

# 車載用ミリ波レーダ\*

## Automotive Millimeter Wave Radars

稲葉 敬之<sup>1)</sup> 桐本 哲郎<sup>2)</sup>  
Takayuki Inaba Tetsuo Kirimoto

Millimeter-wave radars have been researched and developed for automotive applications such as Adaptive cruise control, Stop & Go, collision warning. In this paper, we present the radar modulation methods, maximum detection range and angle estimation methods of automotive millimeter-wave radars. We also show that some future works to improve capability of the radars.

**Key Words** : Electronics, Radar, Intelligent Vehicle, Adaptive Control / Millimeter Wave, Automotive Radars, Radar Equation, Modulation, Angular Detection 10

### 1 はじめに

近年、安全・安心な自動車を実現するために、各種センサシステムを用いた環境認識、及び操作支援技術の研究・開発が進められている。自動車に求められる環境認識、操作支援のための機能は、図1に示すように、車間距離制御 (ACC: Adaptive Cruise Control)、渋滞時などの低速時の先行車追従 (Stop & Go)、衝突警報 (Collision Warning)、衝突被害軽減 (Collision Mitigation)、駐車アシスト (Parking Aid)、ブラインドスポット検知 (Blind Spot Detection)、後方警戒 (Rear Crush Collision Warning)、衝突回避 (Collision Avoidance) などがある<sup>1)</sup>。環境認識のためのセンサとしては、ミリ波レーダ、マイクロ波レーダ、レーザレーダ、赤外線センサ、超音波センサ、光学カメラなどがあり、これらはそれぞれ物理特性に基づく特徴を有している。

これらを車載センサへ応用した場合の適合性を表1に示す。ミリ波やマイクロ波を用いたセンサは、レーザや赤外線を用いたセンサに比べ検知距離が長く、雨天性能/霧・雪での性能 (全天候性)、相対速度の直接計測が可

能であり、先行車両などの運動予測性能に優れるという特徴がある<sup>1)</sup>。また、ミリ波レーダはマイクロ波レーダに比べ周波数が高いため、要求される角度分解能 (アンテナビーム幅) に対しアンテナ径が小さく、車両への搭載性に優れている。

これらの特徴から車載用ミリ波レーダは、主に遠距離レーダ (150 m 以上の検知距離) として、ACC、Stop & Go の機能を実現するためのセンサとして開発が進められている。本稿の主題である車載用ミリ波レーダに対する法的技術要件を以下に示す。

- ① 無線周波数帯: 76 GHz 帯
- ② 空中線電力: 10 mW 以下
- ③ 空中線利得: 40 dB 以下
- ④ 指定周波数帯幅: 1 GHz 以内

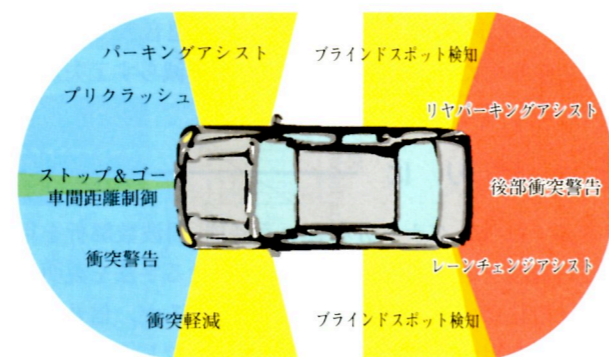


図1 自動車の環境認識・操作支援機能

\* 2009年11月16日受付  
1)・2) 電気通信大学電気通信学部電子工学科 (182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)  
E-mail: inaba@ee.uec.ac.jp  
E-mail: kirimoto@ee.uec.ac.jp

### 車載用ミリ波レーダ

変調方式や角度検出方式などは規定されておらず、その結果、表2に示すような多様な方式が開発されている<sup>2) (3)</sup>。これらの開発例は、120~150 m の検知距離と±5~±8度の水平検知角度を実現しているが、後述するように、変調方式によっては数 m の近距離にある目標の検知が難しいという課題を抱えている。

本稿では、車載用ミリ波レーダの検知距離、変調方式、角度検出方式の基本原理解、及び、今後の解決すべき課題について解説する。

### 2 検知距離

レーダが捉える目標反射信号の受信電力  $P_r$  は次のレーダ方程式によって求めることができる<sup>4) (5)</sup>。

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s} \quad (1)$$

ここで、 $P_t$ 、 $G$ 、 $\lambda$ 、 $R$ 、 $\sigma$ 、 $L_s$  は、それぞれ送信電力、アンテナ利得、波長、目標距離、レーダ反射断面積、降雨減衰などを含めたシステム損失である。式(1)では送受両アンテナの利得は等しいとしている。アンテナ利得  $G$  はアンテナの有効開口面積を  $A$  とするとおおむね次

式で与えられる。

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2)$$

式(1)に示すようにレーダの受信電力は距離の4乗に比例して減衰し、遠方にある目標は検知できなくなる。この限界を最大検知距離と呼ぶ。レーダの目標検出可能最小電力を  $P_{r \min}$  とすると、最大検知距離  $R_{\max}$  はレーダ方程式により次のように求められる。

$$R_{\max} = \left[ \frac{G^2 \lambda^2 \sigma P_t}{(4\pi)^3 P_{r \min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

レーダによる目標の検出が可能な最小電力  $P_{r \min}$  は、信号処理による雑音抑圧を含めた受信機等価雑音電力  $P_{ne}$  との相対値  $SNR_{\min} = P_{r \min} / P_{ne}$  から求められる。所要の  $SNR_{\min}$  はレーダの基本性能を規定するパラメータである。目標検知確率 (目標が存在しているときそれを検出できる確率) 及び誤警報確率 (目標が存在しないときに誤検知する確率) から定められる。車載用ミリ波レーダにおいては、波長  $\lambda$  は約 4 mm、送信電力  $P_t$  は 10 mW、レーダ反射断面積  $\sigma$  は数  $m^2$  程度である。

また、アンテナの大きさについてはフロントグリルのエンブレムなどへの実装性から制約を受け、式(2)にてアンテナ利得  $G$  が定まる。 $P_{ne}$  は、受信機の雑音指数、ボルツマン定数、受信機帯域幅と信号処理利得から決まり、検知距離を確保するには、雑音指数の小さい受信機、周波数帯域幅の抑圧、及び、高い信号処理利得の確保が必要である。

### 3 変調方式

レーダにおける代表的な変調方式はパルス変調である。この方式では、短パルス波を送信し、反射パルス波が受信されるまでの遅延時間  $\tau$  を計測して、目標の距離が求められる。 $\tau$  を電波が目標までの往復距離を伝搬する時

表1 自動車に搭載される各種センサの特徴

性能/方式	近距離レーダ	遠距離レーダ	レーザレーダ	超音波センサ	カメラ	赤外線カメラ
検知範囲 > 2 m	△	△	△	○	○	×
検知範囲 2~30 m	○	○	○	×	△	×
検知範囲 30~150 m	×	○	○	×	×	×
角度検出範囲 < 10 deg	○	○	○	×	○	○
角度検出範囲 > 30 deg	△	×	○	△	○	○
角度分解能	△	△	○	×	○	○
相対速度検出	○	○	×	△	×	×
耐天候性	○	○	△	△	△	△
夜間での検出	○	○	○	○	×	○

○: 適している △: 利用可能 ×: 利用不可

表2 車載用ミリ波レーダの開発例

メーカー	A	B	C	D	E	F	G
外観							
外形寸法 (mm)	89×107×86	136×133×68	137×67×100	91×124×79	123×98×79	77×107×53	80×108×64
検知距離	4~120 m 以上	1~150 m 程度	1~150 m 程度	2~120 m 以上	4~100 m 以上	2~150 m 程度	1~150 m 程度
変調方式	FM-CW	FM パルス	FM-CW	-	FM-CW	FM-CW	2周波 CW
水平検知角	±8°	±5° 程度	±5° 程度	±4°	±8°	±10°	±8°
角度検出方式	メカスキャン	ビーム切換	メカスキャン	ビーム切換	ビーム切換	フェーズドアレー	モノパルス

間として、距離は次式で求められる。

$$R = ct/2 \quad (4a)$$

ここで  $c$  は光速である。また、近接した目標からの反射波を弁別してこれらを検知できる能力(距離分解能)は、 $t_w$ 、 $B$  をそれぞれ送信パルス波のパルス幅及び周波数帯域として、次式で与えられる。

$$\delta R = ct_w/2 = c/2B \quad (4b)$$

車載用ミリ波レーダには、1 m あるいはそれ以上の距離分解能が要求される。式(4b)から1 mの距離分解能を得るには、約7 nsec という極めて短いパルスが必要となる。このような短パルスを受信するためには、数百 MHz 以上の周波数帯幅を確保した広帯域受信機が必要である。先に述べたように受信機の広帯域化は雑音電力の増大を招き、遠距離にある目標の検知が困難となる。

これらを踏まえて、車載用ミリ波レーダでは、表2に示すように、FM(Frequency Modulated) CW 方式、及び2周波 CW 方式という CW 方式が採用されている場合が多い。これらの方式では比較的狭い受信機周波数帯幅にて高い距離分解能が得られ、これにより比較的低速の A/D 変換器及び少ない信号処理演算負荷で距離・速度の計測を実現している。また、最大検知距離を決める信号処理利得及び速度分解能は、一般に観測時間に比例して増大させることが可能である。しかしながら、観測時間の増大は出力データレートの低下を招き、衝突不可避の判断などに必要な目標運動予測性能やプリクラッシュセーフティシステム作動のためのリアクション時間を圧迫することに注意すべきである。

以下、FMCW 方式及び2周波 CW 方式の原理について述べる。なお、ここでは I/Q 検波方式を前提として説明するが、ハードウェア量の軽減を目的として、I-ch だけで受信機が構成されている場合は、FMCW 方式における検知周波数や2周波 CW 方式における距離アンビギュイティなどを与える評価式が一部異なるので注意を要する。

### 3.1. FMCW 方式

図2に示すように、周波数が線形に増加するように周波数変調した up-sweep 信号と、周波数が線形に減少するように周波数変調した down-sweep 信号を、交互に目標に向けて送信する。アンテナで捉えた目標反射信号を送信信号の一部とミキシングしてビート信号を得る。up-sweep 及び down-sweep におけるビート信号の周波数はそれぞれ次式で与えられる。

$$f_{up} = -\frac{2\Delta f}{cT_m}R - \frac{2}{\lambda}v \quad (5a)$$

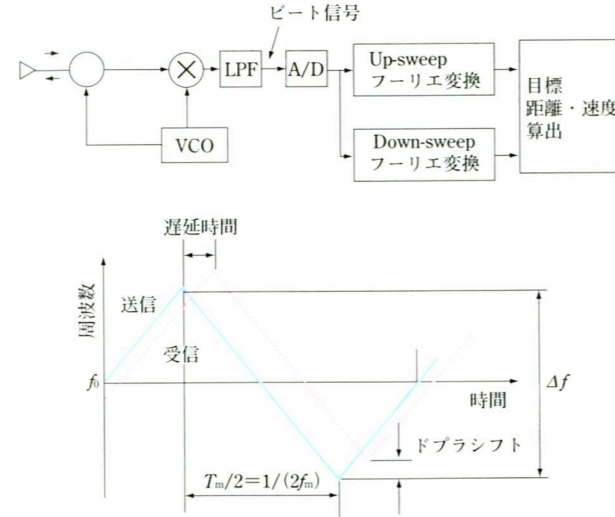


図2 FMCW 方式

$$f_{down} = \frac{2\Delta f}{cT_m}R - \frac{2}{\lambda}v \quad (5b)$$

ここで  $T_m$  は変調繰り返し周期であり、 $\Delta f$  は変調周波数帯幅である。距離  $R$  と速度  $v$  は式(5a)と式(5b)を解いて求めることができる。

この方式の距離分解能  $\delta R$  と速度分解能  $\delta v$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$\delta R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (6)$$

$$\delta v = \frac{\lambda}{T_m} \quad (7)$$

また、この方式で必要な受信機帯域は距離検知幅及び速度検知幅をそれぞれ  $\Delta R$  及び  $\Delta v$  で表すと次式で与えられる。

$$B_0 = \frac{4\Delta f}{cT_m}\Delta R + \frac{4}{\lambda}\Delta v \quad (8)$$

式(8)より、高い距離分解能を狭い受信機帯域幅で得られることがわかる。

このような FMCW 方式の課題の一つは、次である。複数の目標からの反射信号を同時に受信した場合、同時に検出された複数の  $f_{up}$  と  $f_{down}$  の組合せを決定することが必要となる。市街地など同時に受信する反射信号が非常に多くなる状況では、組合せの精度の確保が極めて困難になることが想定される。複数目標環境に対するこのような課題の解決法として、時分割で傾斜の異なる掃引を行う方法が知られているが、観測時間が長くなるとともに目標数が多くなるとその効果が十分得られなくなることが指摘されている。また、FMCW 方式では、遠方にある目標からの反射波が近くにある物体からの反射波

式など他の方式と同様に観測時間  $T_c$  で決まり、

$$\delta v = \frac{\lambda}{2T_c} \quad (13)$$

である。この方式では、距離差による目標の分解機能はないことに注意すべきである。

$R_{max}$  が 200 m の場合、式(12)から  $f_2 - f_1$  は数百 kHz 程度となり、2周波 CW 方式では極めて狭い周波数占有帯域で距離及び速度の計測が可能である。ただし、速度が同じである複数目標からの反射信号が同時に受信された場合、原理的に距離の計測はできない。また、目標との相対速度が零の場合には信号が直流となっており、I-ch のみの受信機構成では位相抽出が不可能となり、距離の計測ができないという課題がある<sup>(7)</sup>。

## 4 角度検出方式と水平検知角

通常、車載レーダでは仰角(垂直)方向の角度計測機能は必要とされないため、仰角方向には固定の狭ビームが用いられる。高い角度分解能で計測が必要とされる方位(水平)方向計測機能実現のため、狭ビームを切り換える方式あるいは機械的にスキャンする方式が採用されている。アンテナ開口長  $D$  は波長を  $\lambda$ 、所要のビーム幅を  $\theta_B$  として、おおむね  $D \approx \lambda/\theta_B$  で与えられる。ビーム幅を狭くすることで、角度分解能とともに高いアンテナ利得を得て、距離性能を確保している。一方、ビームの切り換えや機械的スキャンにより必要な水平検知角内を探索する場合、ビームの先鋭化は全水平検知角内を探索するために必要な時間の増加をもたらすため、先に述べたリアクションタイムの観点から制約を受ける。このような種々の制約により、表2に示したように車載用ミリ波レーダの水平検知角は、高々  $\pm 5 \sim \pm 10$  度となっている。このことが、現在車載レーダが遠距離レーダと近距離レーダに分かれて構成されている主因である。以下、アンテナ方式として、①メカニカルスキャン方式、②ビーム切換方式、③フェーズドアレー及びデジタルフォーミング方式、及びビーム幅を超える角度精度が得られるモノパルス方式について説明する<sup>(8)</sup>。

### 4.1. メカニカルスキャン方式

波長に比べて開口の大きなアンテナを用いてビーム幅の狭いビームを形成し、これをモータなどの駆動力を利用して走査する方式である。比較的簡単に鋭いビームを得ることができるが、走査の機構が必要であり、後述のフェーズドアレー方式に比べて走査速度が遅い。

### 4.2. ビーム切換方式

指向方向が少しずつずれたビーム幅の狭い固定ビーム

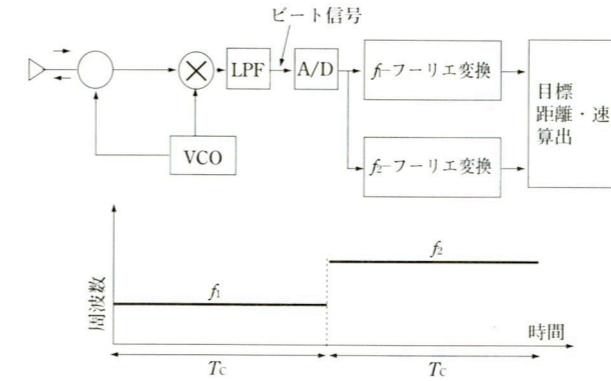


図3 2周波 CW 方式

に埋もれ、その検知が困難となるいわゆる CW 方式に共通の遠近問題を抱えている。この問題を回避する方法として、FMパルス方式(あるいは FMICW)が提案されている<sup>(6)</sup>。

### 3.2. 2周波 CW 方式

ここでは、図3に示すように、周波数  $f_1$  の CW 信号とそれとわずかに異なる周波数  $f_2$  の CW 信号をそれぞれ時間  $T_c$  の間隔で時分割にて切り替えて送信する場合について述べる。目標で反射して受信された信号は、送信周波数が  $f_1$  の区間は周波数  $f_1$  のローカル信号でミキシングされ、送信周波数が  $f_2$  の区間は周波数  $f_2$  のローカル信号でミキシングされる。ミキシング後のビート信号はそれぞれ次式で得られる。

$$B_{f_1}(t) \propto \cos\left(2\pi f_0 t - \frac{4\pi f_1 R}{c}\right) \quad (9a)$$

$$B_{f_2}(t) \propto \cos\left(2\pi f_0 t - \frac{4\pi f_2 R}{c}\right) \quad (9b)$$

ここで、 $f_0 (= 2v/\lambda)$  はドップラー周波数であり、 $f_1$  と  $f_2$  の差がわずかであることから、両ビート信号におけるドップラー周波数は等しいとして問題ない。2周波 CW 方式では、両ビート信号をフーリエ変換してドップラー周波数  $f_d$  を検出し、ついで同周波数におけるスペクトルの位相差  $\Delta\phi (= \phi_2 - \phi_1)$  を抽出して、次式により距離と速度を求める。

$$R = \frac{c\Delta\phi}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (10)$$

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} = \frac{f_d c}{2f_1} \approx \frac{f_d c}{2f_2} \quad (11)$$

このとき、距離アンビギュイティが発生しないためには、

$$\frac{4\pi(f_2 - f_1)}{c} R_{max} < 2\pi \quad (12)$$

を満足する必要がある。速度計測の分解能は FMCW 方

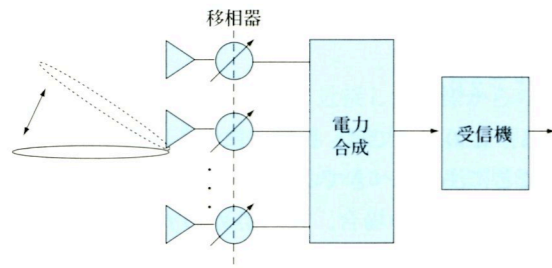


図4 フェーズドアレー方式

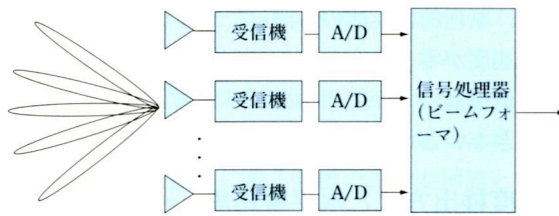


図5 デジタルビームフォーミング(DBF方式)

を複数形成し、電気的に時分割でこれを切り換える方式である。走査範囲が広く、高い角度分解能が要求される場合には多数のビームが必要となり、ハードウェアの規模が大きくなる。

#### 4.3. フェーズドアレー方式及びデジタルビーム形成方式

図4に示すように、フェーズドアレーアンテナは複数の素子アンテナを一定の間隔で配列して構成される。素子アンテナに接続された移相器で信号の位相を制御することによりビームを高周波帯で形成して走査する。ビームを高速で走査できることが最大の特徴である。

図5に示すデジタルビームフォーミング方式は、フェーズドアレー方式と同様に複数の素子アンテナを一定の間隔で配列したアレーアンテナで構成される。各素子アンテナで受信された信号は受信機内で検波されてベースバンド信号に変換される。ついでベースバンド信号はA/D変換器によりデジタル信号に変換され、信号処理演算によりビームが形成される<sup>(9)(10)</sup>。この方式では受信信号の波形情報を数値データとして記憶保存するため、演算によりさまざまな形状・特性(干渉方向にヌル形成など)をもつビームを形成できること、また信号分配による電力低下なく多数のマルチビームを形成可能であるという特徴を有する。たとえば、図5に示すようにマルチビームを形成し、全走査範囲を同時に観測し、近距離目標のデータレートを高めるなど柔軟なレーダ運用を可能にする。

ビーム内に捉えた受信波の受信角度を、ビーム幅を超

えた精度で計測可能とする角度検出法がモノパルス方式であり、上に述べたアンテナ方式と組み合わせ用いられることが多い。ビームスキャンなどによる複数観測時間を必要とせず、一回の観測で角度計測ができることからこのネーミングが与えられた。振幅モノパルス方式と位相モノパルス方式がある。なおこの方式では、ビーム内に二つ以上の信号が同時に受信される場合には、原理上角度計測できないことに注意を要する<sup>(11)</sup>。

### 5 今後の課題

車載用ミリ波レーダが普及するための課題はミリ波デバイス・回路の低価格であるといわれている。近年開発が急速に進展しているCMOSプロセスで実装可能なミリ波UWB通信用チップ技術を利用して、24GHz帯・79GHz帯UWBレーダの開発が今後加速するものと思われる。しかしながら、UWBレーダではその広帯域性により距離検知性能の延伸が難しく、百数十mの距離性能が要求される車載用ミリ波レーダとしては、76GHz帯(帯域幅1GHz)を用いたレーダが引き続き開発されていくものと思われる。

車載用ミリ波レーダの今後の主要課題としては、①レーダの近距離性能向上、②多様な環境での検知能力向上が考えられる。

#### 5.1. レーダの近距離性能向上

先に述べたように、車載レーダは、現在遠距離レーダと近距離レーダは別個のセンサとして開発されている。車載用ミリ波レーダが近距離広角・高分解能性を備えることができれば、車載レーダシステム全体の価格低減化が期待される。これを実現するためには以下の二つの技術課題の克服が必要である。

(1) 限られた電力とアンテナ径での遠距離性と広角化：データレート20Hz以上を維持した上で、距離200mの遠距離性と角度±40度の広角化(近距離)、かつ高角度分解能化の実現<sup>(12)</sup>。

(2) 限られた周波数帯域幅での遠距離性と高い距離分解能：距離200mの遠距離性と50cm程度の高い距離分解能の両立。76GHz帯は法令的には瞬時周波数帯域幅は1GHzと広帯域であるが、レーダには広いダイナミックレンジが要求され、多Bit数で数百MHzの高速A/Dは極めて高価である。少ない周波数占有帯域で高い分解能を確保できるレーダ方式の研究・開発が望まれる<sup>(13)-(15)</sup>。

#### 5.2. 多様な環境での検知能力向上

レーダの受信波には、図6に示すように先行車両から

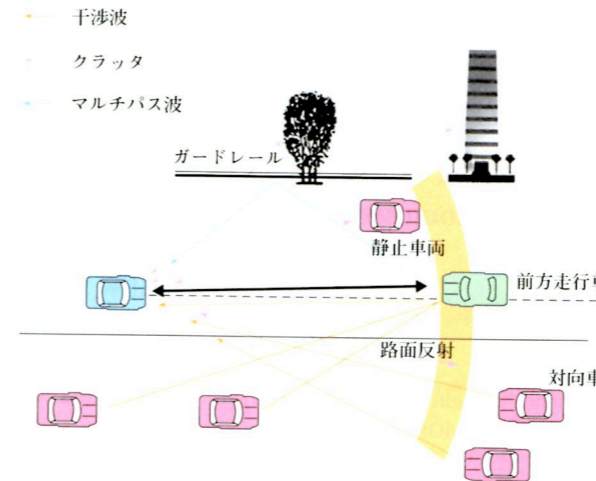


図6 複雑な電波環境でのレーダ運用時の課題

の反射波以外にも以下のような多様な不要波が入射する。

- ① 他の車載レーダからの干渉波
- ② 多重反射波(マルチパス波)
- ③ 歩道橋やガードレールなどからの反射波(クラッタ)

車載用ミリ波レーダが普及し、市街地での利用や多数のレーダが同時に運用される状況が増えると、これらの課題が一気に顕在化すると考えられ、さらなる不要波対処能力向上が求められる<sup>(16)-(18)</sup>。

### 6 むすび

安全・安心、さらには環境にやさしい省エネルギーな道路交通社会を実現するためのITS技術の一環として、車載レーダの研究・開発が進められている。本稿では、百数十mの距離性能を有する車載用ミリ波レーダに焦点を当て、ミリ波レーダの特徴、変調方式、最大検知距離、角度検出方式、及び今後の課題について解説した。現在、車載用ミリ波レーダはまだ広く普及するには至っていない。今後、社会への浸透を図るためには、ミリ波デバイス・回路の低価格化とともに、干渉対策などのレーダ方式からの改善が必要である。

レーダは、車両の周囲環境を認識支援するセンサとして位置づけられているが、今後、課題が一つ一つ克服され、運転支援ひいては自動運転のためのセンサとして発展していくことを願っている。

#### 参考文献

- (1) タイムラー・クライスラー日本ホールディング：車載用UWB近距離レーダについて、情報通信審議会 UWB無線システム委員会、2008-レ作-1-5 (2006)
- (2) 富士通技術、Vol.22, No.1
- (3) 大槻智洋ほか：クルマで瞬き始める電子の「眼」、日経エレクトロニクス、2003.8.4, p.57-68 (2003)
- (4) 桐本哲郎：自動車レーダの基礎、2007 Microwave Workshop & Exhibition, TL08-01 Yokohama, Japan, Nov.(2007)
- (5) M. I. Skolnik: Introduction to Radar Systems(second edition), McGraw-Hill, New York(1980)
- (6) 稲葉敬之ほか：FMICWレーダにおける移動目標検出法、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J88-B, No. 4, p.795-803 (2005)
- (7) 稲葉敬之：多周波ステップレーダによる等速複数目標の距離分離法、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J89-B, No. 3, p.373-383 (2006)
- (8) アンテナ工学ハンドブック(第二版)、第9章レーダ用アンテナ信号処理技術
- (9) S. Tokoro, et al.: Electronically scanned millimeter-wave radar for pre-crash safety and adaptive cruise control system, Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, p.304-309, June (2003)
- (10) 佐藤正己：レーダで障害物検知 小型・低コスト化が進む、Automotive Technology, p.164-167 (2007)
- (11) 稲葉敬之ほか：車載用レーダのための二段階測角方式、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J86-B, No. 8, p.1652-1658 (2003)
- (12) 稲葉敬之ほか：多周波数ステップICWレーダにおける距離・角度の超分解推定法、電子情報通信学会論文誌B, Vol. J91-B, No. 7, p.756-767 (2008)
- (13) 渡辺優人ほか：多周波NL-SWWによる距離サイドローブ低減効果、2009年電子情報通信学会総合大会, B-2-20 (2009)
- (14) 木島壯氏ほか：ミリ波車載レーダへの適用を想定したHybrid-CFS法、2009年電子情報通信学会総合大会, B-2-21 (2009)
- (15) 渡辺優人ほか：多周波NL-SWWにおける拘束条件による周波数ステップ非線形化手法、2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-4 (2009)
- (16) 稲葉敬之：FMICWレーダにおけるスタガPRIによる干渉対策、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J88-B, No. 12, p.2358-2371 (2005)
- (17) 稲葉敬之ほか：干渉波環境での車載用レーダ信号処理構成の検討、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J87-B, No. 3, p.446-456 (2004)
- (18) 稲葉敬之：前方監視レーダのためのElement・Localized Doppler STAP法、電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J87-B, No. 10, p.1771-1778 (2004)

#### フェース

レーダ技術は今まで気象レーダや軍事事用途などに限られていたが、近年車載レーダへの応用が期待されており、広く普及する可能性がみえてきた。無線通信とほぼ同時期に原理が発明されたレーダであるが、通信が携帯電話や無線LANのように広く一般に普及したように、今後広く社会に普及していくことを楽しみに見守りたい。



稲葉敬之

桐本哲郎