

マイクロ波応用高精度スピードセンサ

High Precision Microwave Speed Sensors

遠藤 晃* Akira Endô
 木村克弘* Katsuhiko Kimura
 関根健治** Kenji Sekine
 金子洋一** Yōichi Kaneko

最近、鉄道車両やトラクタなどを対象として、非接触かつ高精度に対地車速を計測できる車速計が要求されてきた。これまで代表的な対地車速センサとして、マイクロ波ドップラレーダが開発されていたが、従来の方式ではレーダアンテナの取付角度が直接車速誤差に影響を及ぼし、高精度の車速が計測できなかった。

そこで、マイクロ波電波を二つのアンテナから路面に照射するジェイナス方式を採用することにより、レーダアンテナの取付角度によらず高精度な対地車速を計測することのできるセンサを開発した。

更に、車速誤差を改善するため、ドップラ周波数に対応したパルス波形の脱落を自己相関法で補正し、計測車速誤差で1%以内という好結果を実現した。

1 緒言

一般に移動体の速度を計測する場合は、車輪の回転速度から検出しているが、この方法では車輪のスリップなどが本質的に誤差要因となる。このため、マイクロ波ドップラレーダを用いた非接触形対地車速計の開発が進められている。

本方式は、電波を路面に照射し、移動体と地面との相対運動によるドップラ効果を検出するもので、車輪のスリップなどによらない真の対地車速の計測が可能である。

しかし、これまでに開発されていたマイクロ波スピードセンサでは、路面の反射波の不規則性から車速精度を高めることができず、数パーセント以上の誤差が発生するため適用範囲が限定されていた。

最近、鉄道車両やトラクタなどを対象にした各種速度制御用の分野では、高精度の車速計が要求されてきており、速度誤差1%が目標となっている。そこで、新たに低廉かつ高精度なマイクロ波ドップラレーダ式スピードセンサの開発を行った。本稿では、今回開発した高精度スピードセンサの概要について述べる。

2 マイクロ波スピードセンサの原理と誤差要因

2.1 原理

マイクロ波ドップラレーダ式スピードセンサの基本構成は、一般的に図1に示すようになる。

マイクロ波をアンテナから路面に対して一定の角度で照射すると、路面で散乱した反射波は、相対運動によるドップラ周波数シフトを受け、再びアンテナで受信される。このドップラ周波数 f_d (Hz)は、車速 v (m/s)と方向余弦 $\cos \theta$ に比例しており、送信周波数 f_0 (Hz)との関係が次式で与えられる。

$$f_d = \frac{2f_0 v}{C} \cos \theta \dots\dots\dots(1)$$

ここに C : 光速 3×10^8 (m)

ミキサダイオードには、送信波の一部と受信波が同時に加えられ、両者の信号の周波数差によって生ずるビートがドップラ信号となる。

実際の場合、アンテナの放射ビームには幅があり、路面からの反射も不規則であるため、ドップラ波形は複数の周波数が混合した形となり、(1)式で表わされる中心周波数を持ち、

その包絡線振幅が頻繁に零となる図2に示すような波形となる¹⁾。

2.2 誤差要因

従来のマイクロ波スピードセンサは、この信号波を必要な周波数だけ増幅したのち、図2に示すように、信号対雑音比を考慮した一定のスレッシュホールドレベルを超える信号をパルスに変換し、このパルス数から速度を求める方法がとられていた。このパルスカウント法の主な誤差は、パルスの脱落により生ずる。このパルス脱落の原因となるドップラ波形の振幅変化は、各種乾燥路面での実車試験から、レーレ分布に従うことが見いだされている²⁾。すなわち、路面での平均反射電力 \bar{P}_r の信号に対し、スレッシュホールドレベルを P_{r0} としたとき、ドップラ信号レベル \bar{P}_r と検出車速誤差は図3の関係となる。

このように、このパルスカウント方式で精度向上を図るには、レーダの高感度化が必要となるが、簡易形レーダとしては高感度化にも限界があり、誤差5%程度が限度である。

他方、基本的な誤差要因として、ビーム照射角の設定誤差によるものがある。これは、(1)式から明らかなように、ビーム照射角 θ が直接ドップラ周波数 f_d に関係するため、図4

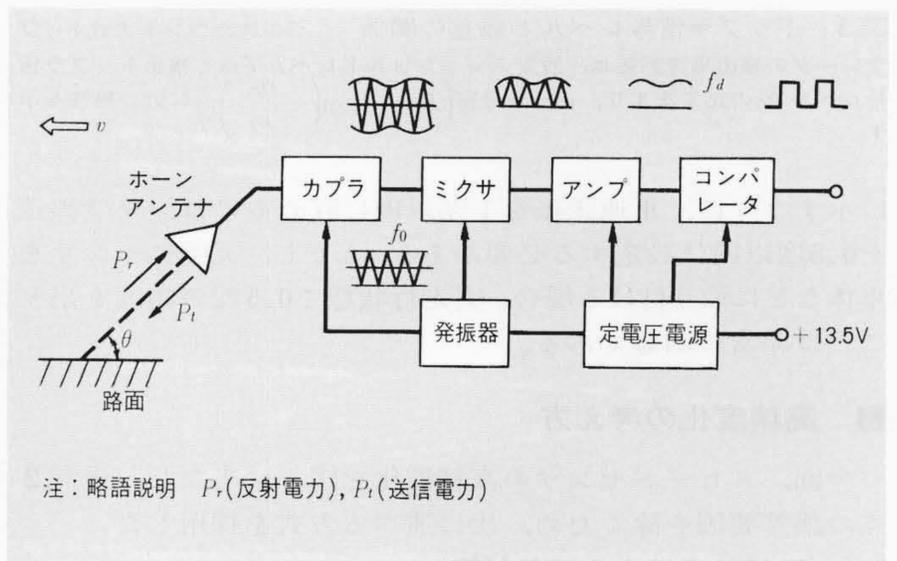


図1 ドップラレーダ式スピードセンサの基本構成ブロック図
 マイクロ波をアンテナから路面に照射すると、路面で散乱した反射波は相対運動によるドップラ周波数シフトを受けて再びアンテナに受信される。このドップラ周波数をパルス化して速度信号とする。

* 日立製作所佐和工場 ** 日立製作所中央研究所

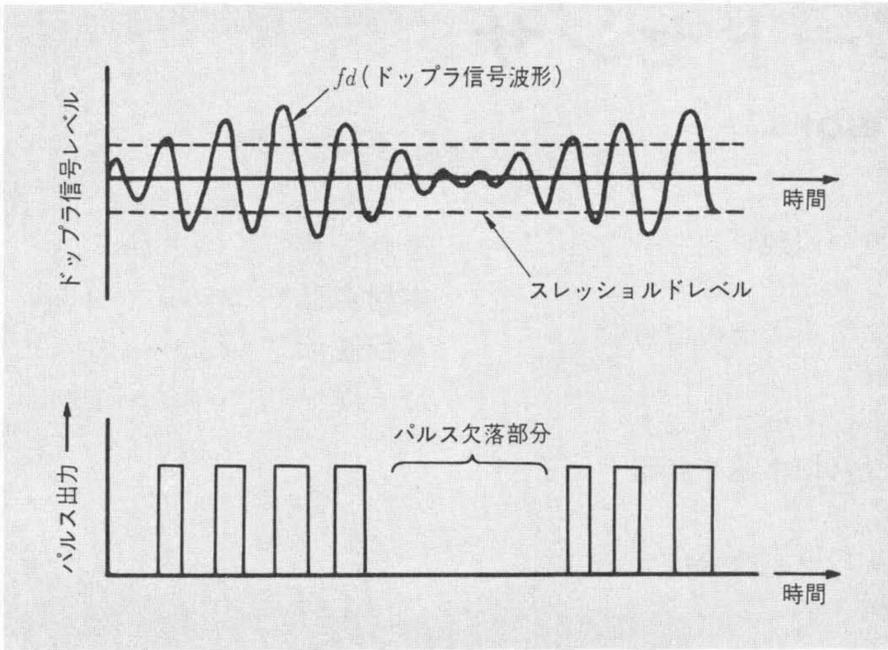


図2 ドップラ信号波形とパルス波形の関係 包絡線振幅変化の大きいドップラ信号波形を、一定のスレッシュヨルドレベルでパルスに変換すると、パルスの欠落が生じ、誤差の原因となる。

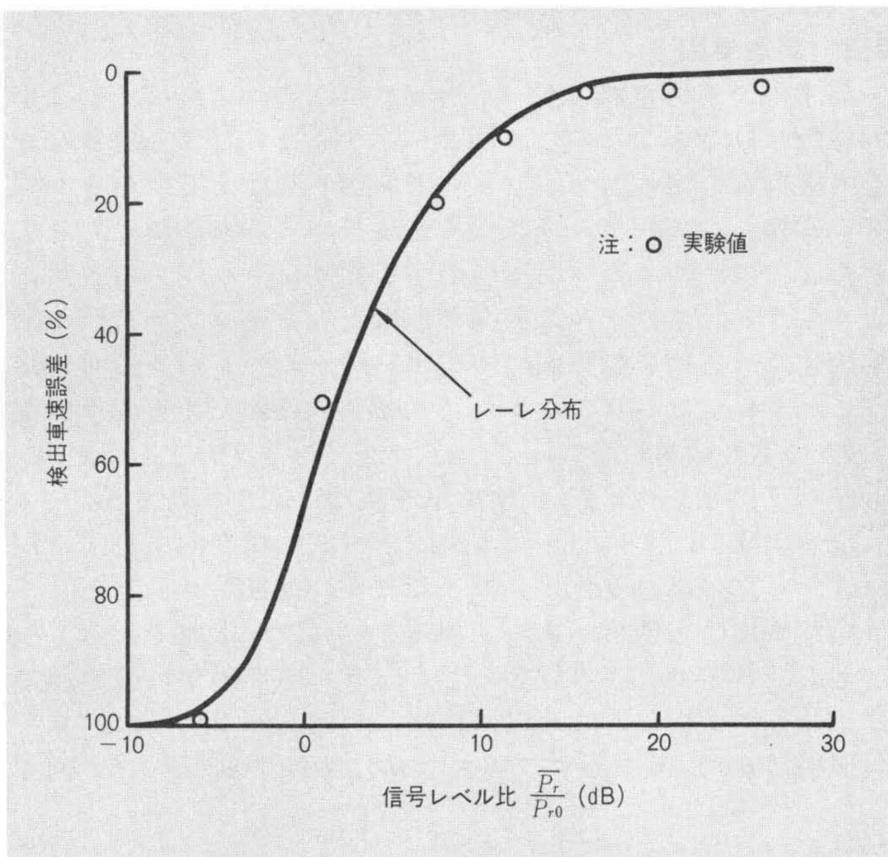


図3 ドップラ信号レベルと誤差の関係 パルスカウント方式ドップラレーダの検出車速誤差は、設定スレッシュヨルドレベル \$P_{r0}\$ と検出ドップラ信号レベル \$\bar{P}_r\$ の比で決まり、レーレ分布 $(E = 1 - \exp(-\frac{P_r}{P_{r0}}))$ に近い特性を示す。

に示すように、車速誤差を1%以内に収めるには、角度誤差を0.5度以内に設定する必要がある。しかし、実際にセンサを車体などに取り付ける場合、実走行状態で0.5度の精度を出すことは非常に困難である。

3 高精度化の考え方

今回、スピードセンサの高精度化を図るに当たり、上記2点の誤差要因を除くため、次に述べる方式を採用した。

3.1 取付け角による誤差対策

マイクロ波ビームの照射角変動による誤差を減らす方法として、2ビーム方式がある。これは、マイクロ波ビームを進行方向の前後に照射する方式(図4)で、一般にジェイナス(Janus)方式と呼ばれている。

この場合、二つのビームから各々得られたドップラ周波数を適当な信号処理で加算すると、その出力周波数 \$f_J\$ は次式で

表わされる。

$$f_J = \frac{2f_0 v}{C} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \dots\dots\dots(2)$$

ここに θ_1, θ_2 : 前方及び後方のビーム照射角(度)

(2)式から分かるように、車体などへの取付けや走行中の傾きにより、照射角が変化した場合、 θ_1 が増加すれば θ_2 は減少するので、出力周波数 \$f_J\$ の誤差は緩和される。図4にこの計算値を示すが、車速誤差を1%以内に収めるための理論角度誤差 $\Delta\theta$ は8度まで許容される³⁾。

3.2 パルス脱落による誤差の対策

本方式では、ドップラ信号の整形パルスのパルス幅を多数記憶し、これらパルス幅の自己相関から真のパルス幅を抽出し、これから速度を算出する方法を考案した。

この原理は、一般走行路面でのドップラ信号整形パルスのパルス幅の発生頻度が、必ず図5に示すように(1)式で示したドップラ周波数 \$f_d\$ の逆数で表わされるパルス幅 τd_0 を中心として、ほぼ対称に分布することを利用している。このパルスを \$n\$ 発取り出し、横軸にパルス幅を取り、縦軸に発生したパルス幅を長いほうから順に積み重ねていくと、図6に示すようになるため、 $\frac{n}{2}$ 発目のパルス幅 τd_0 が真のパルス幅として検出することができ、これを用いて高精度化を図ることが可能になる。

4 高精度スピードセンサの概要

以下に今回開発したスピードセンサの概要を述べる。

4.1 スピードセンサ

(1) マイクロ波センサ部

ジェイナス方式レーダの実現化に当たり、小形、低価格化を目標に、一つのガン発振器の出力を二つのアンテナに分配するMIC(マイクロ波IC)を開発した。MICは、10mm角の誘電体基板上に、ガンダイオードを使用したマイクロ波発振部と、

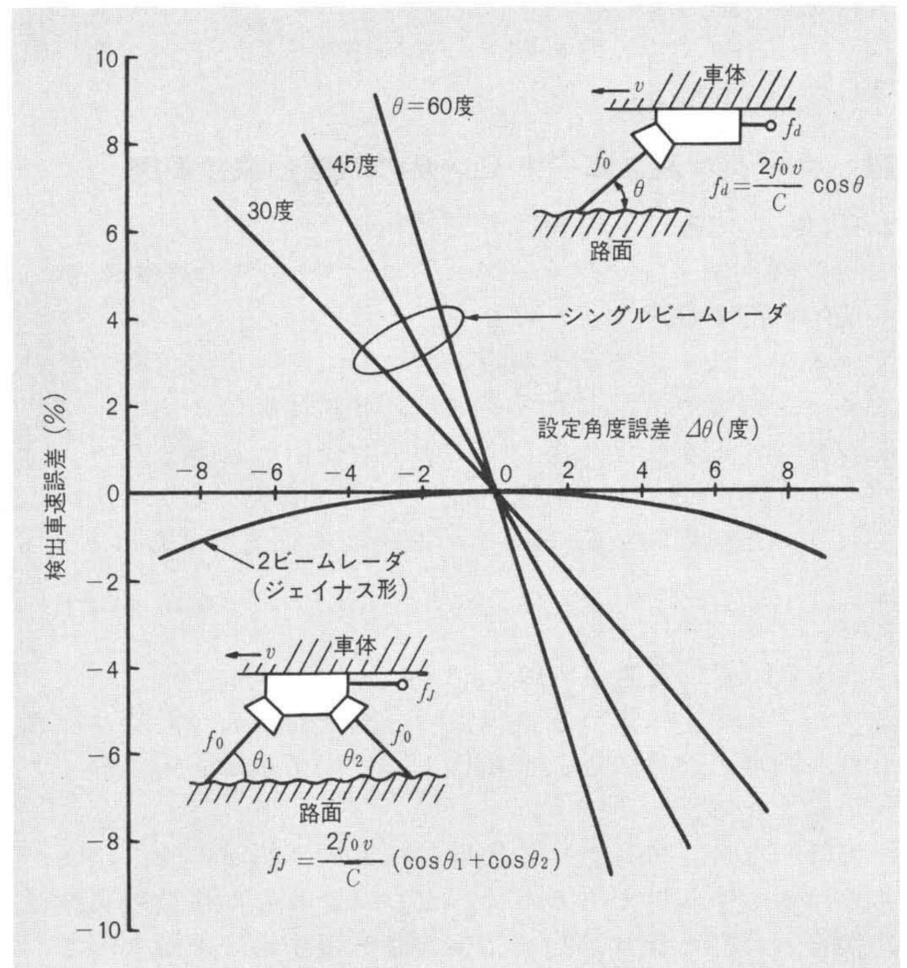


図4 ドップラレーダの角度誤差と車速誤差の関係 シングルビームレーダでは、アンテナの設定角度誤差が検出車速誤差に大きく影響するが、2ビームレーダではその影響が大幅に改善される。

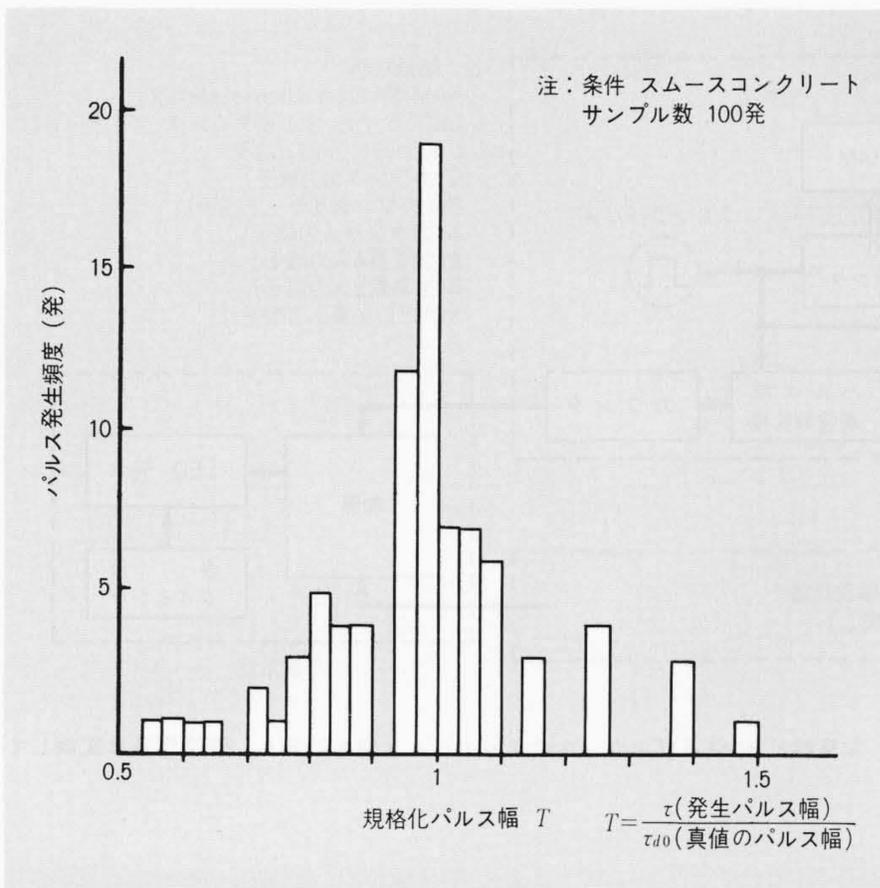


図5 発生パルスの幅と発生頻度の関係 スムースコンクリート路面での発生パルスの幅とその発生頻度の分布を示す。この分布の傾向は、一般路面(アスファルトなど)でも同じようになる。

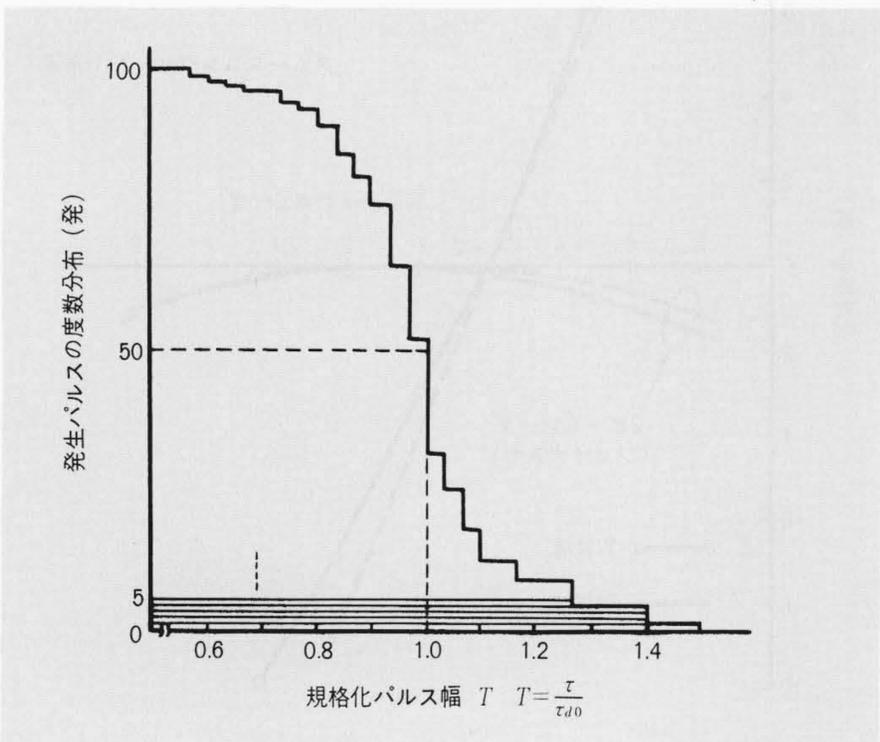


図6 発生パルスの幅と度数分布 検出した100発のパルスの幅を、長いほうから順に積み重ねた様子を示している。この分布の50発目のパルス幅 τd_0 を平均値とし、速度の算出にはこのパルス幅を用いる。

カプラ、ミキサ回路を金薄膜で構成したものである。MICとその周辺回路の説明を図7に示す。

(2) センサ部

スピードセンサは、二つのアンテナが一体で構成された筐体部にMICとアンプ、フィルタ及びパルス整形用のコンパレータから成る信号処理回路を二つ組み込んだ構造である。センサの外観及び表示装置を図8に示す。

4.2 表示装置

表示装置には、二つのパルス脱落補正回路と表示回路が組み込まれている。

パルス脱落補正回路は、図9に示すように加算器とRAM(Random Access Memory)から成り、カウンタで計数され

る n 発のパルス幅を順次RAMに書き込む方式で、パルスを n 発数えた時点で、分散したパルス幅の中心値を取り出し、このパルス幅をメモリに保持する。更に、このパルス幅を周波数に変換し、周波数カウントを行なう。表示は、二つのパルス脱落補正回路の計数結果を加算したものを速度情報としてLED(ライト エミッティング ダイオード)に表示する。

4.3 特性

本センサの実車試験結果を図10に示す。このように、パルスカウント方式で30%程度の誤差を補正することにより、誤差1%にまで向上させることが可能になった。

また、本センサを傾けて車体などに取り付けた場合の速度誤差を図11に示したが、ほぼ理論どおりの結果を得ている。

本スピードセンサ及び表示部の主な仕様を表1に示す。

5 応用

これまで述べてきたように、本装置は列車、自動車、トラックなどの対地速度検知を目的に開発を進めてきたもので、現在各種車両で実用化試験を試みており、好結果を得ている。

また、用途は異なるが、非接触式速度計として見れば、ベルト速度や野球のボールの速度の検出、更に移動体の速度自動制御システム用など、広い応用が期待できる。

なお、現在の電波法では、本装置の使用に当たっては免許を必要とする。

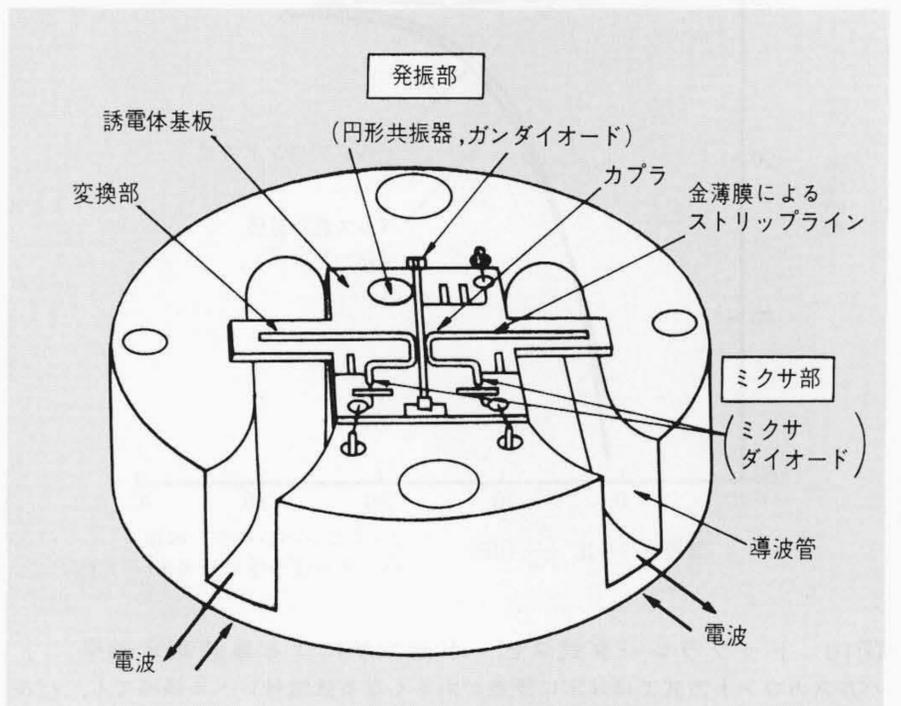


図7 MIC(マイクロ波IC)とその周辺回路の構成 10mm角の誘電体基板上に、ガンダイオードと円形共振器による発振部及びシリコンショットキーバリアダイオードによるミキサ部を設け、各回路は金薄膜によるストリップラインで構成し、導波管回路に接続している。

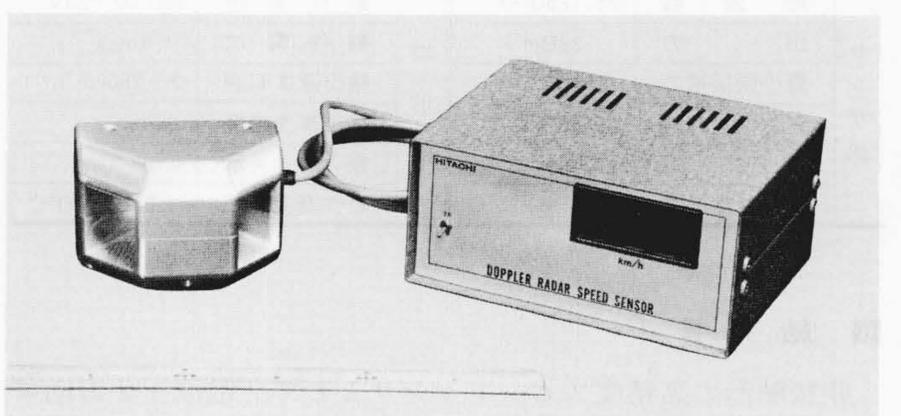


図8 ジェイナス形スピードセンサと表示装置の外観 センサの二つのアンテナの開口角は90度である。筐体部はアルミ合金で軽量化し、耐環境性、耐振性に優れた構造になっている。

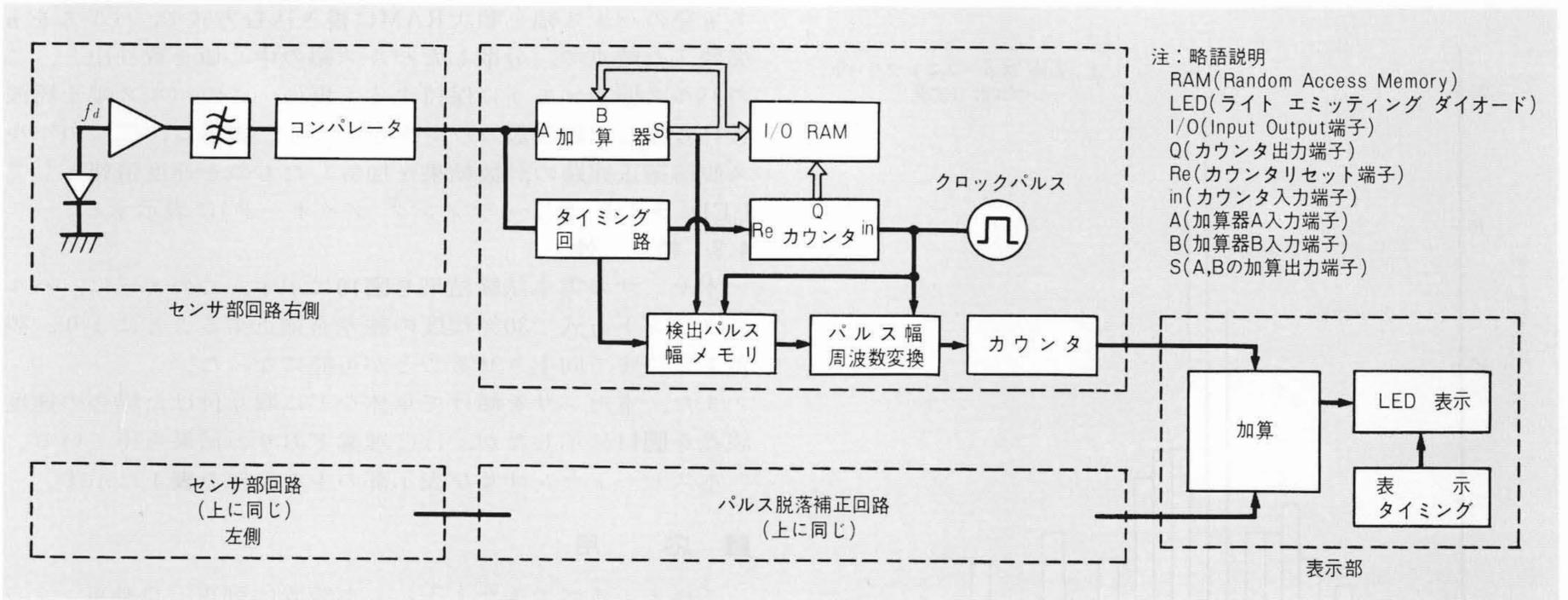


図9 センサ部及び表示部の回路構成 センサ部からの速度パルス信号は、加算器とRAM及びカウンタによってパルス幅を計測し、速度信号に変換している。左右二つのセンサ部及び信号処理回路は同じ回路を用いている。

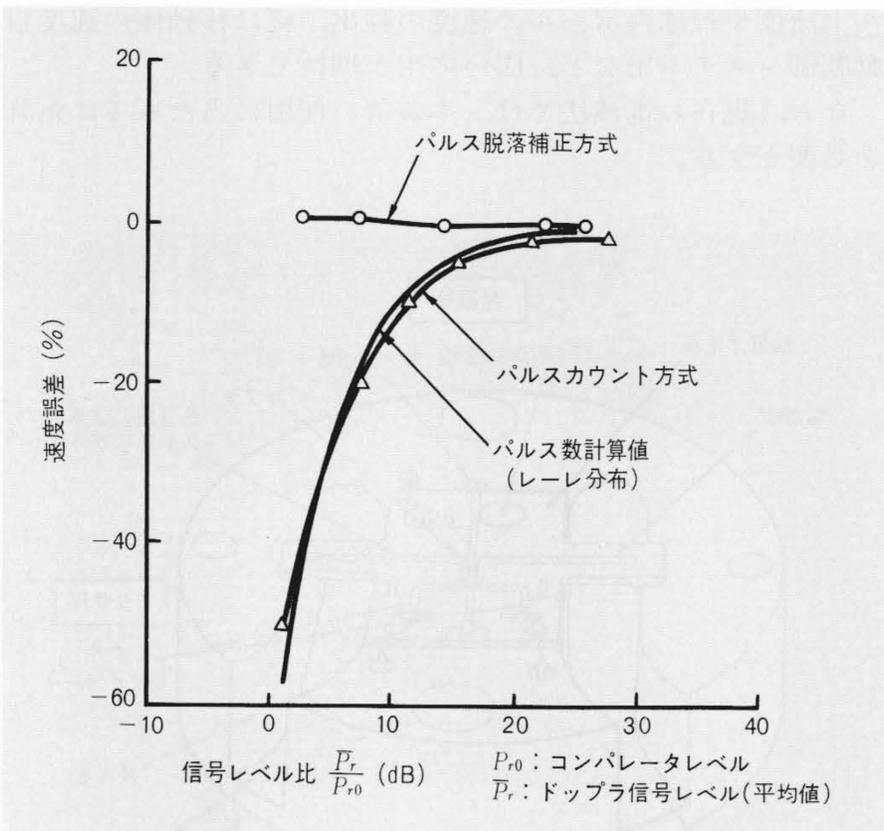


図10 ドップラレーダ式スピードセンサによる車速測定結果
パルスカウント方式では非常に誤差が大きくなる低信号レベル領域でも、パルス幅検出による脱落補正方式では高精度な結果が得られる。

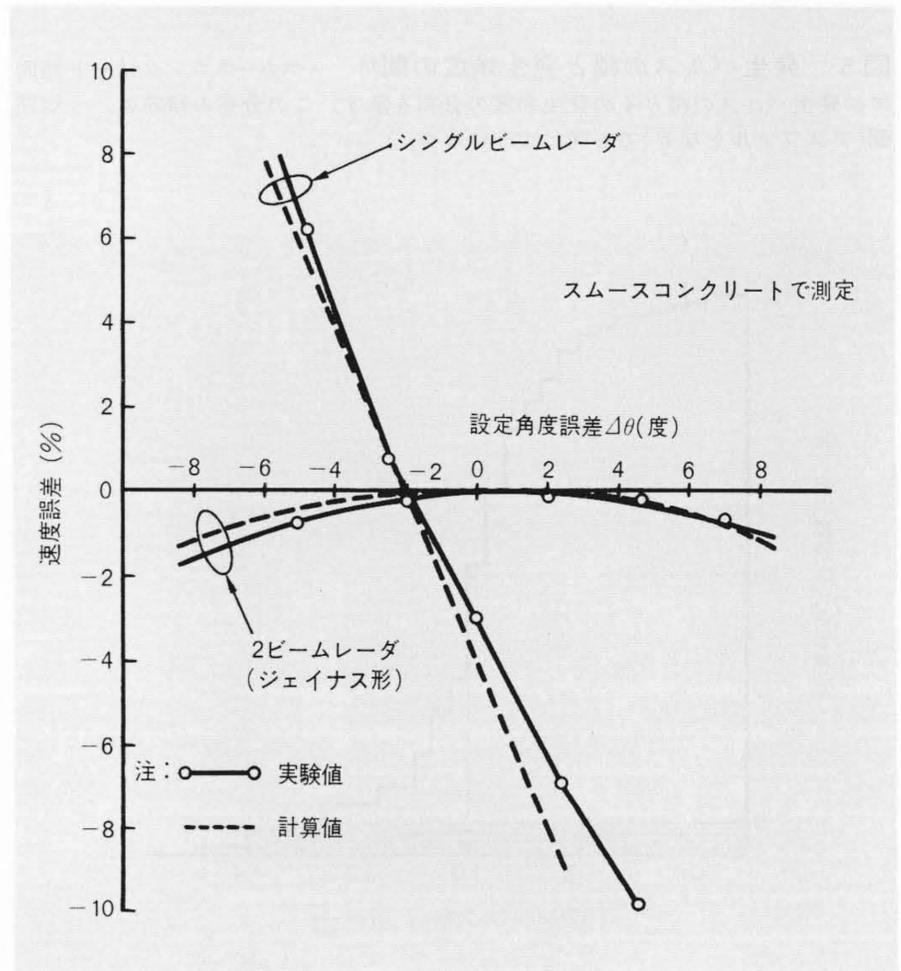


図11 取付角度誤差と速度誤差の実験結果 スムースコンクリート路面で測定した結果で、2ビームレーダの検出速度誤差は、車体への取付設定角度誤差に依存する割合の小さいことを示している。

表1 主な仕様 本装置の仕様をセンサ部と表示部に分けて示した。

項目	仕様	項目	仕様		
センサ部	周波数	24.125GHz	表示部	動作電圧	DC 10~35V
	出力	3dBm		動作電流	1 Amax
	最小受信電力	-90dBm		検出速度範囲	2~250km/h
	アンテナ利得	18dB		検出車速精度	±1%
	耐振性	10Gmax		表示	LED 3桁
	動作温度範囲	-40~+85°C		動作温度範囲	-20~+60°C

6 結 言

非接触形の高精度スピードセンサとして、電波を2方向に出すジェイナス形ドップラレーダを開発した。

本装置の実車テストの結果は、従来形(シングルビーム)レーダの速度精度を約1/10に改善し、計測車速誤差1%という好

精度を達成した。また、ビーム照射角度誤差は6度まで許容できた。

今後は高速車両や建設用車両の制御など、応用面での拡大を更に図ってゆく予定である。

参考文献

- 金子, 外: スキッドコントロール装置用マイクロ波車速センサ, 自動車技術会論文集, 1978, No. 14 (昭53-3)
- Y. Fukumori, et al.: Doppler Radar Speed Sensor for Anti-Skid Control System, SAE/IEEE Convergence 78 (1978-9)
- 関根, 外: 24GHz Janus形ドップラ車速センサ, 昭和56年度電子通信学会全国大会予稿, No. 803 (昭56-4)