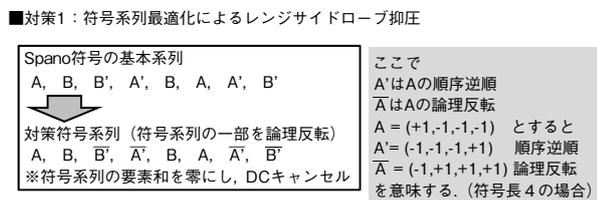
従来、処理利得向上とレンジサイドローブ低減を実現する符号化パルスとして、相補符号が知られている。相補符号は、ペアを構成する符号の自己相関値を加算するとレンジサイドローブが零となる性質を有する。さらにSpanoらは、複数の相補符号を用いて、それらの並びを工夫することで、より高いレンジサイドローブ抑圧特性を実現する符号(Spano符号)を提案している[5]。相補符号はペアとなる符号をパルス符号送信周期(PRI: Pulse Repetition Interval)ごとに切り替えて送信する際に、ターゲットが移動するとドップラー位相変動によりサイドローブレベルが上昇する課題が生じるが、Spano符号はその上昇を抑える特性を有しており、交差点内を高速に移動する車両が存在しても高いサイドローブ抑圧レベルを維持できると考え、筆者らはSpano符号を採用した。

相補符号を実装する際には、レーダ装置の送受高周波(RF)部にDCオフセット、IQインバランスなどの回路誤差が含まれると、レンジサイドローブ抑圧特性が劣化する課題が生じる。この課題に対して、第2図の「対策1」に示すように従来のSpano符号では、Spano符号を構成する相補符号の要素和を零とすることでDCオフセット成分をキャンセルする対策が講じられているが、十分なサイドローブ抑圧特性を実現できていなかった。

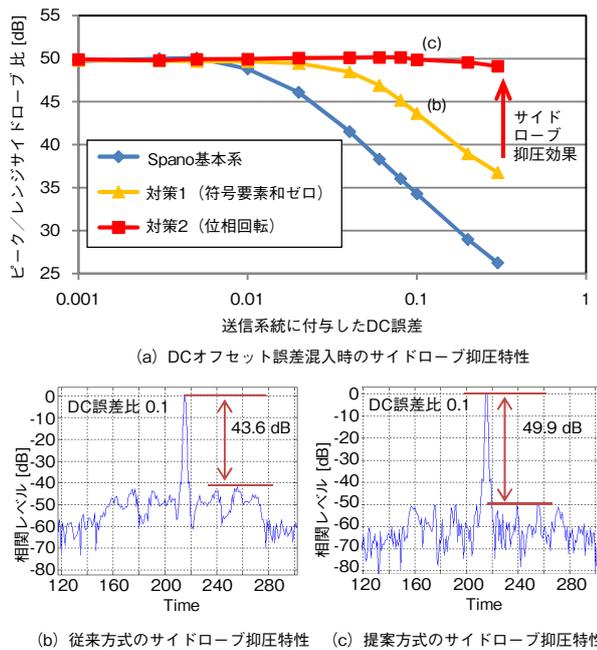
そこで、筆者らはDCオフセットや直交変調・復調時のIQインバランス対策のため、第2図の「対策2」に示すよ

うに送信RF部の直前に+90°の位相回転部と、受信RF部の直後に-90°の位相回転部を設けた。各回転部は2つのパルス符号系列ごとに同期し、それぞれ+90°と-90°の位相回転が実施される。これらの操作によりRF部で付与されるDCオフセットは、2パルス符号系列ごとに90°回転しながら相関部に入力される。これにより、相関部での送信パルス符号との相関結果を処理利得向上のために加算する際に、DCオフセットに起因する相関成分をキャンセルすることができ、その結果として低サイドローブを実現できる。

第3図に、数値シミュレーションで得られた対策効果



第2図 サイドローブ低減に向けた対策
Fig. 2 Method for sidelobe suppressions



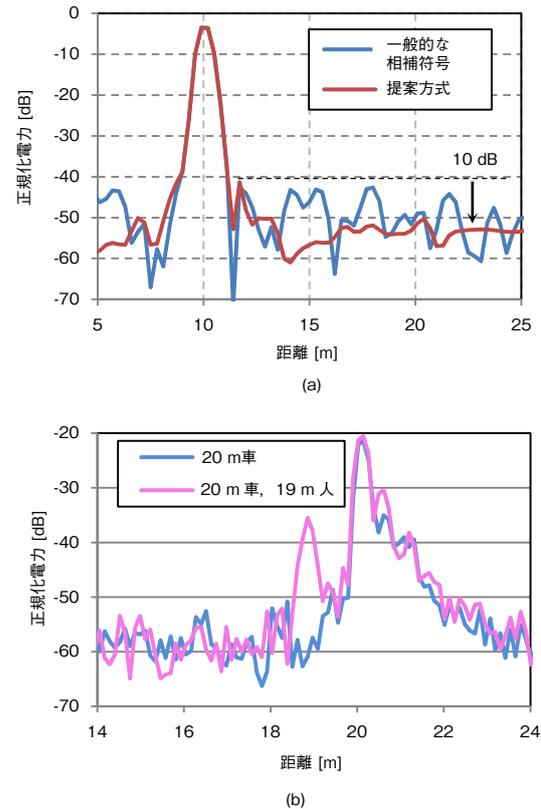
第3図 サイドローブ低減に向けた対策効果シミュレーション結果
Fig. 3 Simulation results of proposed method for sidelobe suppression

を示す。第3図 (a) はDCオフセット誤差混入時のサイドローブ抑圧特性を示しており、横軸に送信信号に対して付与したDC誤差の比 (1に近づくほど送信系統に誤差が多く含まれる)、縦軸に反射波ピークとレンジサイドローブの比 (値が高いほうがレンジサイドローブの抑圧レベルが高い) を示している。図より赤線で示した対策2 (提案方式) が最も高いサイドローブ抑圧効果を示していることがわかる。また、一例として、第3図 (a) 中の点 (b) と点 (c) のシミュレーション結果を第3図 (b), (c) に示した。従来対策方式のサイドローブ抑圧効果が43.6 dBであるのに対し、提案方式のサイドローブ抑圧効果は49.9 dBと高い効果が確認できた。

このように、筆者らは、レンジサイドローブを十分に抑圧し歩行者の分離検知を実現する独自の符号化パルス方式を開発した[6]。

3.2 分離性能の検証

第4図 (a) には、前節で述べた独自の符号化パルス方



第4図 符号化パルス技術による分離性能検証

- (a) サイドローブ抑圧性能の向上結果
- (b) 車単体と車と人の同時測距の比較結果

Fig. 4 Evaluation results of the advanced coded pulse radar technology

- (a) Comparison of two codes' sidelobe suppression
- (b) Detection results of car and human

式による、サイドローブの抑圧性能の実験評価結果を示す[7]。一般的な相補符号 (Golay符号) に対して平均で約10 dBの感度改善を実現した。また、(b)には車単体の反射波を受信した場合と、車と人を同時に測距した場合を比較した図を示した。車からの強反射波の影響を受けずに人体からの微弱な反射波に対しても十分な感度が得られており、距離方向の高い分離検出性能が確認できた。

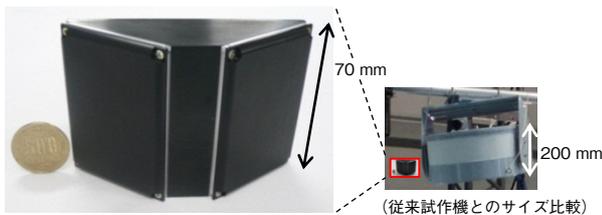
また、方位角度分解能に対しても、筆者らは、送信ビームフォーミングの空間フィルタと受信アダプティブ・アンテナの高分解能推定手法を連動した構成により、目標の方位角度分解能 5° を実現し、79 GHzミリ波レーダの高精度化を実現した[6]。

4. 実用化に向けた取り組み

79 GHz帯ミリ波レーダを用いたインフラレーダの実用化に向けては、交差点への設置を考慮し、レーダモジュールの小型化が必要である。また、交差点全体を検知するインフラレーダシステム構成と課題の明確化も必要な取り組みのひとつである。この章では、こうした実用化に向けての取り組みについて述べる。

4.1 小型79 GHzミリ波レーダモジュール試作機の開発と機能検証

第5図に、 110° を超える広角領域をカバーする79 GHzミリ波レーダモジュール試作機の外観を示す。79 GHzミリ波レーダモジュールの試作機は、 110° 以上の広角領域をカバーさせるため、凸型の筐体 (きょうたい) にアンテナ面を2面、配置する形をとっている。また、第5図の右側に示したのは、2013年10月に日本で開催された第20回ITS世界会議において、当社ブースで動体展示したレーダ方式開発用の79 GHzミリ波レーダ試作装置である。開発した小型モジュールは、従来の試作装置と比較し、容積比約300分の1となり、交差点での実証実験が実



第5図 110° 超の広角領域をカバーする小型79 GHz ミリ波レーダモジュール試作機外観

Fig. 5 Prototype of 110-degree field of view 79 GHz radar

現可能となった。

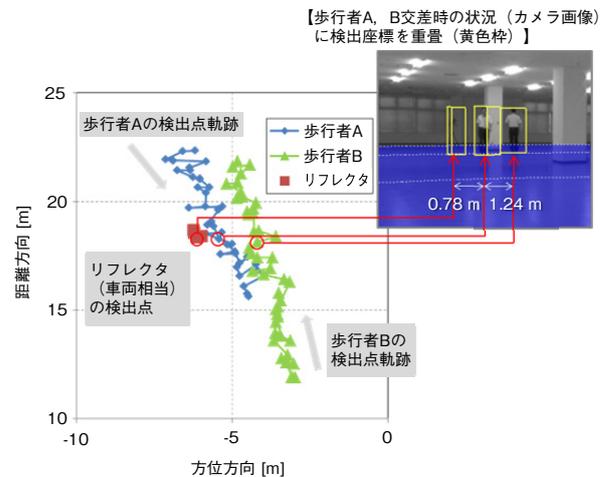
第2表に79 GHzミリ波レーダモジュール試作機の主要諸元を示す。

第2表 ミリ波レーダモジュール試作機主要諸元

Table 2 Specifications of prototype radar module

周波数帯	79 GHz帯
送信電力	10 mW以下
アンテナ	平面アンテナ
サイズ	(アンテナ面片面) 50 mm × 70 mm

また、開発した小型79 GHzミリ波レーダモジュール試作機による分離検出機能を確認した。検出ターゲットとして、レーダからの距離、18.3 mの地点に、20 dBsmの反射断面積 (車両相当) を有するコーナーリフレクタを置き、その近傍に複数の歩行者を設定した。前節で述べた独自の符号化パルス技術によるレーダ方式で得た物体からの反射波に対し、反射強度と反射波のドップラー周波数偏移を考慮して物体が存在する領域を特定し、検出物体の座標を求めた。第6図は、本機能確認において、検出されたそれぞれのターゲットの検出点軌跡を示したものである。歩行者Aはレーダに近づく方向、歩行者Bはレーダから離れる方向で、車両の反射断面積相当のリフレクタ近傍で交差するように歩行した一連の動作における検出点をプロットした図である。さらに図の右上には、歩行者AとBの交差時の様子を、レーダに近接して設置したカメラで撮影した画像を示している。また、レーダによる検出点の座標をもとに、画像に黄色枠で検出領域を重畳して示した。この歩行者A、B交差時、リフレクタと



第6図 車両反射断面積相当のリフレクタと複数人物の分離検出機能確認

Fig. 6 Detection and separation result of multiple pedestrians and car-equivalent reflector

歩行者Aの方位方向距離は0.78 m、および歩行者AとBの方位方向距離は1.24 mであった。この結果から、開発した小型79 GHzミリ波レーダモジュール試作機においても、車両相当の強反射物体近傍における歩行者の微弱な反射波を、強反射物体と分離して検出できることが確認できた。

今後は、屋外評価を通じて、交通環境における検出性能の評価を行うとともに、降雨や降雪といった天候変化や、環境温度の変化に対する検出性能の検証も進めていく。

4.2 インフラレーダシステム実現に向けた研究開発

第7図にインフラレーダシステムによる安全運転支援実現の想定図を示す。図のように、インフラレーダシステムの機能として、複数のインフラレーダの検出結果を統合して、車載装置や交通情報板などに検出情報を提供することを想定している。こうしたシステムの実現に向けては検討すべき課題が何点もあり、本節ではそうした課題解決に向けた研究開発の取り組みについて列挙する。

(1) レーダ検出信頼性向上に向けた取り組み

インフラセンサとして、車・二輪車・人を検知して安全運転支援に資するため、検出結果の信頼性向上は不可欠である。この課題に対する取り組みのひとつとして、筆者らは、歩行者などの識別と車種の判別を可能とする識別信号処理技術の開発を進める。具体的には、79 GHz帯レーダ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。また、複数のレーダを用いて、車両背後の歩行者未検出を防ぐ交差点死角対策技術の開発に取り組む。

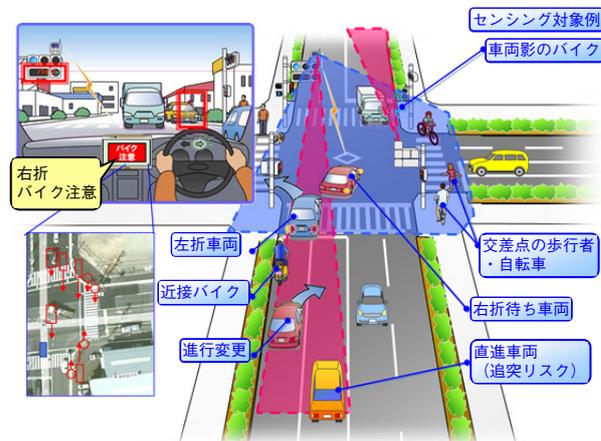
(2) レーダ間干渉低減に向けた取り組み

79 GHz帯のインフラレーダが車載レーダとの耐干渉性能として優れているだけでなく、インフラレーダシステムとして複数インフラレーダ間の相互干渉を制御することが求められる。この課題に対して、筆者らは、交差点環境における干渉評価シナリオを策定し、試験環境を構築して実証実験を進め、インフラレーダの干渉耐性を検証する。また、同一システム内で複数のレーダユニットを統合して、レーダ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開発に取り組む。

(3) 路車連携技術の開発

インフラレーダによる検出情報に基づき、衝突を回避するためにドライバーなど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。この課題に対して、筆者らは実際に、79 GHz帯

高分解能レーダを路側のセンサとして活用したインフラレーダシステムを開発し、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取り組みを進める。



第7図 インフラレーダシステムによる安全運転支援実現のイメージ

Fig. 7 Supposed structure for infrastructure sensor system realizing safe driving support

5. まとめ

以上のように、筆者らは、高いレンジサイドローブ抑圧効果を有する独自の符号化パルス技術により、人体からの微弱な反射波であっても車両と分離して検出可能なレーダ方式を開発した。さらに実用化に向けて、屋外設置を考慮し、小型で高分解能の79 GHzミリ波レーダを開発し、車両相当の強反射物体と人物の分離検出機能を確認した。今後も、交差点における出会い頭衝突や右左折時の衝突削減を目的としたITS用途での実用化を目指して交通環境で79 GHzミリ波レーダの機能・性能検証を進めていく。

また、さらなる応用展開として、交通流の状況や車両の存在を感知する車両感知器や高速道路の侵入者検知／逆走車検知といった道路分野への広がりや、鉄道分野で踏み切り監視や路線落物物検知、また施設や住宅でのセキュリティ分野などでも実用化を実現したいと考える。

本稿で述べた79 GHzミリ波レーダ技術を通じて、当社はさらなる安心安全社会の実現に向けて貢献していく。

本技術は、総務省委託「79GHz帯レーダシステムの高度化に関する研究開発」および戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）のうち総務省委託「インフラレーダシステム技術の開発」による成果です。

参考文献

- [1] 警察庁, “安全・快適な交通の確保に関する統計等-交通事故発生状況,” 統計|警察庁, <https://www.npa.go.jp/toukei/index.htm>, 参照 Apr. 15, 2015.
- [2] 国土交通省, “自動車の車両安全対策と国際基準の動向について,” 第15回自動車安全シンポジウム, May 23, 2014.
- [3] 総務省, “情報通信審議会 情報通信技術分科会 移動通信システム委員会 報告,” 情報通信審議会 情報通信技術分科会 (第86回) 資料, http://www.soumu.go.jp/main_content/000158391.pdf, Apr. 25, 2012, 参照 Apr. 15, 2015.
- [4] Evelyn WEE, “Improving Road Safety through 79GHz Spectrum Allocation,” 3rd iMobility Forum Plenary Meeting, Apr. 17, 2013.
- [5] E. Spano et al., “Pulse coding techniques for ST/MST radar systems,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 34, pp. 304-316, Mar. 1996.
- [6] T. Kishigami et al, “Advanced millimeter-wave radar system using coded pulse compression and adaptive array for pedestrian detection,” IEEE Radar Conference 2013, TS 5284, pp. 1-6, 2013.
- [7] 中川洋一 他, “夜間や悪天候でも車両と人を分離して検出できるミリ波レーダ技術,” 自動車技術, vol. 66, no.10, pp.92-93, 2012.

執筆者紹介



安木 慎 Makoto Yasugi
パナソニック システムネットワークス (株)
インフラシステム事業部
Infrastructure Systems Business Div.,
Panasonic System Networks Co., Ltd.



小林 聖峰 Kiyotaka Kobayashi
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 車載エレクトロニクス事業部
Automotive Electronics Systems Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



佐藤 亘 Wataru Sato
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 車載エレクトロニクス事業部
Automotive Electronics Systems Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



岸上 高明 Takaaki Kishigami
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 車載エレクトロニクス事業部
Automotive Electronics Systems Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



中川 洋一 Yoichi Nakagawa
パナソニック システムネットワークス (株)
インフラシステム事業部
Infrastructure Systems Business Div.,
Panasonic System Networks Co., Ltd.