

高性能・車載用ミリ波レーダシステム

High Performance Automotive Millimeter-wave Radar System

上村正継⁽¹⁾ 本田加奈子⁽²⁾ 藤田泰裕⁽³⁾
Masatsugu Kamimura Kanako Honda Yasuhiro Fujita

要 旨

車載用ミリ波レーダの信号処理に周波数解析の手法（FFT）を適用した、高性能車載レーダシステムを開発した。信号処理部には、当社オリジナルDSPチップを用いてリアルタイムでの周波数同定を実現した。

このレーダシステムは、高精度で安定した計測性能を持ち、従来システムでは実現が困難であった、レーダ探知エリア内の複数のターゲットの認識が可能になった。運転時の安全性が重視されるようになってきた現在、自動車周囲を認識する「目」として期待できるものである。

このFFT信号処理の特徴としては、位相情報を用いた高精度な周波数同定法、効果的なノイズの除去、過去の観測結果からのターゲットの推定などがある。

本稿では、ミリ波レーダの計測の原理と試作システムの概要を述べ、これら信号処理アルゴリズムの有効性、試作機の評価結果について述べる。

Fujitsu Ten has developed the automotive millimeter-wave radar system using digital signal processing(FFT). We used our original Digital Signal Processor (FT8802) for frequency identification of radar beat signals, and it can achieve real time processing.

It can also measure distance and speed with precision and good stability, and also recognize two or more targets in the radar detection area. Safety is becoming an important theme in recent years, our radar system can be expected for sensing objects around the car as "human eyes."

Our new signal processing algorithm has following features: highly accurate frequency identification method using phase information, effective noise suppression, and predicting target frequency using the past observation results.

This paper describes the principle of the measurement of millimeter-wave radar, outline of an experimental system, the advantage of our new signal processing algorithm to conventional system, and the evaluation results of an experimental system.

(1), (3) 開発本部技術開発部 (2) モートロニクス本部システム開発部

1. はじめに

マイクロ波を利用した車載レーダは、1970年初め頃から米国において精力的に研究が開始された。しかしながら、装置の小型化に必要なミリ波帯デバイスが軍事用途に限られて一般に普及しなかったことや、オイルショックによる景気後退、電波行政などの諸問題に直面し、早期実用化が期待されながらも、現在まで20年以上が経過した。

この間実用化のネックとなっていた高周波デバイス関連の技術や信号処理に関する技術は大きく進歩した。特に信号処理に目を向けると、マイクロプロセッサの普及と高性能化を経て、今ではDSPによる高速、高精度演算が容易に実現できるようになった。車載レーダの小型化、高性能化に対する壁の一つ一つが取り除かれつつある。

ここでは、FM-CWレーダの信号処理に周波数解析手法を用い、従来の問題点を解決する、より実用的なレーダシステムを開発したので報告する。

2. ミリ波レーダの概要

2. 1 ミリ波レーダの特徴

さまざまな走行条件に対応するため、車載レーダは耐環境性にすぐれた特性が要求される。ミリ波は、光と比べて太陽光、霧、雪、泥等による影響が少なく、対象物の色、材料に左右されない、超音波に比べても空気の乱流の影響が小さいといった、多くの特長があげられる。

また、従来いくつかの製品に利用されているマイクロ波帯の電波と比べると、アンテナ部の小型、軽量化が可能であり、ドップラシフトが大きいいため、相対速度が精度良く測定できるといった利点もある。

レーダには、CWレーダ、パルスレーダ等さまざまな方式があるが、高周波部の構成が比較的簡単に出来ること、距離情報と相対速度情報が同時に得られること等の理由によりFM-CW方式を採用した。

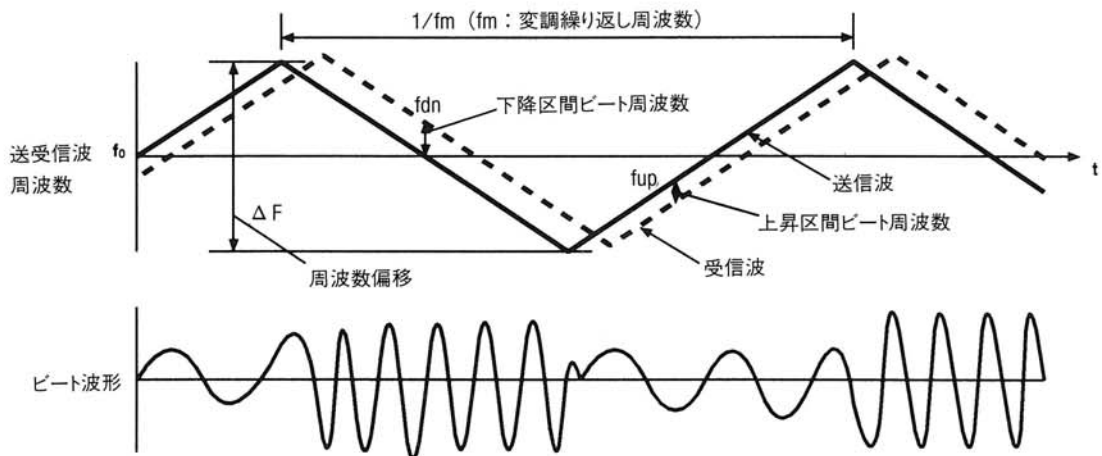


図-1 FM-CW方式の原理
Fig.1 Principle of FM-CW

2. 2 計測の原理

FM-CW方式ミリ波レーダの計測の原理を図-1に示す。

センサより放射される高周波の送信信号は、変調周波数 f_0 、変調繰り返し周波数 f_m 、周波数偏移 ΔF で周波数変調される。ターゲットに当たって反射された信号は、距離成分である時間遅れと、相対速度成分であるドップラシフトをもって受信され、送受信信号がミキサでミキシングされてビート信号を形成する。

ビート信号の周波数 f_b は、相対距離 R 、相対速度 V を用いて、式(1)のように表される (c : 光速)。

$$f_b = \frac{4 \cdot \Delta F \cdot f_m}{c} \cdot R \pm \frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot V \quad (1)$$

実際の相対距離と相対速度の計測では、送信信号周波数が増加していく区間（以下、上昇区間）のビート周波数 f_{up} と送信信号周波数が減少していく区間（以下、下降区間）のビート周波数 f_{dn} を組合せて変形した、式(2)式(3)に従って計算する。

$$R = \frac{c}{2 \cdot \Delta F \cdot f_m} (f_{dn} + f_{up}) \quad (2)$$

$$V = \frac{c}{f_0} (f_{dn} - f_{up}) \quad (3)$$

これらビート周波数を測定することにより、相対速度・相対距離を計測することができる。

3. DSPミリ波レーダシステム

3. 1 開発の目的

図-2に示すように、検知エリア内に複数のターゲットが存在した場合、そのときのビート信号は複数の正弦波が合成されたものとして得られる。実際の路上走行ではしばしば得られるビート信号ではあるが、従来のパルス整形波形のカウントに

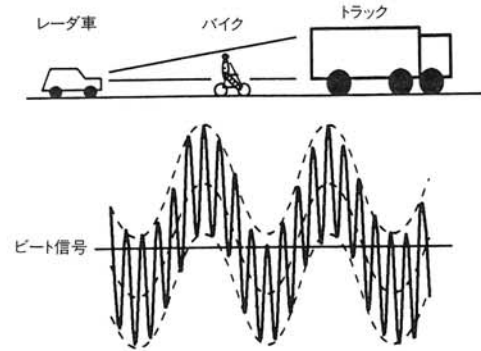


図-2 複数ターゲットとビート波形
Fig.2 Multiple targets and beat wave

よる周波数同定ではそれらの分離が不可能であった。

我々は浮動小数点演算機能を持つDSPを用いて、ビート信号に含まれる周波数を直接、リアルタイムに解析することで、複数ターゲットの認識を行ない、あわせて、高精度な距離・速度計測を行うことを目的として開発を行なった。

3. 2 システムの仕様

試作したミリ波レーダシステムの仕様を表-1に示す。

3. 3 システムの構成

3. 3. 1 基本構成

当社シーダシステムの構成図を図-3に示す。

当社レーダシステムは、センサ部、信号処理部、制御部で構成されている。

センサ部では高周波信号を送受信して、送受信波をミキシングしたビート信号を出力する。

信号処理部はビート信号を離散信号に変換して、周波数解析を行なった後、ターゲットの相対距離、相対速度を演算する。

制御部は、信号処理部で得られた計測結果をもとに、衝突危険性の判断をして警報を発したり、車間距離を一定に保つためにスロットル制御など、レーダの目的に応じた制御を行なう。

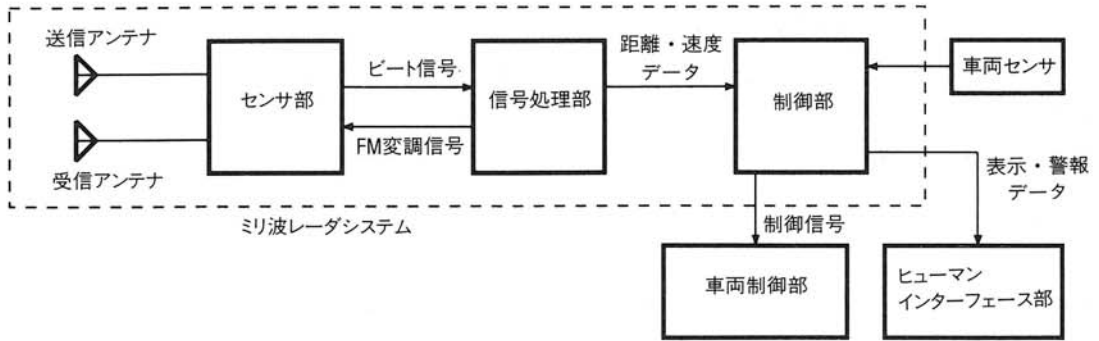


図-3 レーダシステム基本構成

Fig. 3 Basic configuration of the radar system

表-1 レーダシステムの仕様

レーダ方式	FM-CW
レーダ周波数	49.5GHz
周波数偏移	75MHz
ビーム幅	2°
探知距離	5~100m
距離誤差	5%以下
速度誤差	5 km/h 以下
複数ターゲット認識	可能
ターゲット分離認識距離	5 m

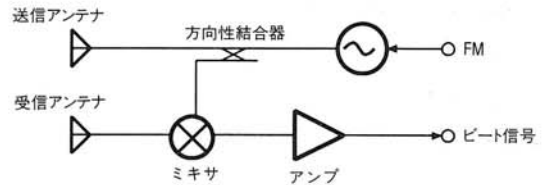


図-4 センサの構成

Fig. 4 Configuration of the radar sensor

3. 3. 2 センサ部

センサは、アンテナと高周波部で構成される。

アンテナはパラボラとスロットアンテナを組み合わせた $2^{\circ} \times 6^{\circ}$ のビームの送受アンテナをV型に配置して、合成された $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ のシャープなビーム幅を得ている。このビーム幅は距離100mで1レーン(3.5m)の検知幅となる距離である。

高周波部は発振器からの信号を方向性結合器を介して送信アンテナへ送り、前方へ放射する。またターゲットに反射された信号を受信アンテナが受け、これと前述の方向性結合器から分岐されたローカル信号とをミキサでミキシングしてビート信号を生成する。構成を図-4に示す。



図-5 センサの外観

Fig. 5 Appearance of the radar sensor

図-5にセンサの外観を示す。

3. 3. 3 信号処理部

信号処理LSIには、当社オリジナルDSP FT8802を用いた。データは、24ビット(仮数部18ビット、指数部6ビット)で表され、固定・浮動小数点両方の演算を行なうことができる。実行

基本サイクルは75nsで、固定小数点演算命令は1サイクル、浮動小数点演算命令は2サイクルで実行する。

データRAMは、24ビット×4kワードを実装した。このうち2kワードはFFTに使用している。

AD変換器は、ビート信号のダイナミックレンジを考慮して12ビットの分解能を持つものを用い、200kHzでサンプリングを行なっている。

信号処理部の構成を図-6に示す。

3. 3. 4 制御部

制御部は、制御用マイコンと入出力部で構成される。

制御部には目的に応じて各種センサ信号（車速センサ、ステアリングセンサ、ブレーキ信号等）が入力され、それぞれのパラメータ値を演算する。信号処理部からは、ターゲットの距離、相対速度情報がシリアル通信で入力され、このデータとセンサの演算値から安全車間距離等を求め、警報を発したりスロットル制御等を行う。

また、ドライバに情報を提供するため、ディスプレイ等に表示データを出力する。

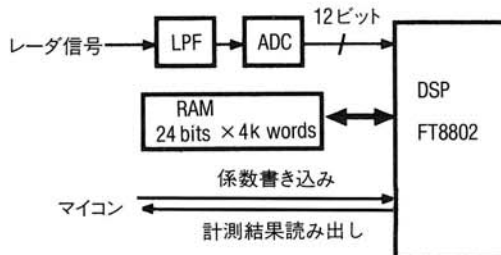


図-6 信号処理部の構成

Fig. 6 Configuration of the signal processing unit

3. 4 信号処理

3. 4. 1 周波数同定

高精度レーダシステムを実現するためには、ビート信号に含まれるピーク周波数を正確に同定することが必要となる。周波数解析にFFTを用いる場合、データの観測時間が有限であることから、周波数分解能について十分検討しなければならない。

観測時間を T とすると、周波数分解能 Δf は式(4)で表される。

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

観測時間 T はサンプリング周波数 f_s とFFTポイント数 N を用いて式(5)のように表され、周波数分解能 Δf は式(6)と変形できる。

$$T = \frac{N}{f_s} \quad (5)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

単純にFFTポイント数 N を大きくして必要な周波数分解能を確保するには、演算時間の増大の問題が大きく現実的でない。そこで、簡単なベクトル演算で実現できる、位相情報を用いた周波数同定法（複素周波数内挿法）を採用し、高精度な周波数同定を実現した。

周波数ピーク周辺の位相と周波数同定の原理を図-7に示す。

3. 4. 2 ノイズの除去

個々のFFT結果から同定されたビート信号のピーク周波数は、電波の反射状態、ターゲットの微妙な動きなどの理由でばらついた値をとる。また、ノイズの混入などもありうるため、安定した計測を行なうには、ノイズを取り除き、ばらつきを押える工夫が必要となる。

一般にFFT結果からランダムノイズの影響を取り除く方法として、数回分の結果をスペクトル成分ごとに加算するということが行なわれている。ホワイト性のノイズが打ち消し合うことで、かなりS/N比は向上する。

ひとつのFFT観測区間はわずか0.64msであり、

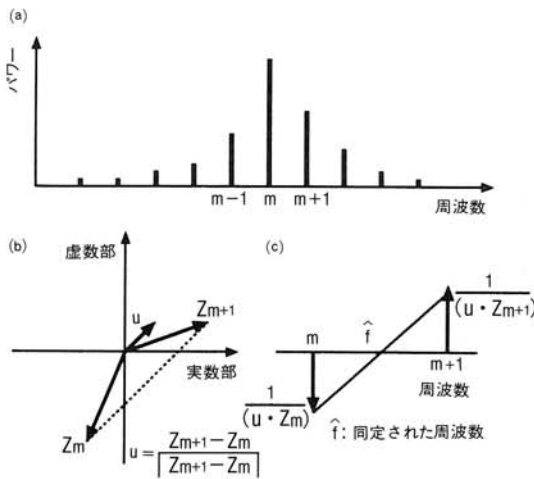


図-7 周波数ピークの位相と周波数同定

Fig. 7 Phase of peak frequency and frequency identification

この短時間内にピーク周波数の変化はほとんど無視できるので、数回のスペクトルの加算はノイズ除去に有効であると考えられる。

しかしながら、周波数同定に必要な位相情報を加算の結果失ってしまう問題が発生するため、加算結果を用いて周波数同定結果からノイズを除去する方法で解決した。

処理手順は次のようになる。

- 1) 個々のFFT結果から複素周波数内挿法を用いてピーク周波数を同定する。同定結果は、メモリに格納しておく。
- 2) 数回のFFT結果を加算した後、ピークとなっている部分を、実際のピーク周波数候補位置として抽出する。
- 3) メモリに格納されたピーク周波数値を周波数候補位置と対応づけ、対応が合ったピーク値を用いて、実際のピーク周波数値を求める。対応がなかったものは、ノイズとみなして削除する。

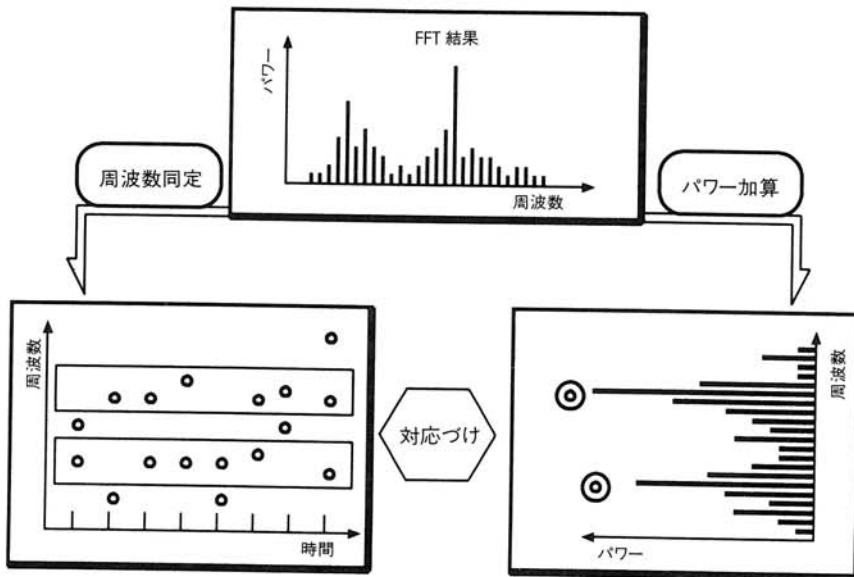


図-8 ノイズ除去方法

Fig. 8 Noise suppression

図-8に処理の概要を示す。

3. 4. 3 ターゲットの推定による安定した計測

1回毎の周波数計測結果から距離・速度を計算した場合、レベルの一時的な落ち込みによる検知洩れ、除去しきれなかったノイズの影響等により、計算結果にばらつきが生じたり、場合によっては計算ができない状況が生じる。

ターゲット自体は突然に出現したり消滅したりするものではないため、過去の観測結果とのつながりを考慮することで、計測の安定性の向上が図れる。

図-9に示すように、各ターゲットに対して、過去の観測結果から今回観測されるべきピーク周波数値を推測し、今回の観測値と対応づける。対応づけられたピーク周波数値は、ターゲット毎に記憶しておく。対応がつかなかったピーク周波数値は、新たなターゲットが出現したとみなして記憶する。

ターゲットの相対距離・速度の計算には、記憶しておいた周波数値を基に補完・フィルタ等の処理を行なった結果を用いる。受信信号のレベルが不足した場合など、あるターゲットに対して一定時間内で記憶されている周波数値の個数が決められた値に満たない時は、そのターゲットに対する結果を出力しないことにより、ノイズを信号と誤

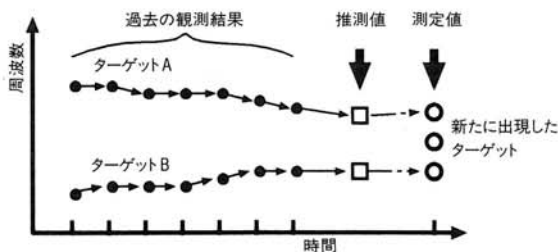


図-9 ターゲットのピーク周波数の推定
Fig. 9 Target prediction

認識する問題を除去することができる。

4. 実験結果

4. 1 静止ターゲットの認識

レーダ車の前方に乗用車を5mから100mまで5m毎に停止させ、静止したターゲットに対する計測性能を評価した。実験結果を図-10に示す。

誤差最大のところでも1m以下の精度で計測しており、十分な性能を有していることがわかる。

4. 2 マルチターゲットの認識

レーダ車の前方60mにワンボックスカーを停車させ、その手前に125ccのオートバイを5mから55mまで5m毎に停止させ、マルチターゲットの分離性能を確認した。実験した結果を図-11に示す。

2つのターゲットの測定距離は、遠方のワンボックスカーが1m程度近めに測定される場合はあるものの、正しく計測できており、マルチターゲット認識が可能であることがわかる。

オートバイが20m以下にある時にワンボックス

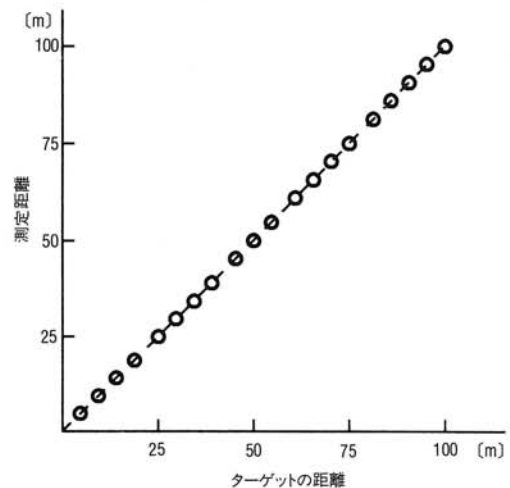


図-10 静止ターゲット計測結果
Fig.10 Distance measurement results
(static target)

カーが認識されていないが、これは、オートバイがアンテナの正面に位置したため、ワンボックスカーからの反射波がマスクされてしまったからで

ある。実際の走行時のように左右にずれている場合にはどちらのターゲットも認識できる。

4. 3 走行評価

前方の乗用車との車間を変化させながらテストコースを走行したときの計測データを図-12に示す。

距離、速度の精度、応答性共良好で走行状態でもターゲットを正しく認識できている。

5. ま と め

レーダ信号処理にDSPを応用し、距離・速度精度もよく、安定したレーダシステムを開発することができた。試作機の評価を通じて、FFTによる周波数解析、ノイズ除去、ターゲットの推測等の信号処理アルゴリズムが有効であることを確認することができた。

走行時の距離誤差5%、速度誤差±3 km/hと

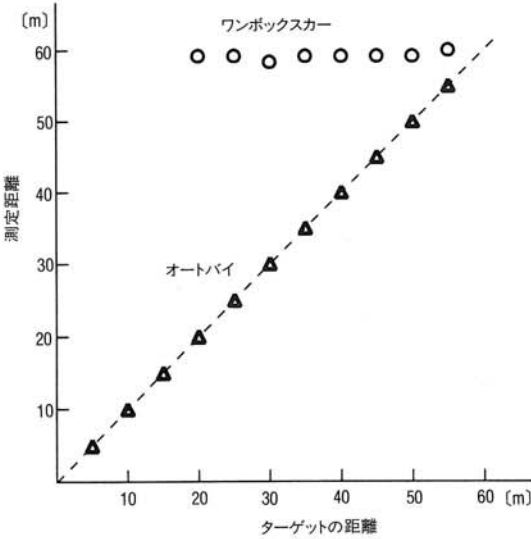


図-11 マルチターゲット計測結果

Fig.11 Results for multiple-target measurement

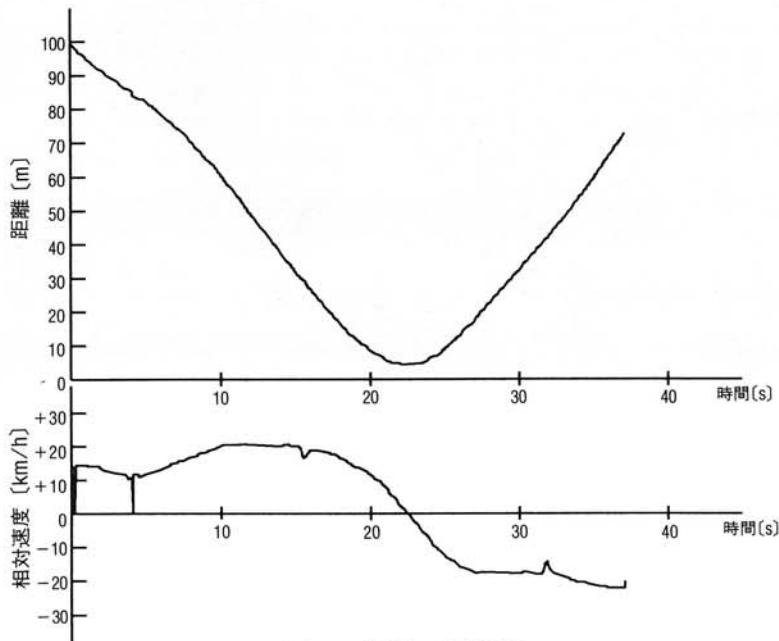


図-12 走行時の計測結果

Fig.12 Results for running vehicle measurement

いう結果から、レーダシステムが実用段階に近づいているということがいえる。

今後の課題としては、マルチパス等によるロスターゲットの低減、カーブにおける路側物によるターゲット認識ミスへの対応等、より信頼性の高いシステムを構築するとともに、車間警報、自動追従走行など他のシステムと連係したレーダシステムの開発がある。

また、センサのIC化によるアンテナの小型化、信号処理回路の簡素化などを進めて、安価で能力の高いシステム開発を行なっていく予定である。

最後に、本システムの開発にあたり、有益な御助言をいただいたトヨタ自動車(株)東富士研究所の重松主担当員、ならびにシステム評価に協力して下さった13研究部の方々に感謝します。

参考文献

- 1) K.Sato, M.Nagami, and T.Ito:Development of a Digital Signal Processor for Audio Equipment, SAE congress 890257(1989)
- 2) 原、井口:複素スペクトルを用いた周波数同定、計測自動制御学術論文誌、19-9、718-723 (1983)
- 3) 高羽、竹鼻:自動車の安全走行へのミリ波レーダの応用、IECE SANE82-36(1982)
- 4) M. Kamimura, N. Shima, K. Fujiwara, and Y.Fujita:Millimeter-wave Automotive Radar Using Digital Signal Processing, SAE congress 930552(1993)