

76GHz後方近距離ミリ波レーダの開発

Development of 76GHz Millimeter-Wave Radar for Rear Short Range

本田 加奈子 Kanako Honda
米田 公久 Kimihisa Yoneda
山根 克弥 Katsuya Yamane



要 旨

ミリ波レーダ応用システムはこれまでの前方向きのアプリケーションから後方や周辺監視へ広がってきている。事故の傷害で最も多い頸部の保護を目的としたレーダ応用PCS（プリクラッシュセーフティシステム）向けに当社は2006年6月レーダを開発した。これは当社としては初めてモノパルス方式を用いたレーダで、小型で広角検知、高速処理が可能な特徴を持つ。今回の論文では当社で採用した3chモノパルスの原理とその課題について説明する。

Abstract

The system applying millimeter-wave radar is now widely used for monitoring rear direction and the periphery as well as front direction. In June 2006, we developed the radar for PCS (Pre-crash safety system), which aims at protecting passengers from neck injuries, the most frequent type of injury in traffic accidents. This radar, our first product with monopulse system, has characteristics of compact, wide-angle detection, and high-speed processing. This paper describes three-channel monopulse principle that we applied, and our challenges.

1

はじめに

ACC（アダプティブクルーズコントロール^{＊(1)}）など利便系からスタートしたミリ波レーダは、近年PCS（プリクラッシュセーフティシステム^{＊(2)}）など安全系のシステムへと応用範囲を広げ始め、2006年にはトヨタ自動車廠で世界初の後方PCSとしてLS460で製品化された（図-1参照）。当社はこれらACCや前方PCS用レーダを2003年より製品化し、そして前述のLS460へ初めての後方PCS用の後方ミリ波レーダ（図-2）を提供した。今回この後方レーダについて紹介する。

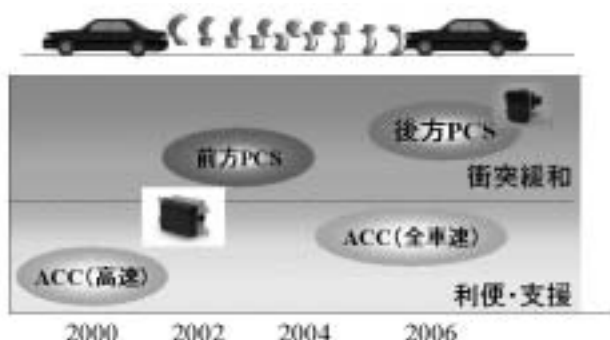


図-1 ミリ波レーダ応用システムの推移

Fig.1 History of Systems Applying Millimeter-Wave Radar



図-2 後方ミリ波レーダ

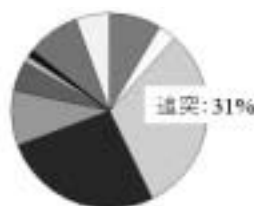
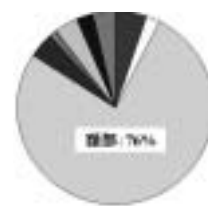
Fig.2 Rear Millimeter-Wave Radar

2

PCSの進化

PCSは従来、死亡事故に着目して正面衝突など車両前方からの衝突事故に対応した前方PCSとしてまず製品化された。一方、負傷者に着目すると追突事故が最も多く、損傷部位として後方から追突された際に負いやすい頸部損傷が多数を占める（図-3-1、図-3-2）。

そこで次の安全システムとして後方PCSがターゲットアプリケーションとしてあがり、本システムを対照としたレーダ開発に着手した。

図-3-1 事故類型別交通事故件数⁽¹⁾
Fig.3-1 Proportion of Traffic Accidents by Type図-3-2 損傷主部位別死傷者数(乗車中)⁽¹⁾
Fig.3-2 Proportion of Casualties (on Board) by Main Injured Part

3

後方PCSとレーダへの要求

後方PCSシステムは、

- (1) レーダで後方からの接近車両を検知し、
- (2) 追突される可能性が高いと判断した場合にハザードランプで警告
- (3) 追突される可能性が非常に高い場合はヘッドレストを最適な位置に動かして頸部損傷を軽減するシステムである。

このシステムからレーダへは、

- ①後方からの車両を検知するため広い検知エリア
 - ②ヘッドレストを的確なタイミングで動作させるため高速応答すること
 - ③バンパ内など制約の多い場所への搭載を実現するため小型であること
- といった性能が要求される。

図-4 後方PCSのイメージ図⁽²⁾
Fig.4 Image of Rear PCS

4

レーダ主要諸元

これらを満足するため我々が開発したレーダの主要諸元を表-1に示す。

＊(1) アダプティブクルーズコントロール（ACC）：

先行車両との車間距離をレーダを使って測定し、一定の車間距離を保つようアクセルやブレーキの制御を行うシステム。先行車両がない場合は通常のクルーズコントロールシステムとして車速制御（ドライバが設定したスピードを保つ）を行う。

＊(2) プリクラッシュセーフティシステム：

予防安全システムの一つ。エアバッグなど衝突が起こってから乗員保護を行うシステムより前に衝突が起こることをあらかじめレーダ等を使って予測し、衝突緩和（ブレーキ補助など）や乗員保護（シートベルトの引き込みなど）の制御を行う。

表-1 主要諸元
Table 1 Main Specifications

項目		仕様
周波数帯		76GHz
測距方式		FM-CW方式
測角方式		モノパルス方式
検知範囲	距離	2～45m
	角度	視野角30°
	相対速度	0～100km/h
大きさ		87×67×46mm

5 レーダ方式

今回のレーダには3で述べたように広角を瞬時に検知しなおかつ小型であることが要求される。そこで我々は測角方式として位相モノパルス方式を当社としては初めて採用した。この方式では二つのアンテナを配置し、到来電波の方向を各アンテナで受信した信号の位相差で求める。一度に広い範囲を見るためアンテナを小型化でき、またアンテナ数も少ないため処理負荷が少ない。方式の原理を図-5に示す。

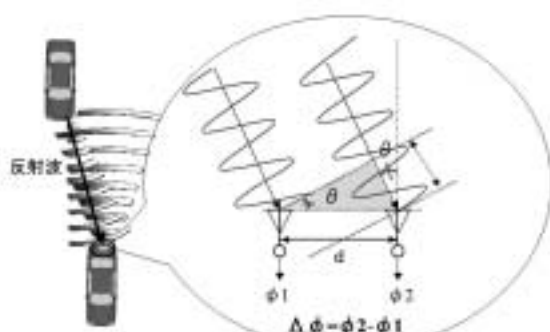


図-5 モノパルス方式の原理図
Fig.5 Principle of Monopulse System

位相差 ϕ は到来角度 θ 、アンテナ間隔 d 、搬送波の波長 λ より下式で求められる。

$$\Delta\phi = 2\pi * (d * \sin\theta / \lambda)$$

この関係をグラフにすると図-6となるが、このとき位相の折り返しをなくすにはアンテナ間 d を $\lambda/2$ 以下にしなければならない。

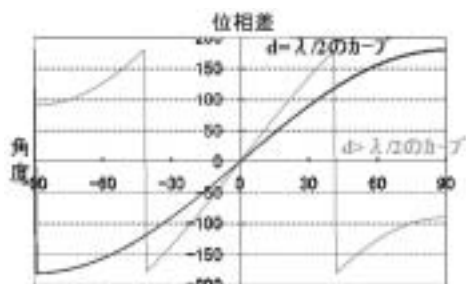


図-6 角度-位相差の関係
Fig.6 Angle vs. Phase Difference

しかし76GHz帯の空間波長 $\lambda=4\text{mm}$ に対し従来より用いていた方式の平面アンテナを構成する素子は $2\text{mm}\square$ 程度の大きさであり、アンテナ間隔を $\lambda/2$ にするのは困難である。

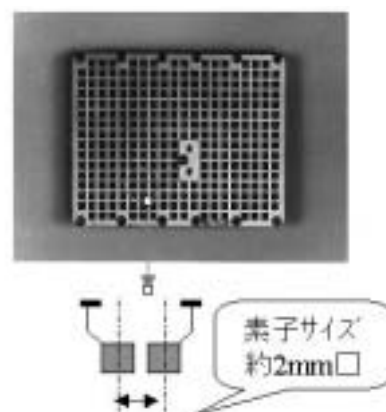


図-7 平面アンテナイメージ図
Fig.7 Image of Planar Array Antenna

そこで我々はアンテナを3個用い、3ch構成とすることで、アンテナ配置限界の問題を解決した。その概念図を図-8に示す。三つのアンテナでそれぞれの位相差が検出されたとき(図中●印)、各アンテナの角度は複数の値をとる(図中▲印)が、それらの角度が一致するところを真の角度とすることで、位相折り返しの問題を解決した。

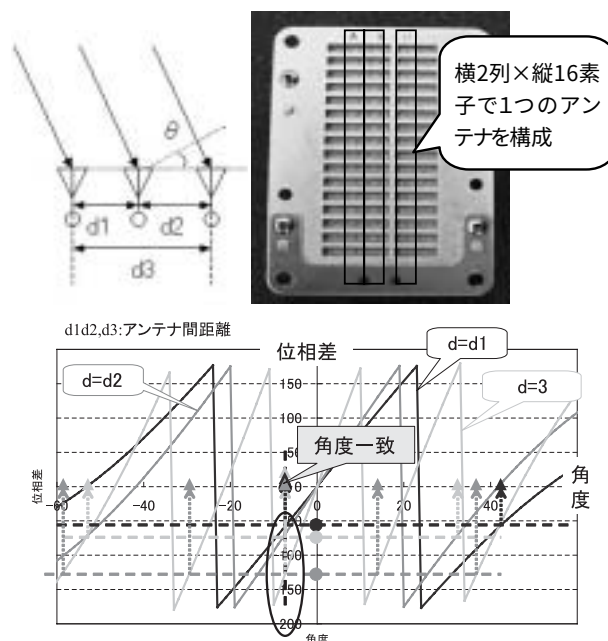


図-8 3chモノパルス方式のアンテナと角度-位相差関係
Fig.8 Relation of 3CH Monopulse Antenna and "Angle vs. Phase Difference"

また、距離と速度の検出にはこれまで我々が用いていた双方の情報を同時に計測できるFM-CW (Frequency Modulation Continuous Wave) 方式を採用した。図-9にその原理図を示す。

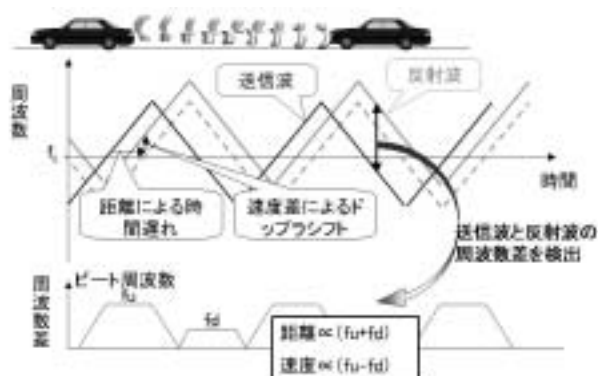


図-9 FM-CWレーダの原理図
Fig.9 Principle of FM-CW Radar

レーダから送信される電波を周波数 f_0 を中心周波数として三角波で変調する。ターゲットにあたって受信される信号の周波数は距離による時間遅れと速度差によるドップラシフトの成分を含み、これと送信波の差分をとれば、距離と速度が求められる。三角波の上り区間の周波数を f_u 、下り区間の周波数を f_d とし、距離周波数 f_r 、速度周波数 f_v との関係を示すと

$$f_u = f_r - f_v$$

$$f_d = f_r + f_v \quad *) \text{ 近づく方向の速度+とする}$$

送信波の変調周波数をFM、 f_0 を中心周波数とする変調幅を Δf 、光速を c 、距離を R 、相対速度を V とすると

$$f_r = ((4 * \Delta f * FM) / c) * R$$

$$f_v = (2 * f_0 / c) * V$$

となり、距離と速度は検出された f_u, f_d より求めることができる。

6

レーダ構成

図-10にこのレーダの構成図を示す。モノパルス方式実現のために新規にアンテナとDP3T-SW (2対3系統の切替SW) MMICを開発、その他のデバイスについてはこれまで我々が前方レーダで開発した技術を利用し共通化を行った。

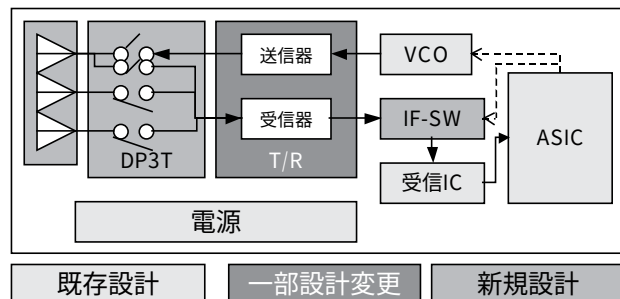


図-10 構成図
Fig.10 Configuration Diagram

7

信号処理部

3chモノパルスを実現するために図-11に示す信号制御タイミングのように、各FM (三角波) 周期に2chずつ、計3回のFM周期にて三つのアンテナを切り替えながら計測を行った。

すなわちアンテナ二つ分の信号をそれぞれ受信1, 2の二つのchに時系列で割り当てて切り替え、各三角波の上り区間、下り区間それぞれでADC (ADコンバータ)、FFT (高速フーリエ変換) の処理を行って距離および速度を同定し、受信1, 2間の同一距離速度の信号の位相差を比較することで角度同定を行う。

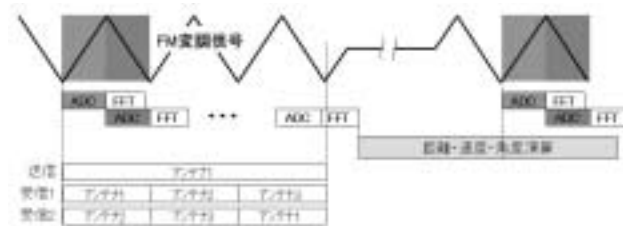


図-11 制御タイミング
Fig.11 Control Timing

三角波の制御とADC、FFTはASIC内部でハード処理として同期させて行い、複雑な演算にかかる時間を短縮して処理サイクル20msを達成した。

ここで、問題となったのは各アンテナ切り替え毎に発生するDCレベルの変動である。FM周期毎にアンテナ=ch間のDCレベルが異なるため切り替え毎に低周波 (=DC) ノイズは発生する。このノイズに埋もれて近距離ターゲット

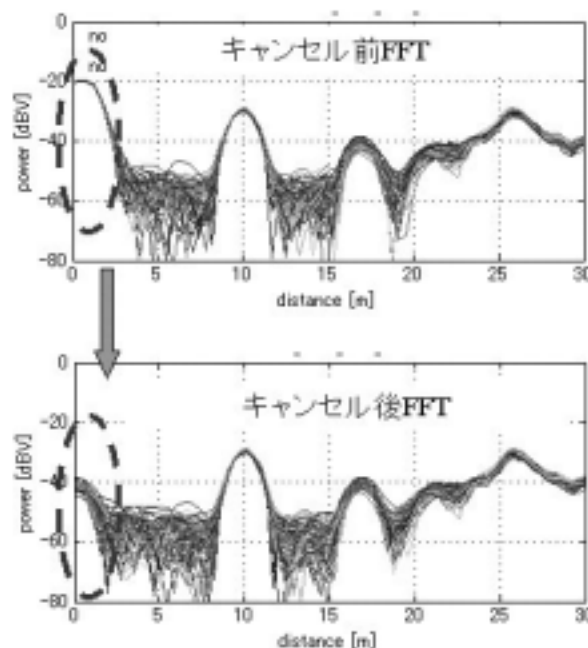


図-12 キャンセル処理結果
Fig.12 Results of Processing Cancellation

トが見えにくくなる懸念があり、このDCノイズの除去が課題となった。そこで我々はノーターゲット状態（＝送信停止）の信号をリファレンスとして各FFT結果から減算し、キャンセル処理を実行することでこの問題を解決した。キャンセル前のFFT結果とキャンセル後のFFT結果を図-12に示す。

この図が示すようにDCノイズの成分が除去され、近距離部分のノイズが低くなっていることがわかる。

9

レーダ検知結果

開発したレーダでの検知状態（実車試験ビデオ画面）を図-13に示す。画面右側にレーダが検知した車両の位置を鳥瞰図とターゲット毎の距離・速度・横位置で示しており、後方風景と画面合成されている□枠と対応する。後方から接近する車両や隣接レーン車両をそれぞれ正しい位置に検出できている。

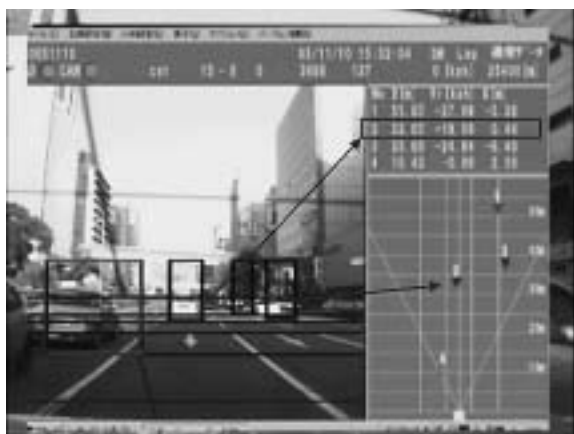


図-13 検知状態

Fig.13 Detected State

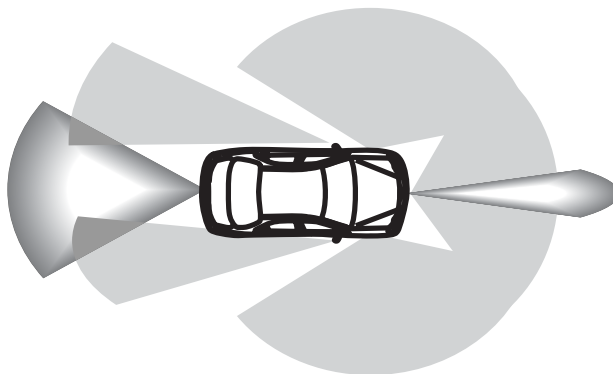
（合成画面 赤□枠：静止物 青□枠：移動物
鳥瞰図 赤色：静止物 青色：移動物
▼：相対速度マイナス（接近）
■：相対速度ゼロ

10

おわりに

レーダを用いたアプリケーションは今後さらに全方位に渡って広がっていくことが予想される。

今後当社でもこれらのシステムに対応したレーダを供給し、死傷者ゼロ、事故ゼロの社会に向け貢献していきたい。



参考文献

- (1) 財団法人交通事故総合分析センタH16年度版
交通統計より
- (2) トヨタ自動車HP後方プリクラッシュセーフティシステム (<http://lexus.jp/models/ls/facts/thought.html>) より
トヨタ・テクニカル・レビュー Vol.45 No.1

筆者紹介



本田 加奈子
(ほんだ かなこ)

1988年入社。以来、車載用電子機器の開発に従事。現在、AE本部 車両技術統括部 第一車両技術部チームリーダー。



米田 公久
(よねだ きみひさ)

1988年入社。以来、車載用電子機器の開発に従事。現在、AE本部 車両技術統括部 第一車両技術部に在籍。



山根 克弥
(やまね かつや)

1981年入社。以来、車載用電子機器の開発に従事。現在、AE本部 車両技術統括部 第一車両技術部長。