車載ミリ波レーダの開発

(株) 豊田中央研究所 小川 勝 Masaru Ogawa

(株) デンソー 夏目一馬 Kazuma Natsume

1. はじめに

近年、自動車において、アダプティブクルーズコントロール (ACC) や衝突被害軽減ブレーキ (AEB)、ブラインドスポットモニタ (BSM) など、多くの安全システムが実現されている (図 1)。更に今後は自動運転を見据えて、安全だけではなく利便性も高めた高機能なシステムの実現が期待されている。これらの機能を実現するために、自車周辺の環境を正確に把握する様々なセンサが使われる。自動車に搭載される周辺監視センサにはミリ波レーダやカメラ、レーザレーダ、ソナーなどがある。ミリ波レーダにはほかのセンサに対し以下のような特徴が挙げられる。

- ・ 150m 以上の検出距離が容易に確保できる
- ・ 観測対象の相対速度が直接検出できる
- ・ 太陽光 (逆光) の影響を受けない
- ・ 雨や霧などに対する透過性が高い

これらの特徴により、離れた距離に存在する車両等の存在や動きを正確に把握できることから、今では多くのメーカーの車にミリ波レーダが搭載されている。自動車に搭載するレーダは、航空機や船舶と比

べて比較的近距离を詳細に検出することが要求され、小形で安価にするための多くの工夫が必要であった。本稿では、車載ミリ波レーダの技術開発について、そこに求められた技術的な挑戦や、実際に試作機を作り始めてから製品化に至るまでの苦労と、その後も進化を続けている技術について、できるだけ分かりやすく紹介したい。

2. 車載ミリ波レーダの実現技術

2.1 電波の割当

電波は世界的な取決めの下、法律に基づいて利用する機器に対して使える周波数が割り当てられている。その一部を図 2 に示す。また、発射してよい電波の強度や変調方式、アンテナの性能などについても細かく規定されている。このうち自動車レーダにはマイクロ波やミリメートル波 (以下、「ミリ波」という。) と呼ばれる比較的高い周波数が割り当てられている。周波数が高いため、小形の装置でもビームを絞りやすく、高い解像度を得やすい。また、使える周波数帯域が広く取れるため、距離の検

図 1 自動車の様々な安全システム

図2 周波数の割当 (一部)

図3 自動車レーダに割り当てられた周波数の変遷

出精度，解像度を向上させられるというメリットがある。

自動車レーダに割り当てられた周波数の変遷を図3に年表で示す。まず，1995年に60GHz帯が割り当てられたが，空気（酸素分子）による減衰が大きく，他の無線機器への干渉が起き難いものの，遠くの物体を検知し難いという問題があった（図4）。また米国や欧州では60GHz帯が自動車レーダに割り当てられておらず，利用できないという問題もあった。これらは，1999年に76GHz帯が割り当てられたことで改善され，現在では24GHz帯と76GHz帯が主に利用されている。24GHz帯はISMバンド（Industrial, Scientific and Medical Band）であり，ほかの無線機器との共用になっている。その後も，他設備との干渉問題を解決しながら出力の増加や帯域の拡大が図られ，2017年には77～81GHzの4GHz帯域も利用可能となった。

2.2 距離・速度検出

距離・速度検出には多くの方式が存在するが，パルス方式とFMCW（Frequency Modulated Continuous Wave）方式が多く使われている。パルス方式はパルス状にした電波を送信し物体から反射波が戻ってくるまでの時間を測定する方式である。またFMCW方式は，周波数を時間とともに変化させた電波を送信し，送信信号と反射波の受信信号を干渉させてビート信号を発生させ，その周波数を検知する方式である（図5）。車載ミリ波レーダでは数m程度の非常に近い物体も検出する必要があり，例えば物体までの距離5mのときの電波の往復時間は約33nsと非常に短い。パルス方式ではこの短い時間を直接

図4 地上における大気減衰係数⁽¹⁾
(気温 15℃，気圧 1013hPa，水蒸気密度 7.5g/m³)

計測する必要があるため高速なカウンタが必要になる。それに対しFMCW方式は，送信信号と受信信号の周波数差で生じるビート信号の周波数を検知して時間に換算するため，比較的实现しやすい。

FMCW方式では，周波数が単調増加する信号と単調減少する信号の2種類の変調信号を交互に送信する。ここでは，それぞれを上りフェーズ，下りフェーズと呼ぶことにする。送信波と物体の反射波から，それぞれのフェーズで周波数 f_{up} と f_{dn} のビート信号が得られる（図6）。

周波数 f_{up} ， f_{dn} は，伝搬による遅延時間で生じる周波数差 f_r と，ドップラー効果による周波数シフト

図5 FMCW方式の基本構成

図6 FMCW方式で取得できるビート信号の周波数

(ドップラー周波数) f_d の和または差となっている。

$$f_{up} = f_r - f_d \quad (1)$$

$$f_{dn} = f_r + f_d \quad (2)$$

このとき、 f_r と f_d は、次の二つの式から計算することができる。

$$f_r = (f_{dn} + f_{up})/2 \quad (3)$$

$$f_d = (f_{dn} - f_{up})/2 \quad (4)$$

f_r は物体までの距離に比例し、 f_d は物体との相対速度に比例するため、FMCW方式では一度の測定で距離と相対速度を同時に測定できる。物体の相対速度がない場合は、 f_{up} と f_{dn} はどちらも同じ周波数 f_r となる。(数学的には符号が異なる。)

2.3 方位検出

方位検出にも複数の方式がある。機械的に受信アンテナの向きを変えるメカニカルスキャン方式(図7)、レンズを利用し位置が異なる受信アンテナを切り換えるレンズスキャン方式(図8)、複数の受信アンテナの信号をハードやソフトで位相を変化させて合成する電子スキャン方式(図9)などである。このうち、電子スキャン方式は機械的な駆動機構がなく、レンズも必要ないことが利点である。しかし、複数のアンテナで振幅や位相を正確に受信しなければ性能が劣化するため、波長が4mm程度のミリ波では、この解決が大きな技術課題となった。しかし、我々は将来的な小形化、低コスト化の可能性と信頼性、静粛性を重視し、当時車載ミリ波レーダでは他社が実現していなかったデジタルビーム

図7 メカニカルスキャン方式

図8 レンズスキャン方式

図9 電子スキャン方式(ビームフォーミング)

フォーミング(DBF)による電子スキャン方式に挑戦した。

ビームフォーミングでは、図9に示すように、反射波が到来する方位に依存して複数の受信アンテナに到達する時間に差があり、これは受信信号の位相差となって現れる。この位相差は反射波が到来する方位によって変化するため、合成した出力の強度が最大になるように移相器で位相を調整することで物体の方位を検出する。隣接する受信アンテナ間の

位相差 ϕ と反射波の方位 θ との間には次の式で表される関係があり、位相差が分かれば反射波の方位が求められる。

$$\theta = \sin^{-1}(\phi\lambda/2\pi d) \quad (5)$$

ここで、 λ は波長、 d は受信アンテナの間隔である。DBF では、アンテナから出力される信号を A-D 変換器によってデジタル化し、信号処理によって合成して方位を検出する。

道路上では車両だけでなく標識やガードレール等が存在するため、複数の物体がほぼ同じような距離に並んでしまうことも珍しくない。式 (5) では一つの位相差から一つの方位を計算しており、複数の反射波が到来すると計算できなくなる。これに対し、複数の受信アンテナを用いて各受信信号の振幅と位相を同時に検出し、連立方程式を解くことで全ての方位を正しく計算することが可能である。

3. 車載ミリ波レーダの技術開発・実用化

3.1 試作機の完成と改良

我々は 1990 年代から車載ミリ波レーダを実現するための技術開発に着手した。当時はデンソーと豊田中央研究所がそれぞれ独自に試作を進めていた。デンソーが試作したミリ波レーダの外観を図 10 に示す。受信アンテナとして 9 チャンネルのスロットアレーを水平に配置した、DBF による電子スキャン方式となっている。受信アンテナの上部にシリンドリカルレンズを搭載しているが、これは垂直面でビームを絞るためである。この試作機を用い、ターゲットを -5° 、 0° 、 $+5^\circ$ に配置して方位検出の実験を行った結果を図 11 に示す。ピークの方

向性パターンもほぼシミュレーションと一致し、期待した結果を得ることができた。

一方、豊田中央研究所が試作したレーダの外観と構成を図 12、13 に示す。構成の簡易化とコスト削減を考え、送受信を 1 系統ずつにしてスイッチで切り換える方式を試みた。送信アンテナの間隔を受信アンテナの 3 倍にして、送信 3 チャンネル、受信 3 チャンネルを時分割で切り換えることで、9 チャンネルの信号を受信できる。これにより 3 チャンネルの切換スイッチが 2 個で済み、9 チャンネルの受信アンテナを切り換えるよりもスイッチのチャンネル数や個数を少なくすることができた⁽³⁾。

これら二つの試作機はどちらも 20~30cm 四方形程度の大きさがあり、自動車に搭載するには非常に大きなものだったが、様々な試験を通して基礎技術を培うことができた。

更に研究を加速するため、デンソーと豊田中央研究所は互いの技術を持ち寄り、アンテナや回路を新たに設計し直してより小形のレーダの実現に向けて技術開発を進めることになった。2000 年頃には幅

図 10 レーダ試作機（デンソー）

図 11 試作機による方位検出結果

図 12 レーダ試作機（豊田中央研究所）

図 13 レーダ試作機の構成（豊田中央研究所）⁽²⁾

図 14 2000 年頃のレーダ試作機（豊田中央研究所）

を 10cm 程度に小形化することに成功した（図 14）。

3.2 技術課題の解決

DBF 方式では隣り合うアンテナ間の受信信号の位相差が 2π を超えるとグレーティングローブを生じ、物体の方位を一意に定めることができなくなる。例えば図 15 (a), (b) の受信信号は全く同じであり、同じ方位から反射波が到来したとして検出される。この誤検出を避けるため、レーダの検出範

図 15 方位決定の曖昧さ

図 16 車両後部の反射強度分析（上面図）

囲内で位相差が 2π を超えないように受信アンテナの間隔を設計した。更にアンテナのビームを絞りサイドローブも抑えることで、図 15 (b) のような位相差が 2π を超える方位から到来する反射波は受信しないように感度を抑えるよう工夫した。

別の課題として、安定して物体を検出する信号処理の実現があった。路上には車両以外にも様々な物体が存在し、それらや路面からの反射等により車載ミリ波レーダの受信信号強度が複雑に変動する。物体の種類だけでなく、その傾き（アスペクト角）によっても大きく変わる。特に波長が短いミリ波では信号強度の変動が激しい。また複数の反射が同時に存在すると方位検出精度にも影響を与える。電波は

図 17 車載ミリ波レーダの製品化の初号機

表 1 初号機の仕様 (2003 年)

Parameter	Value
Maximum Range	150m
Relative	-200~100km/h
Azimuth Angle Range	-10°~10°
Processing Cycle Time	100ms
Operating Frequency	76~77GHz
Modulation Principle	FMCW
Azimuth Scan Principle	Electric Scanning (DBF)
Average Output Power	2mW

目に見えないので、どこからどの程度の強さで電波が反射してくるのか簡単には分からない。そこで、レーダの位置を上下左右で変えながら受信信号を測定し、合成開口技術を応用することで物体の反射度分布を高解像度で詳細に測定する手法を確立した⁽⁴⁾。車両のアスペクト角を変化させて後方から測定した反射強度分布の一例を図 16 に示す。この手法を用いて車両や路上の障害物等を様々な条件で測定した。更にそのデータから走行時の検出結果を模擬できるシミュレータを構築して、レーダの設計や信号処理の改善に活用した。

3.3 車載ミリ波レーダの製品化⁽⁵⁾

その後も試作検討を重ね、ついに 2003 年にデンソーから、世界で初めての DBF による電子スキャン方式を実現した車載ミリ波レーダの初号機が製品化された。図 17 に初号機の外観を、表 1 に仕様を示す。アンテナには感度が高いトリプレート形のスロットアンテナを採用した。アンテナ、ミリ波モジュール、信号処理ボードをいずれも平面形状とし、これらを積み重ねる構造とすることで厚みを 60mm にした。複数の受信アンテナをスイッチで切り換えながらビート信号を時分割で取得し、A-D 変換器でデジタル化して信号処理装置に取り込む(図 18)。信号処理のフローチャートを図 19 に示す。複数の受信アンテナで得たビート信号を、それぞれフーリエ変換することでビート信号の周波数を検出する。更にビームフォーミングを行うことで電子スキャンを実現し、方位を計算する。ビート信号

図 18 初号機のブロック図⁽⁵⁾

図 19 信号処理のフローチャート

の周波数と方位の情報に基づいて、物体の距離と速度、方位を計算する。本レーダを使用した PCS (Pre-Crash Safety) システムがトヨタ自動車により実現された。こちらも世界初のシステムであった。

4. 車載ミリ波レーダの進化

初号機の製品化後も、我々は更なる小形化・低コスト化・高性能化を狙い、レーダ技術の研究・開発・実用化を日々進めている。その実例を紹介する。

4.1 方位検出方式の改良⁽⁶⁾

DBF は高速演算が可能だが解像度が低く、近接した複数の物体を正しく分離して検出することが難しい。そこで超分解能信号処理としてよく知られた MUSIC⁽⁷⁾ を応用し、高解像度化を実現した。ガー

図 20 MUSIC を応用した高解像度化

ドレールの横を走る車両を検出し、信号処理を行った実験結果を DBF と比較して図 20 に示す。DBF では車両とガードレールの区別が難しい接近した状況でも MUSIC では分離して検出できていることが分かる。計算が複雑になるため時間短縮が技術課題であったが、演算装置の性能向上だけでなく、複素数演算を実数演算に置き換えるといった工夫をすることにより実現した。本技術は、2006 年に米国自動車学会 (SAE) から “Arch T. Colwell Merit Award” を受賞している (図 21)。

4.2 距離・速度検出方式の改良

既に述べたように FMCW 方式では、上りフェーズと下りフェーズで得られたビート信号の周波数から物体までの距離や速度を計算する。そのため、物体が複数存在しビート信号が複数検出されたときに、異なる物体で生じたビート信号の周波数から距離や速度を計算すると、誤った検出結果を得ることになる。ターゲット検出のアルゴリズムの工夫により対策可能ではあるが、この誤検出を抜本的になくするため、上りまたは下りフェーズのみを高速で繰り返し送信するパルス圧縮方式を用いた距離・速度検出方式を実現した (図 22)。複数のビート信号から物体との距離に比例した周波数をそれぞれ検出し、その位相の時間変化から相対速度を検出する。短時間で観測できれば複数のビート信号の周波数はほぼ同じであり、異なる物体のビート信号と間違えることがない。高精度な周波数変調の実現と信号処理演算の高速化が課題であったが、高周波デバイスと演算装置の性能向上により実現可能になった。

図 21 SAE 授賞式 (左から 3 人目が夏目 (筆者))

図 22 パルス圧縮方式

5. むすび

車載ミリ波レーダの開発に関わり、安全システムの実用化に幾らかでも貢献できたことに対して、一緒に携わって頂いた皆様に深く感謝している。今後も安全・快適のニーズはますます高まると予想される。我々はミリ波レーダをはじめとした電波の応用製品により、安全で快適な「クルマ社会」の実現に向けて引き続き貢献していきたいと考えている。

文献

- (1) ITU-R Recommendation, P.676-11, "Specific attenuation due to atmospheric gases," 2016.
- (2) 小川 勝, 浅野孔一, 大島繁樹, 原田知育, 山田直之, 渡辺俊明, 西川訓利, "送受アンテナ切換式電子スキャンミリ波レーダ," 信学論 (A), vol.J88-A, no.2, pp.237-246, Feb.2005.
- (3) Y.Asano, S.Ohshima, T.Harada, M.Ogawa, and K.Nishikawa, "Proposal of millimeter-wave holographic radar with antenna switching," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol.2, pp.1111-1114, May 2001.
- (4) S.Ohshima Y. Asano, and K. Nishikawa, "A method for accomplishing accurate RCS image in compact range," IEICE Trans. Commun., vol.E79-B, no.12, pp.1799-1805, Dec.1996.
- (5) 水野 広, 富岡範之, 川久保淳史, 川崎智哉, "前方

障害物検出用ミリ波レーダ," 2004 自動車技術会, 春季大会学術講演会前刷集, no.33-04, pp.5-8, May 2004.

- (6) K.Natsume, Y.Miyake, K.Hoshino, and C.Yamano, "Compact high-resolution millimeter-wave radar for front-obstacle detection," 2006 SAE World Congress, 2006-01-1463, April 2006.
- (7) R.O.Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans., vol.AP-34, no.3, pp.276-280, March 1986.

小川 勝 (正員)

豊田中央研究所環境センシング研究室。1992 名工大学院博士前期課程了。同年豊田中央研究所入社。衛星放送・通信用車載アンテナ、車載ミリ波レーダ、車載ライダの研究に従事。2010 名工大学院博士後期課程了。博士 (工学)。

夏目一馬

デンソー AD&ADAS 技術 2 部。1996 同志社大学院博士前期課程了。同年デンソー入社。ミリ波レーダを含めた先進安全分野のアクティブセンサ開発・設計に従事。2015 走行安全技術 2 部 副部長, 2016 AD&ADAS 技術 2 部部長。