

# 特集 前方障害物検出用ミリ波レーダ\*

## A Forward-looking Sensing Millimeter-wave Radar

水野 広  
Hiroshi MIZUNO

富岡 範之  
Noriyuki TOMIOKA

川久保 淳史  
Atsushi KAWAKUBO

川崎 智哉  
Tomoya KAWASAKI

We have developed a millimeter-wave radar which is a forward-looking sensor and can be useful for ACC; Adaptive Cruise Control, pre-crash sensing, and so on.

Concerning detection method of azimuth target position, adopting electronic beam scanning with no moving parts, we have been able to downsize it in depth and have achieved higher reliability.

We are going to read a paper on the radar configuration, beam scanning mechanism, and target detection algorithm.

**Key words** : Radar, Safety, Preventive safety, ACC, Millimeter-wave, Electronic beam scan

### 1. はじめに

前方障害物検出センサは快適・利便システムへの応用であるACC：Adaptive Cruise Control，システム用として，レーザレーダがいち早く1995年に市場に登場した．一方検出性能において降雨などの悪環境に対するロバスト性に着目し電波式レーダ（以下，ミリ波レーダ）の開発が続けられてきたが，検出性能，サイズ，量産性などの課題が多くレーザに遅れて市場に登場することになった．

私達は，より広角に検出できコンパクトなサイズにまとめることで車両への搭載のしやすさを備えた形を目指しこれらの課題克服をはかり，ミリ波レーダを開発した．そのために，方位検出のビームスキャンにおいて機械構造をなくし電子的にビームをスキャンする方式を採用した．

ミリ波レーダを用いロバスト性の高い検出性能を得ることで，快適システムだけでなくプリクラッシュセンシングを応用した安全システムへの応用を可能とした．

### 2. 応用システム例

Fig. 1にプリクラッシュセンシング応用システムとACCシステムの構成例を示す．

ここでミリ波レーダは，検出した物標の距離，相対速度，方位位置データを制御コンピュータに出力する．また，制御コンピュータは自車両の情報も合わせてブレーキ，スロットル，シートベルトなどを操作する．

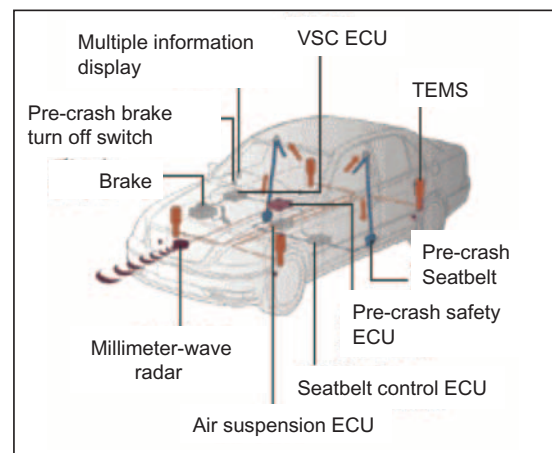


Fig. 1 System configurations

### 3. ミリ波レーダ

#### 3.1 レーダ概要

レーダの構成 (Fig. 2) とそのブロック構成 (Fig. 3) を示す．

アンテナ，ミリ波モジュール，信号処理ボードは，いずれも平面形状であり，これらは積み重ねて構成することができ，奥行き方向の寸法を小さくするのに貢献している．

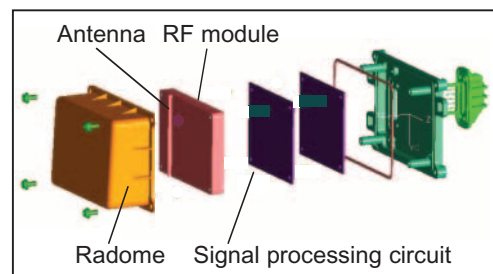


Fig. 2 Millimeter-wave radar configurations

\* (社)自動車技術会の了解を得て，「2004年春季大会学術講演会前刷集」No.33-04,167より転載

Fig. 3にそのブロック構成図を示す。受信アンテナを複数個持ち、これらをスイッチで切換えながらビート信号を時分割受信する。時分割受信で得られたそれぞれの受信信号を基にビームを形成し電子スキャンを構成している。

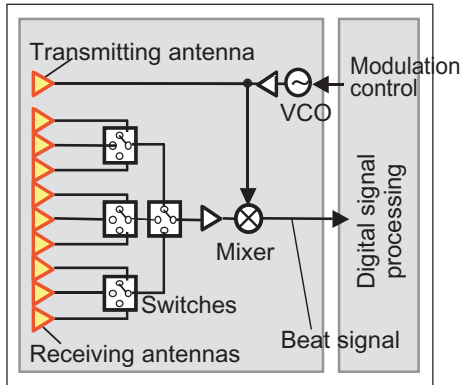


Fig. 3 Millimeter-wave radar block diagram

### 3.2 測距方式

レーダ方式はFMCW方式を採用した。その測距原理の詳細は文献<sup>3)</sup>などに譲り、ここでは概略を記述する (Fig. 4)。

送信電波の周波数を時間に対し直線的に上昇・下降させ送信する。送信波は前方の物標で反射し、反射した電波はレーダと物標の距離をRに対し、往復分の距離2Rの時間遅れを伴い受信機に入力される。受信部は、この受信波と送信波をミキシングすることにより、距離Rに比例したビート周波数をもつ信号を抽出す

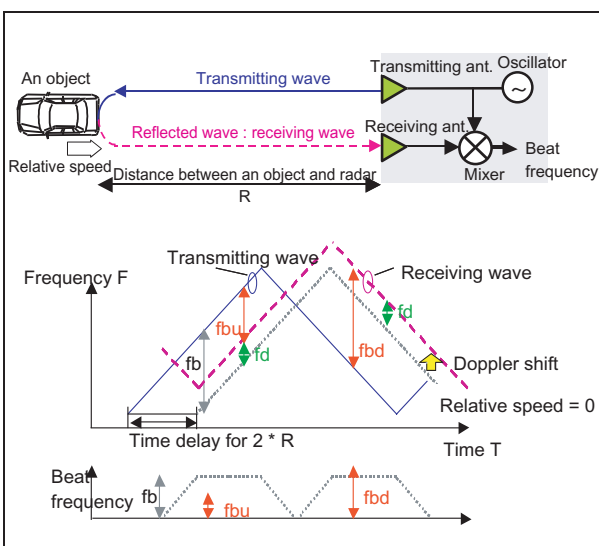


Fig. 4 The principle of FMCW radar

る。そこで信号処理部はこのビート信号をFFT解析し、ピーク検出により周波数を抽出する。また、レーダと前方の物標との間に相対速度がある場合には、反射した電波はドップラー効果により周波数がシフトする。

上昇区間のビート周波数fbuと下降区間のビート周波数fbdを組み合わせることで、距離に相当する周波数と、相対速度に相当する周波数を以下のように求めることができる。

fb : frequency corresponding distance

$$fb = ( | fbu | + | fbd | ) / 2$$

fd : frequency corresponding relative speed

$$fd = ( | fbu | - | fbd | ) / 2$$

### 3.3 電子スキャン方式

物標の水平方位位置を検出する方位検出法としては、小型化および将来の展開のフレキシビリティを考え電子スキャンを用いることとした。その構成と方位検出の原理をFig. 5に示す。本ミリ波レーダは複数の受信アンテナを持ち、それぞれの受信アンテナからの受信信号を用いてデジタル信号処理でアンテナビームを形成するDBF : Digital Beam Forming, レーダである。

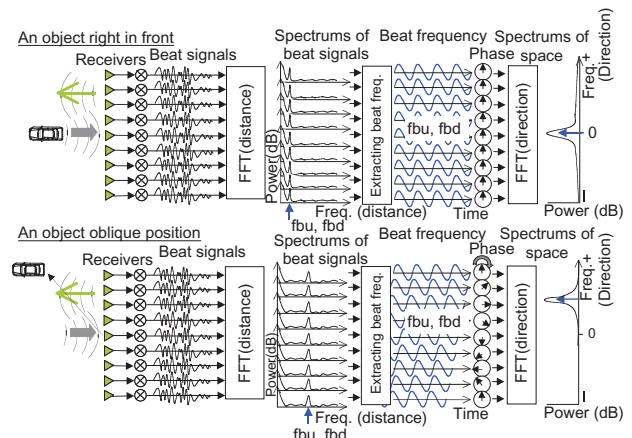


Fig. 5 The principle of beamformer radar

物標の方位検出原理を以下に記す。真正面の物標からの反射信号はそれぞれの受信ビート周波数間の位相が揃い横並びの受信ビート信号間の遷移周波数は0 (ゼロ) である。一方ある角度を伴って (斜めから) 返ってくる反射信号は、送信アンテナから受信アンテナ

ナに至る経路差に基づいた分の位相差がビート周波数間に現れる。横並びの受信ビート信号間にこの位相差に相当する遷移周波数が現れる。

従って、この複数受信器の受信ビート信号間に現れる周波数を計測することで物標の水平方位角度（受信電波の到来角度）が得られる。

この電子スキャン方式は、相隣り合うアンテナ間の受信信号の位相差に基づいて方位を計測する。従って、位相差が $2\pi$ を超えると同じ値を繰り返すことになり、物標の方位が一意に定めることができなくなる (Fig. 6)。

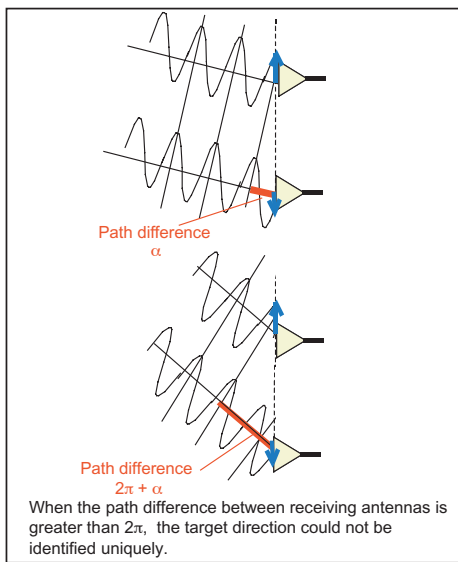


Fig. 6 Ambiguous case in target direction

そこで、この不確定さに基づく物標の誤検出を避けるため、受信アンテナ間距離を狭くしレーダの検出範囲としたい範囲内では受信位相差が $2\pi$ を超えないように配慮した。さらに送受信ビーム指向性を検出範囲内に限定できる程度に細く絞り、位相差が $2\pi$ を超える範囲からの反射信号に対する感度を低く抑えている (Fig. 7)。

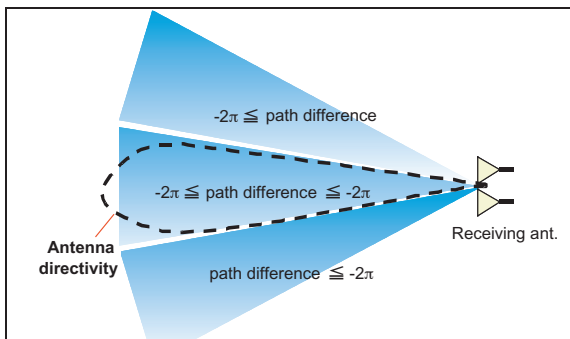


Fig. 7 Antenna directivity

### 3.4 物標認識アルゴリズム

ビート信号から物標を認識する信号処理の手順を Fig. 8に示す。

A/Dコンバータを介してビート信号を取り込んだ後、FFTにより周波数変換する。周波数軸上で（受信レベル）ピークを検出し物標の存在を検出する。続いて、各距離（周波数）で複数並んだ横方向間の位相速度を得るための周波数解析を通し物標の方位（FFTのピーク検出）を抽出する。距離FFT結果から抽出した周波数群（fbu, fbd）の集合に対して、方位検出結果、前回の計測結果および結果からの予測を使って適正な fbu-fbd のペアを判定するようにしている。その周波数ペアから距離、相対速度を計算する。以上により検出した物標に距離、相対速度（距離FFTから算出）および方位（方位FFTから算出）を付けて出力する。

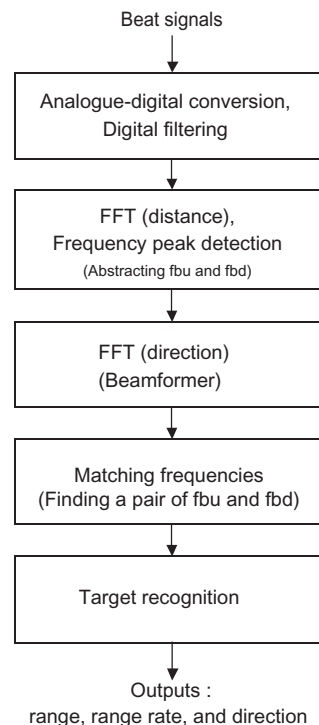


Fig. 8 Signal processing flow

さらに効率的な信号処理アルゴリズムを検討し、距離FFTで物標の存在を見つけた距離、前回の計測結果から予測される物標の距離に優先度を置き、方位FFTを処理することで、上記信号処理を32ビットRISCマイコン1個で実施している（更新周期100ms）。

### 3.5 物標認識結果

ミリ波レーダは物標認識において自車両の動き（自車両速度と走行方向のカーブ半径）を入力として用い、認識の精度を高めて検出物標情報を出力している。

ここにそのレーダ出力例を記す（Fig. 9）。



Fig. 9 Object detection example

図中、前方画像にインポーズされた「中抜き□」はレーダが検出した物標を表し、距離、相対速度、方位を情報として出力する。右側のグラフは鳥かん図で表しており「中塗りの■」が同様に検出された物標を示している。

### 3.6 レーダ仕様

以上述べてきたレーダの外観写真（Fig. 10）および仕様（Table 1）を記す。電子スキャンを登用したことでコンパクトなサイズで±10度の検出範囲を得ている。

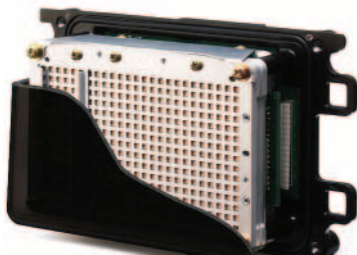


Fig. 10 Appearance

Table 1 Specifications

#### Radar specifications

| Parameter             | Value                                |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Range                 | 5 ... 150 m (Zero relative velocity) |
| Relative velocity     | -200 ... 100 km/h                    |
| Azimuth angle range   | -10 ... 10 deg                       |
| Processing cycle time | 100 ms                               |
| Size                  | 110×80×60 mm                         |

#### RF specifications

| Parameter              | Value                            |
|------------------------|----------------------------------|
| Operating frequency    | 76 ... 77 GHz                    |
| Modulation principle   | FM-CW                            |
| Azimuth scan principle | Electronic scanning (beamformer) |
| Average output power   | 2 mW                             |

## 4. 結論

コンパクトで広角検出幅を備えるミリ波レーダを開発した。本センサは、快適応用のACCシステムだけでなくプリクラッシュセンシング応用システムという安全分野へのシステム応用を可能にした。

今後、さらなる安全向上に貢献するために、レーダ単体の機能アップを図るとともに画像センサなど、他のセンサとの組み合わせにより、より確度の高い物標認識を出力できるよう開発を推進していく。

### <参考文献>

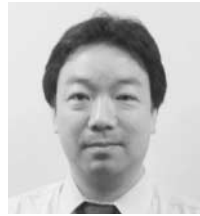
- 1) S.Tokoro, et al. : Electronically Scanned Millimeter-wave Radar for Pre-Crash Safety and Adaptive Cruise Control System, IEEE International Conference on IV(2003), pp.304-309.
- 2) 社団法人 電波システム開発センター：自動車レーダー研究開発報告書（1993.7月）
- 3) 社団法人 電波産業会：自動車通信システムにおける周波数有効利用技術の調査報告書（2000年3月）
- 4) 菊間信良：アレーアンテナによる適用信号処理，東京，科学技術出版（1998），p.347.



<著 者>



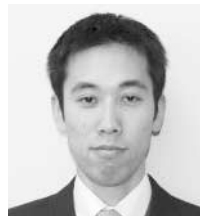
水野 広  
(みずの ひろし)  
統合システム開発部  
ミリ波レーダセンサの開発に従事



富岡 範之  
(とみおか のりゆき)  
安全走行技術1部  
ミリ波レーダセンサの開発に従事



川久保 淳史  
(かわくぼ あつし)  
トヨタ自動車(株)  
第2電子技術部  
ミリ波レーダセンサ及びレーダ応  
用システムの開発に従事



川崎 智哉  
(かわさき ともや)  
トヨタ自動車(株)  
第1電子技術部  
ACC/PCS評価に従事