

# 特殊産業車両向け3次元測位ミリ波レーダ

Three-Dimensional Scanning Millimeter-Wave Radar for Special Industrial Vehicles

佐藤潤二  
Junji Sato

阿部敬之  
Takayuki Abe

岸上高明  
Takaaki Kishigami

村田智洋  
Tomohiro Murata

岩佐健太  
Kenta Iwasa

四方英邦  
Hidekuni Yomo

## 要 旨

作業者から見えない位置の障害物や人を検出して車両の安全走行を実現するための3次元測位ミリ波レーダを開発した。従来のミリ波レーダは垂直方向の検出精度に課題があったが、送受アンテナ配置を工夫した不等間隔MIMO (Multiple Input Multiple Output) アレイ技術によって、少ないアンテナ数で水平/垂直方向の角度分解能が高い3次元測位技術を実現し、空間を3次元運動する物体の追跡検出や歩行人体のイメージングを可能とした。また、140GHz帯の広帯域性を利用して距離方向の高分解能化を実証するとともに、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 集積化した140GHz帯送受信回路とアンテナを一体化した超小型レーダモジュールを開発した。

## Abstract

We have developed a three-dimensional scanning millimeter-wave radar that realizes safe operation of industrial vehicles by detecting obstacles or people in blind spots. Conventional millimeter-wave radar has issues with the accuracy of vertical detection. We have realized a three-dimensional scanning technique with high angular resolution in the limitation of the number of antennas by using an unequally spaced Multiple Input Multiple Output (MIMO) array architecture. This enables tracking detection of objects moving in free space and imaging of pedestrians. We also demonstrate high range resolution by using 140 GHz broadband characteristics, and have developed a compact radar module integrating 140 GHz band Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) frontend circuits and antennas.

## 1. はじめに

ミリ波レーダは、車載用途で76GHz帯が実用化され、人と車を分離検出する79GHz帯高分解能レーダの研究開発も進められている。さらに今後は、物流、検査、工事現場などさまざまな産業分野への応用展開が期待されている。特に、粉じんや降雨、降雪などの視界不良時でも産業車両の安全動作を確保するには、10 m程度の近距離において障害物や車両周辺の人などを検出する必要がある。水平/垂直/距離方向の3次元測位が可能な高分解能レーダが要望されている[1]。

小型化を維持しながら角度分解能を高めるには、複数の送受信アンテナ間の位相差を用いて仮想的にアンテナ開口を拡大するMIMO (Multiple Input Multiple Output) レーダ技術が有効である[2]。筆者らは、少ないアンテナ素子数で水平/垂直方向の角度分解能を最大限に高める不等間隔MIMO (US-MIMO: Unequally-spaced MIMO) アレイ構成を提案[3]することで、3次元運動する物体の追跡検出や歩行人体のイメージングを可能とした。

一方、距離分解能を高めるには広帯域化が重要であり、136 GHz~148.5 GHzの12.5GHz帯域を使用可能な140GHz帯の利用が効果的であるが、実際に広帯域動作させるためにはAD (Analog to Digital) 変換器への要求仕様が厳し

くなる。そこで、AD変換器への要求仕様を緩和できる等価サンプリング技術を140GHz帯レーダ装置に適用することで距離方向の高分解能化を実証した[4]。

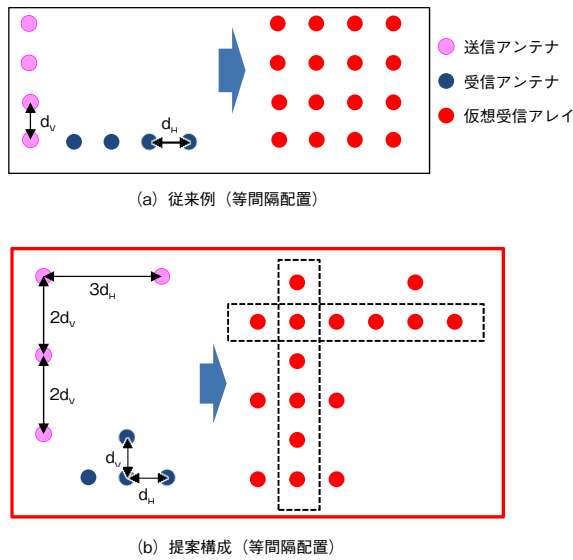
また、特殊産業車両では複数のミリ波レーダを車体や機械の可動部などさまざまな場所へ取り付けることが想定され、低コスト化や設置容易性の観点から車載レーダ(10 cm角程度)以下の小型化が求められる。筆者らは、微細CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) プロセスを用いて140GHz帯送受信回路を集積化し、さらにアンテナと一体化した小型レーダモジュールを12 mm角で実現した。

本稿では、第2章で不等間隔MIMOレーダ技術による角度方向の高分解能化、第3章で140GHz帯の広帯域性を活用した距離方向の高分解能化について述べ、第4章で特殊産業車両への搭載を目指した140GHz帯MIMOレーダの小型モジュール化について述べる。

## 2. MIMOレーダシステム

### 2.1 US-MIMOアレイアーキテクチャ

MIMO技術を用いた3次元測位レーダとして、第1図(a)に従来のMIMOアレイアンテナの配置例を示す[5]。送信4素子を垂直方向に基本間隔 $d_v$ 、受信4素子を水平方向に基



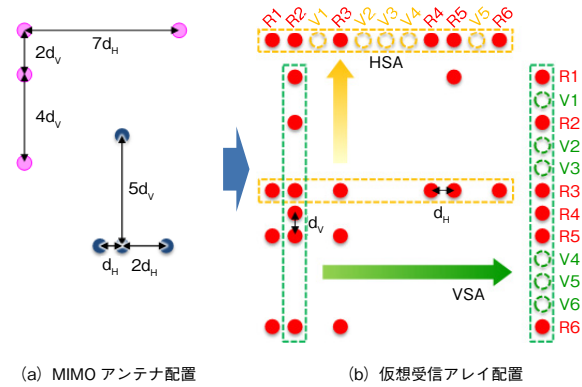
第1図 MIMOアレイアンテナ配置  
Fig. 1 MIMO array antenna position

本間隔 $d_H$ で等間隔に配置することで、16素子の仮想受信アレイを構成できるが、従来構成では縦横ともに4素子分のアレイ開口となり十分な角度分解能が得られない。また、レーダの検出距離を伸ばすためには、1系統あたり複数のアンテナ素子を並べてサブアレイ化し、アンテナ利得を高くすることが有効である。しかしながら、各系統のアンテナ素子をサブアレイ化した場合、アンテナ素子の物理的なサイズが大きくなり（例えば、垂直方向に2素子並べた場合のサブアレイの高さは約1波長）、垂直または水平方向のアンテナ素子間隔を1波長以上に拡（ひろ）げる必要がある。そのため、従来配置では高いレベルのサイドローブ（虚像）が発生し、本来は存在しない位置に障害物があるかのように誤検出を生じる可能性がある。

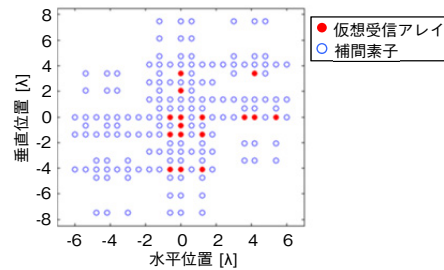
それに対し、第1図 (b) に示すような送信4素子、受信4素子をそれぞれ水平/垂直の基本間隔 $d_H/d_V$ は半波長程度とし、素子間隔は基本間隔の整数倍でL字またはT字に配置するアレイ構成とすることで、仮想受信アレイの水平/垂直方向のアレイ開口を6素子と大きくすることができ、角度分解能を高めることが可能となる。

さらに、アンテナ素子として利得の大きいサブアレイを用いる場合、第2図 (a), (b) に示すように、仮想受信アレイにおける水平/垂直方向の素子間隔に少なくとも1つの基本間隔 $d_H/d_V$ を含み、素子間隔の重複が最小限になるように、各水平または垂直方向の素子間隔を不等間隔に1波長以上に拡げて配置するUS-MIMOアレイを提案した（第2図 (a) は垂直方向の素子間隔を1波長以上に拡げた例を示す）。このような素子間隔配置にすることで、アンテナ利得の大きいサブアレイを用いることがで

き、レーダの検出距離が向上するとともに、次章に示すように、方向推定処理時に補間素子を導入することで、偽像が発生することを抑えることができる。



(a) MIMO アンテナ配置 (b) 仮想受信アレイ配置



(c) 仮想受信アレイ配置 (補間素子あり)

第2図 不等間隔MIMOアレイ構成  
Fig. 2 US-MIMO array architecture

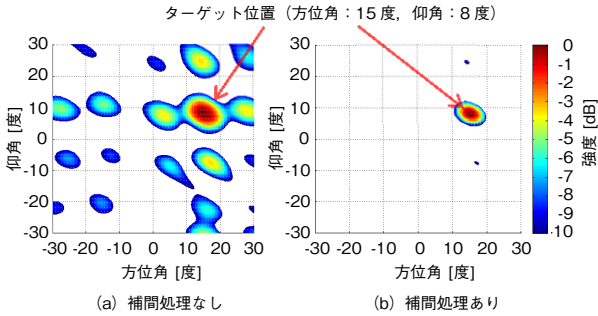
## 2.2 2次元補間処理による到来方向推定

前節で提案したUS-MIMOアレイ構成において、アンテナ素子の物理的なサイズが大きいサブアレイを用いる場合、レーダの測角値の偽像を抑えるため、仮想受信アレイの素子間隔が相対的に同一な関係となる素子ペアを用いた補間素子を導入し、到来方向推定処理を行う。例えば、第2図 (b) の仮想受信アレイのうち垂直方向サブアレイ6素子の受信信号 $x_{R1}, \dots, x_{R6}$ を用いて、補間素子 $V1, \dots, V6$ を含む12素子の垂直方向サブアレイ (VSA) の受信信号を式 (1) のように生成する。

$$\begin{aligned}
 & [x_{R1}x_{R3}^*/|x_{R3}|, x_{R2}x_{R4}^*/|x_{R4}|, x_{R2}x_{R3}^*/|x_{R3}|, \\
 & x_{R3}x_{R5}^*/|x_{R5}|, x_{R3}x_{R4}^*/|x_{R4}|, |x_{R3}|, \\
 & x_{R4}x_{R3}^*/|x_{R3}|, x_{R5}x_{R3}^*/|x_{R3}|, x_{R3}x_{R2}^*/|x_{R2}|, \\
 & x_{R4}x_{R2}^*/|x_{R2}|, x_{R6}x_{R4}^*/|x_{R4}|, x_{R6}x_{R3}^*/|x_{R3}| ]
 \end{aligned} \tag{1}$$

同様な補間を面的に適用することで、第2図 (c) に示す167素子からなる仮想受信アレイの受信信号を生成することができる[3]。第3図に、ターゲットが水平15度、垂直8度方向に存在する条件での2次元フーリエ法を用いた到来方向推定処理の計算機シミュレーション結果を示す。ここで、第3図 (a) は、第2図 (b) に示す補間処理

を用いない仮想アレイ受信信号を用いた場合、第3図 (b) は第2図 (c) に示す補間処理を用いた仮想アレイ受信信号を用いた場合の結果を示す。補間処理を用いることで、角度推定誤差1度以下としながら、ターゲットからの反射波以外に発生する虚像を抑圧できることを確認した。



第3図 2次元角度推定シミュレーション結果  
Fig. 3 2D angular estimation for one target

2.3 MIMOレーダシステムを用いた3次元測位検証

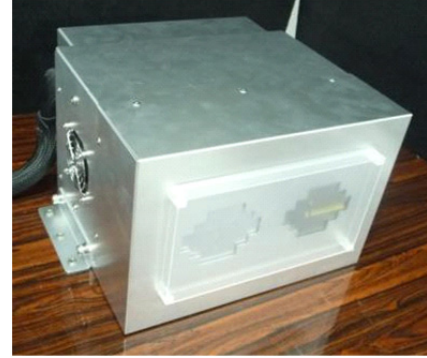
提案した不等間隔MIMOアレイアーキテクチャと2次元補間処理による到来方向推定技術を用いて3次元測位検証を行った。検証に使用した79GHz帯MIMOレーダの主要諸元を第1表に、外観図を第4図に示す。また、第4図に示す79GHz帯MIMOレーダ装置を(X, Y, Z) = (0 m, 0 m, 0.8 m)の位置に配置して、空間を3次元運動する球体およびレーダ装置に接近する歩行人体を検出した結果を第5図に示す。色はレーダから見た相対速度を表しており、レーダに近づく場合を赤色、レーダから離れる場合を青色で表示している。第5図 (a) より、MIMOレーダを用いることで、角度推定誤差1度以内で3次元運動する物体を追跡できることを実証した。

歩行人体の検出においても、2次元測位レーダでは第5図 (b) に示すように縦方向の分解能がないため、人体形状としてイメージングすることができないが、3次元測位レーダを用いることによって第5図 (c) のように歩行人体を人体形状として検出できることを実証した。本技術により、視界が悪くカメラなどでの検出ができないシ

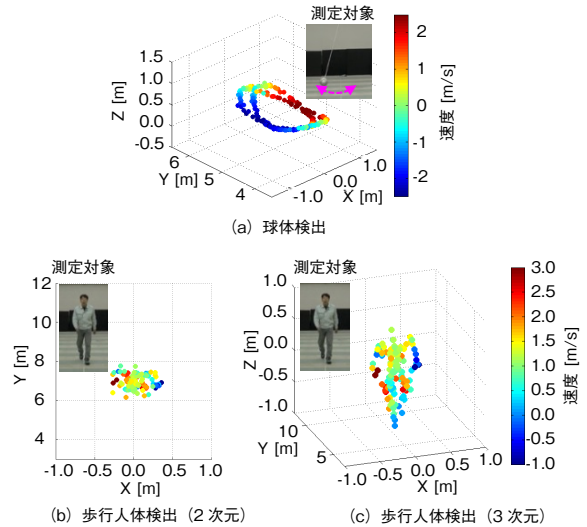
第1表 79GHz帯MIMOレーダの主要諸元  
Table 1 Specifications of the 79 GHz MIMO radar

項目	仕様
RF中心周波数 [GHz]	79 / 80
空中線電力 [mW]	7.0
アンテナ利得 [dBi]	7.5
送信アンテナ数	4系統
受信アンテナ数	4系統
ビーム半値幅 [degree]	水平：60 / 垂直：30

ーンでも、ミリ波レーダを用いて特殊産業車両周辺の人検出の可能性を示した。



第4図 79GHz帯MIMOレーダ装置  
Fig. 4 79 GHz band MIMO radar equipment



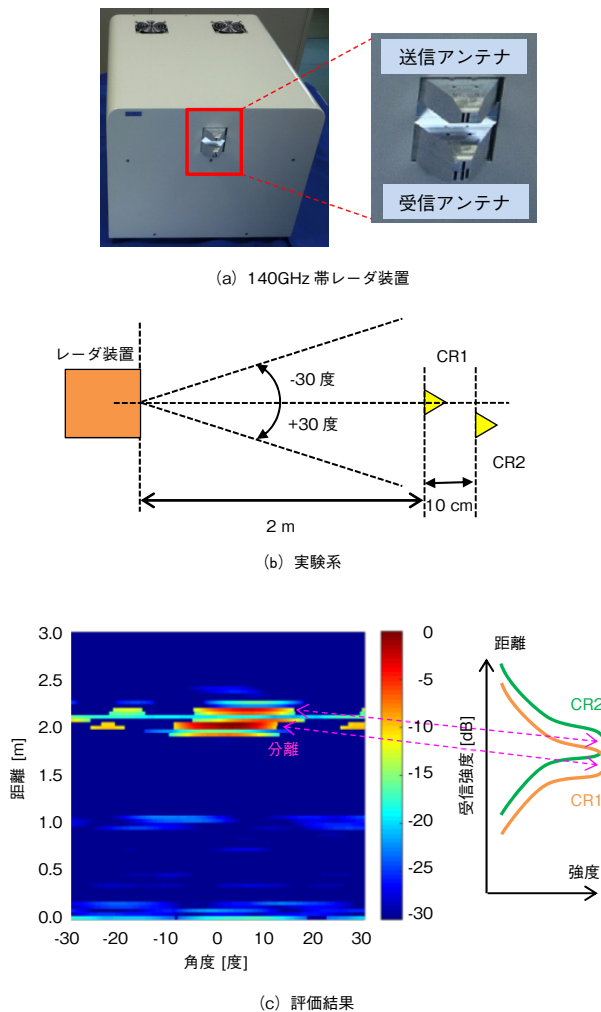
第5図 3次元測位検証結果  
Fig. 5 Results measured using 3D scanning

3. 広帯域システムによる距離分解能の向上

特殊産業車両の周辺監視において、人体や人体よりも小さい障害物を検出するためには、角度方向だけでなく距離方向も高い分解能が必要となり、140GHz帯による広帯域システムの利用が有効である。例えば、距離方向において10 cm離れた2つの物体を分離検出するためには実装時のデバイス性能などを考慮すると2 GHz以上の変調帯域が必要となり、送信DA変換器、受信AD変換器のサンプリング速度としては4 GS/s以上が望ましいが、デバイス性能を考慮するとAD変換器で4 GS/sのサンプリング速度を実現することは難しい。

そこで受信AD変換器のサンプリング速度は2 GS/sとし、送信側DA変換器の高速性を利用して等価サンプリングを行い4 GS/sと等価なデータが得られる方式を採用した[4]。送信側でパターンの異なる符号ごとに1サンプル分シフトさせ、受信側で補間するように信号を合成して等価的に4 GS/sを実現することで、10 cm離れた2物体の分離検出が可能となる。

第6図 (a) に示す140GHz帯MIMOレーダ実証装置を用いて距離分離性能の実験検証を行った。第6図 (b) に2物体の距離方向分離性能評価実験系を示す。2台のコーナーフレクタ (CR) をレーダ装置から相対的に10 cmの距離差で設置して反射波を取得した。第6図 (c) に示す通り、CR1, CR2を分離検出できており、距離方向における10 cmの分離性能を実証した。



第6図 2物体の距離分離性能  
Fig. 6 Range separation performance of 2 targets

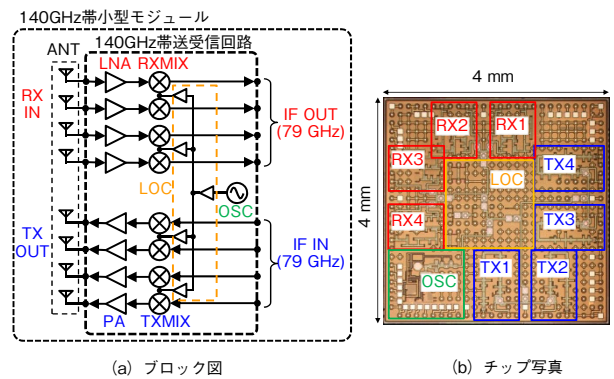
#### 4. 実用化に向けた小型モジュール開発

140GHz帯において10 m先の人物や小物体を検出するには+4 dBm以上のEIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) が必要であり、送信出力-1 dBm以上、アンテナ利得5 dBi以上を目指して小型モジュール開発を行った。

##### 4.1 140GHz帯送受信回路のCMOS集積化

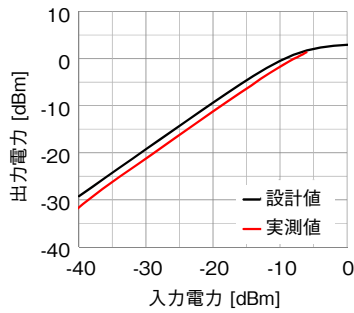
第7図に送受各4系統のMIMOレーダに対応する140GHz帯送受信回路のブロック図と40 nm CMOSプロセスを用いて試作した4 mm角のチップ写真を示す。IF帯として79GHz帯を選択することで、既存のミリ波レーダシステムとの共用を可能としている。送信系 (TX) は電力増幅器 (PA) と送信ミキサ (TXMIX)、受信系 (RX) は低雑音増幅器 (LNA) と受信ミキサ (RXMIX) で構成され、局部発振器 (OSC) で生成されたLO信号はLO分配回路 (LOC) で8分配されて各TX, RXに入力される。

微細CMOSプロセスの進展によって、100 GHz超での回路動作が報告されている[6]が、一般にCMOSプロセスではファウンダリから提供される設計環境は数十GHzまでしか対応していない。そのため、トランジスタや伝送線路、インダクタなどの独自モデリングによる140GHz帯設計環境を構築した。第8図に送信系の入出力特性を示す。入出力の不整合損を除いた変換利得として8.8 dB (設計値10.8 dB)、出力1 dB利得圧縮点 (OP1 dB) として0.3 dBm (設計値-1.2 dBm) が得られており、10 m先の人物・小物体検出に必要な送信出力電力 (-1 dBm以上) をCMOSプロセスで達成できることを実証した。



第7図 140GHz帯CMOSテストチップ (40 nmプロセス)  
Fig. 7 140 GHz band CMOS test chip (40 nm process)



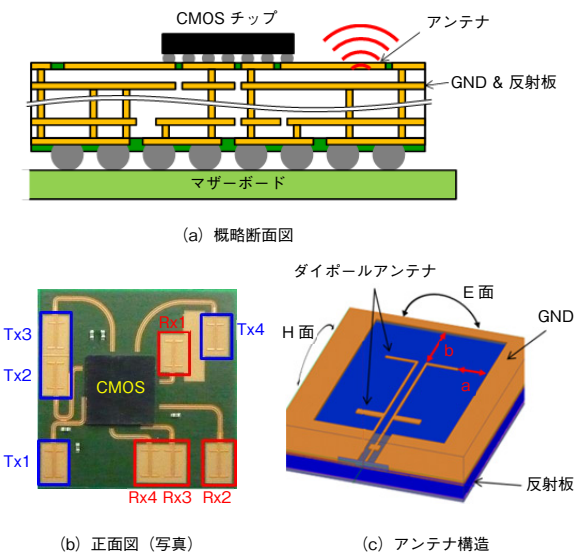


第8図 送信系測定評価  
Fig. 8 TX measured results

4.2 アンテナ一体型モジュール

第9図 (a) に140GHz帯レーダモジュールの概略断面図を示す。配線設計の自由度を高めるため、メタル10層のビルドアップ基板構成としたモジュール基板上に140GHz帯CMOSチップをフリップチップ実装してアンテナ一体型モジュールを構成する。第9図 (b) にCMOSチップとアンテナを一体化して試作した12 mm角のモジュール写真を示す。また、第9図 (c) にアンテナ構造を示す。140GHz帯において10 m先の人物検出に必要なアンテナ利得 (5 dBi, 給電損失含む) を達成するため、2素子ダイポール構成とし、さらに反射板を用いて単指向性化して高利得化を図っている。

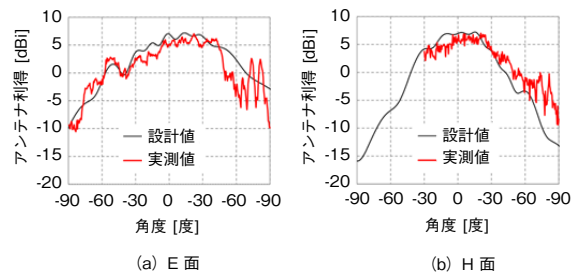
不等間隔MIMOアレイ配置の場合、チップからアンテナまでの給電線路の長さが系統によって異なるため、給電線路の損失に起因するアンテナ利得ばらつきが発生するが、ダイポールアンテナ周囲にグラウンド (GND) を配



第9図 140 GHz帯レーダモジュール  
Fig. 9 140 GHz band radar module

置し、アンテナ素子とGNDとのギャップa, bを調整することによって、アンテナ素子形状は一定としながら等価的にアンテナ開口を変更して各素子の利得均一化を図っている。

第10図に試作したレーダモジュールのTX1アンテナ放射パターンの実測結果を示す。CMOSチップからアンテナへと接続された給電線路の損失分を加味したアンテナ利得、指向性ともに設計値とほぼ一致した特性が得られることを確認した。他のアンテナ素子についても同等の結果が得られており、3次元測位に対応した140GHz帯MIMOレーダモジュールの基本性能を実証した。



第10図 アンテナ放射パターン (TX1)  
Fig. 10 Antenna radiation pattern (TX1)

5. まとめ

送受各4素子によるUS-MIMOアレイ配置で3次元測位を実現するミリ波レーダを開発し、3次元空間を移動する物体や歩行人体を検出できることを実証した。また、140GHz帯による広帯域レーダシステムで距離方向における10 cmの分離性能を達成するとともに、実用化に向けて140GHz帯送受信回路をCMOS集積化し、アンテナと一体化した小型モジュールを開発した。

MIMO技術を用いた3次元測位レーダは、視界不良時における特殊産業車両の安全走行に向けて、検出エリアの死角をなくすための重要な技術となる。また、140GHz帯の利用により高分解能化・小型軽量化が進むことで、産業用途のみならず、民生用途としての展開も期待できる。

今後は、既存周波数帯において高速3次元測位技術を活用した特殊産業車両の周辺監視システムの早期実用化を目指すとともに、さらなる高分解能化に向けて広帯域な140GHz帯を用いた小型軽量のレーダを開発し、民生用途も見据えたさまざまなアプリケーションへの展開を目指す。

本研究は、総務省から受託して実施した「140GHz帯高精度レーダーの研究開発」による成果である。

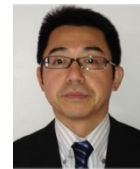
### 参考文献

- [1] 総務省, “140GHz帯高精度レーダーの研究開発”, [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000292209.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000292209.pdf), 参照 Oct.25, 2017.
- [2] J. Li, et al., “MIMO radar with collocated antennas,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, issue 5, pp. 106-114, 2007.
- [3] Kenta Iwasa, et al., “Millimeter-Wave MIMO Radar with Unequally Spaced L/T-Shaped Arrays,” 2016 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.1-4, New Delhi, Dec., 2016.
- [4] 岩佐健太 他, “140GHz帯を用いた高分解能レーダーシステムの一検討”, 電子情報通信学会総合大会, 福岡市, Mar., A-14-1, 2016.
- [5] 白川和雄 他, “自動車用3次元スキャンミリ波レーダ”, 富士通テック誌, vol.30, no.1, 2012.
- [6] Y. Yang, et al., “A 155 GHz 20 Gbit/s QPSK Transceiver in 45nm CMOS,” IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, pp.365-368, Florida, Jun., 2014.

### 執筆者紹介



佐藤 潤二 Junji Sato  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div., Automotive & Industrial Systemes 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 オートモーティブ開発本部  
Automotive R&D Div., Automotive & Industrial Systemes Company



岩佐 健太 Kenta Iwasa  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div., Automotive & Industrial Systemes Company



阿部 敬之 Takayuki Abe  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div., Automotive & Industrial Systemes Company



村田 智洋 Tomohiro Murata  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div., Automotive & Industrial Systemes Company  
博士 (工学)



四方 英邦 Hidekuni Yomo  
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部  
Engineering Div., Automotive & Industrial Systemes Company