

自動車へのミリ波レーダの応用

Application of mm Wave Radar for Vehicles

野上 高 広⁽¹⁾ 上 里 良 英⁽²⁾
Takahiro Nogami Yoshihide Uezato

坂 本 隆⁽³⁾ 磯 貝 保 広⁽⁴⁾
Takashi Sakamoto Yasuhiro Isogai

要 旨

ミリ波は、近年、新しい周波数帯として注目されつつあり、その特徴として、1) 装置が小型・軽量である、2) 任意の指向性を得やすい、3) 周波数帯域が広い、などがあげられる。

通信分野ではすでに、データ・画像伝送用として、50 GHz 帯を用いた簡易無線装置が実用化されている。

我々は、ミリ波を自動車用レーダへ応用することを目標に、数年前よりトヨタ自動車㈱と共同で、またデバイスに関しては富士通研究所の援助を得て開発に取組み、今日までに、車間距離制御レーダ、車速計測レーダなどを試作、シミュレーションやフィールド試験により、ほぼ所望の性能が得られることを確認した。

本稿では、まずミリ波の特性、特徴について述べた後、試作機的设计概要、評価結果などについて報告する。

Recently mm wave is being attracted as the new frequency band and the characteristics are as follows. 1) System is compact and light weight, 2) Optional directivity can be got easily, 3) Band width is broad.

In communication field, simple radio equipments using 50 GHz band have been already in market for the data and the image transmission use.

We have been developing a mm wave radar for automotive use for several years in cooperation with Toyota Motor Corporation and supported by Fujitsu Laboratory Limited regarding mm wave device. Until today we have made prototypes of the headway control radars and the speed measuring radars, and confirmed the desired function through simulation and field tests.

This paper reports characteristics of mm wave, outlines of prototypes, and results of evaluation.

(1) トヨタ自動車株式会社

(2), (3) 富士通テン㈱モータロニクス技術部

(4) 富士通テン㈱開発部

1. ま え が き

ミリ波とは、一般に30~300 GHz (波長10mm~1 mm) の周波数帯を示している。この帯域の開発利用の歴史は新しく、1963年から65年に、ガンダイオードやインパットダイオードが開発されて本格化した。1971年に、電電公社で40 GHz 帯を使った実用化試験が開始され、1984年には、50 GHz 帯の簡易無線装置が実用化されている。

また、電波行政面では、従来、不明確であった40 GHz以上の周波数割当方針が、1979年、WARC (世界無線通信主管庁会議) において、決定された。

このように、ミリ波は広帯域伝送を目的として通信分野で開拓されたが、ミリ波機器の、小型、高分解能などのすぐれた特徴は、自動車用レーダにも生かすことができ、数多くの用途が期待できる。

1975年、米国のNHTSA (道路交通安全局) では、レーダアンテナの大きさや気象の影響、およびコストなどから、ミリ波帯である35 GHz 帯を自動車用レーダとして推奨している。

我々は、数年前からミリ波を使った衝突警報レーダの開発に着手し、デバイス開発は富士通研究所の援助を得ながら、システムはトヨタ自動車㈱と共同で開発し、現在に至っている。

電波法やコスト面で製品化にはまだいくつかの制約が残されているが、数多くのフィールドデータを通して、自動車用レーダとしての問題点や可能性が明確になってきた。

以下、ミリ波レーダの特徴、開発した高周波デバイス、レーダシステムの概要や特徴、今後の課題について述べる。

2. レーダの概要

2.1 概 要

レーダとは "RADio Detection And Ranging"

の略語で、この言葉が示すように、電波を目標に向けて放射し、その反射波をとらえて、目標との距離や方位を測定するものである。

距離はレーダ電波が目標との間を往復する時間より求める。代表的な方法としては、パルス変調した電波を送信し、送信パルスと受信パルスの時間差を測定する方法と、送信電波をサインや三角波などで周波数変調し、送・受信電波の周波数差を測定する方法がある。前者をパルス方式、後者をFM-CW方式という。

また、電波は、人間の目では見ることはできない遠方や、くらやみ、煙、雲、霧、雨、雪を通して目標まで伝播していく性質があり、この性質を生かして現在では、船舶や航空機の安全航行や、空や海の防衛、気象の観測などに幅広く利用されている。

1960年頃から、自動車の分野でもレーダの利用が検討され始めたが、自動車の場合、航空機や船舶とは異なり、小型・軽量、高分解能、複雑な道路周囲の構築物との目標識別などが大きな課題である。

2.2 探知性能

目標とレーダが図-1に示す関係にある時、レーダの受信電力 P_r は式(1)で表わされる。受信電力は、目標までの距離 R の4乗に比例して減衰し、最大探知距離は、受信機のノイズ、地面や海面など、周囲からの不要反射電力によって制限される。

$$P_r = \frac{P_t \cdot |G(\theta)|^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma(\varphi)}{(4\pi)^3 \cdot R^4 \cdot L} \quad (1)$$

ここで

P_t : 送信出力 λ : 波長

θ : アンテナの中心線から目標までの方位角

$G(\theta)$: θ 方向のアンテナ利得

φ : 目標とレーダを結ぶ線と目標の中心線

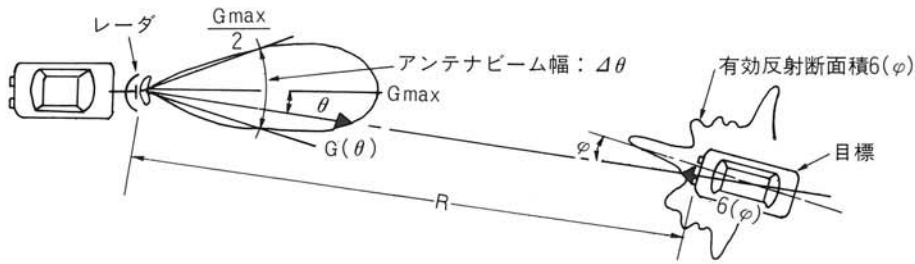


図-1 レーダと目標との関係

Fig. 1 Relationship between radar and target.

がなす角度

$\sigma(\varphi)$: φ 方向の目標の有効反射断面積
(レーダの方向に、実際の目標と全く
同じ電力を反射させる完全導体球の断
面積)

R : レーダと目標との距離

L : 伝播損失

また、アンテナの最大利得 G_{max} は、水平、垂直
面のビーム幅、 $\Delta\theta_H$ 、 $\Delta\theta_V$ で決まり、次式で示さ
れる。

$$G_{max} \approx 27000 / (\Delta\theta_H \times \Delta\theta_V) \quad (3)$$

式(2)、式(3)からわかるように、ビーム幅や
利得が与えられた時、その特性を得るに必要なア
ンテナ寸法は、波長が短いほど小さくなる。

3. ミリ波レーダの特徴

表-1に、現在レーダで使われている周波数帯を
示す。1) ミリ波は波長が非常に短いので、アンテ
ナビーム幅、反射特性、伝播損失、気象の影響な
どについては、以下に述べる特徴がある。

1) アンテナビーム幅と利得： $G(\theta)$

アンテナビーム幅は、図-1のアンテナ利得 $G(\theta)$
において、最大利得の $1/2$ になる広がり角度 $\Delta\theta$ で
示され、アンテナ開口長 D 、波長 λ で決まり、次
式で表わされる。

$$\Delta\theta \approx 70 \times \lambda / D \quad (2)$$

2) 有効反射断面積： $\sigma(\varphi)$

有効反射断面積は、目標の形状、電波の波長及
び入射角などに依存しており、波長に対し平面と
見られる物体は鋭い指向性を示すが、車両後部の
ように複雑な表面では反射波は広がる。この効果
は波長が短いほど大きいため、ミリ波を自動車用
レーダに適用した場合、蛇行による反射電力の急
激な変動で、目標を見失う確率が少なくなり好都
合である。

3) 伝播損失： L

伝播損失 L の主な要因としては、大気による減
衰が挙げられる。図-2は、周波数に対する大気に

表-1 レーダ周波数とミリ波帯

分類	UHF	L	S	C	X	Ku	K	Ka	ミリ波	遠赤外
波長 (mm)	300	150	75	37.5	25	16.7	10			
周波数 (GHz)	1	2	4	8	12	18	30			300
レーダ 応 用	超遠距離 航空路監視レーダ	遠距離	中距離				近距離・精測 船舶用レーダ	近距離・精測 港湾レーダ	高分解能	

よる減衰特性を示す。22, 183, 323 GHzで水蒸気による共鳴吸収が表われ、又、60, 119 GHzでは酸素分子による吸収が表われる。

近距離レーダ用として、この吸収の大きい周波数帯を利用すれば、レーダ相互間の干渉を少なくでき、周波数有効利用の面からも望ましい。

4) 気象の影響

ミリ波帯を使用する上で最も問題となるのは、降雨による影響である。

この要因としては、空間伝播における雨滴による減衰と、雨滴からの反射が擬似目標となることによる探知性能の劣化である。図-3は、車両（後部）の探知性能が雨量（150 mm/hr）の時、どの程度劣化するかを実測した値である。²⁾ 雨滴による受信電力の減少は100mで3~4 dB程度ではほとんど問題とならないが、雨滴からの不要反射電力は、FM-CWレーダでは、探知領域内からの反射がすべて加わるため影響が大きい。

目標探知に必要な S/C 比（目標からの反射電力と雨や地面からの不要反射電力の比）を 10 dB とすると、最大探知距離は晴天時約 100m となるが、雨天では約40mまで劣化する。

4. ミリ波レーダの開発例

4.1 車間距離制御レーダ

自動車の前面に装着し、前方車両との相対距離

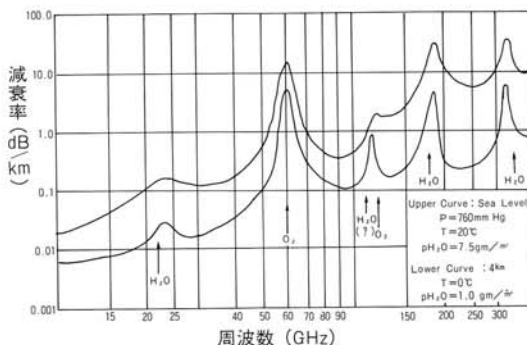
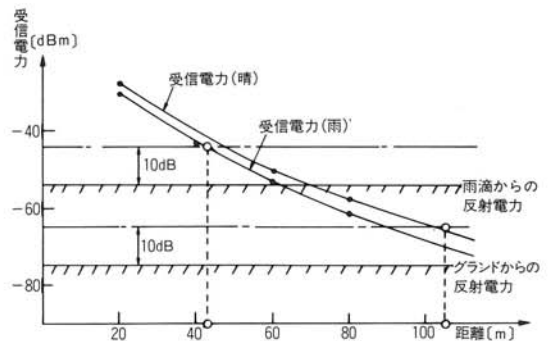


図-2 大気による減衰

Fig. 2 Attenuation for atmosphere.

速度を測定し、車間距離の自動制御や衝突警報用センサとして利用するシステムであり、各社の開



(注) 周波数 50GHz、FM-CWレーダ
ビーム幅 2°、ペンシルビーム
目標車両 小型自動車

図-3 探知性能（実測値）

Fig. 3 Detectability (measured).

表-2 主要諸元

項 目	性 能
方 式	FM-CW方式
中 心 周 波 数	49.5 GHz
送 信 出 力	30mW
アンテナビーム幅	2°×2°
探 知 距 離	5~70m
速 度 範 囲	0~±100 km/h
電 源 電 圧	10~16 V
サ イ ズ	340(W)×200(H)×70(D) mm

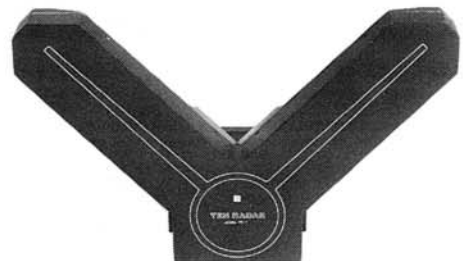


図-4 車間距離制御レーダ

Fig. 4 Head way control radar.

発例や報告も多い。³⁾

当社で開発したレーダの外観を図-4に、主要諸元を表-2に示す。

車間距離制御レーダでは、自動車前面の限られた空間に装着できることが重要になる。

我々は、50 GHz帯FM-CWレーダを用いて、合成ビーム方式を採用、高周波部を一体化し、装置の小型化を計った。

4. 1. 1 設計の要点

車間距離制御レーダの設計に当たり、特に検討を要した点について以下に述べる。

1) アンテナビーム幅の選択

アンテナビーム幅の決定に当っては、隣接レーンや道路標識による誤動作の低減、カーブや蛇行時のゆれなどによって障害物を見失う確率を最小にする、などの点に留意する必要がある。

この最適値は一義的に決定できないため、我々は、代表的な高速道路をコンピュータ内につくり、車の蛇行、ゆらぎを乱数発生させ、レーダの探知確率が最大になるビーム幅より 2° を選択した。

2) 周波数選択

周波数選択の要因としては、アンテナサイズ、電波伝播特性、電波割当、高周波デバイスの性能

・コスト等が考えられる。

アンテナは、フロントグリル付近に装着するのが適しており、外観やエンジンの通風などを考えると、アンテナ開口長は200mm程度が限度である。式(2)よりアンテナサイズ200mm以下で、ビーム幅 2° を得るためには、周波数は50 GHz以上が必要になる。

一方、高周波デバイスのコストは一般に、周波数の2乗に比例して高くなると言われているが、IC化して量産すれば、十分コストダウンは可能である。

また、電波伝播特性や、電波割当については、前述した通りである。

以上、周波数は、50~60 GHzが最適と考えられるが、開発当初は、デバイス入手の可能性などを考慮し、暫定的ではあるが49.5 GHzを選択した。

3) 装置の小型化

アンテナについては、図-5に示すようにミルズクロス方式を採用し、 $2^\circ \times 6^\circ$ の送・受ビームを組み合わせ、 $2^\circ \times 2^\circ$ を得ている。 $2^\circ \times 2^\circ$ の単一アンテナより、ゲインは低下するが、開口面積は60%小さくなる。

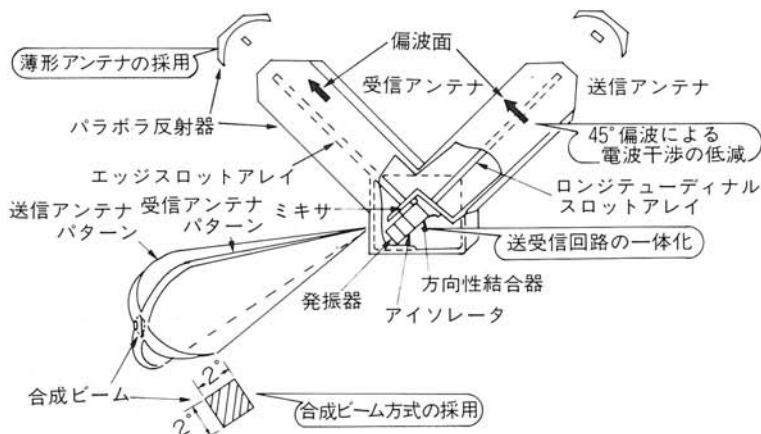


図-5 構成と特徴

Fig. 5 Configuration and characteristic.

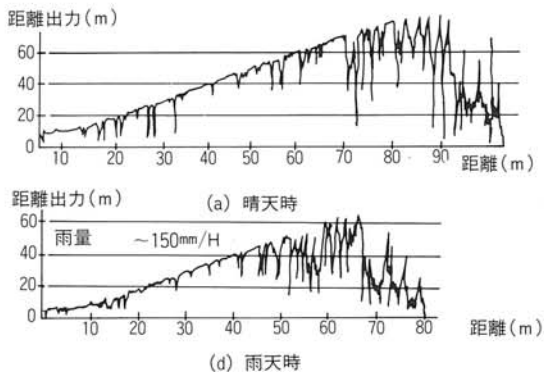


図-6 探知距離
Fig. 6 Detection range.

また、送・受アンテナは、スロットアレイとパラボラで構成し、奥行を30mmにおさえた。

高周波回路は、アンテナと接続する導波管をなくし、一体構造にしてV型アンテナの基底部へ組み込んだ。

4) 電波干渉の低減

対向するカーブなどでの電波干渉を低減するため、偏波特性の異なるスロットアレイアンテナをV型に組み合わせ、45°の偏波面を確保した。対向車とは偏波面が90°で交差し、互いの干渉を低減するよう図った。

4.1.2 性能確認

小型自動車を対象にした時の探知性能を図-6に示す。(a)は晴天時、(b)は人工雨設備を使用した場合の測定例を示す。100~200 mm/hrの豪雨でも探知距離は40m程度の劣化にすぎない。従って一

般の強雨(30 mm/hr程度)中の走行ではほぼその影響を無視できそうである。

4.2 車速計測レーダ

このレーダは目標との相対速度によって生じるドップラ周波数から目標の速度を計測するものである。

現在、警察の速度取締レーダや、野球の投球速度を計るスピードガンなどが、10 GHz帯を用いて実用化されている。

我々は、ミリ波(60 GHz)を使用し、より小型で、長距離まで探知できるレーダを試作し、車の加速騒音計測システムに応用した。このシステムの目標性能を表-3に示す。可搬型で、探知距離300mを満足させるには小型で、高い利得のアンテナが必要になる。このシステムでは60 GHzのカセグレンアンテナを使用することにより、300 mmφで40 dBの利得を得ている。

開発したレーダは、現在トヨタ自動車㈱へ納入し、評価試験中である。

図-7に、このシステムの概要を示す。

同図において、試験車両運転者は、一定速度で④点に進出し、スロットルを全開にし、加速区間を通過する。この時、中心線から一定の位置に設置したマイクロフォンで騒音レベルの最大値を測定するシステムである。

このシステムにより、運転者は進入速度のバラ

表-3 目標性能

項目	目標性能
測定距離	300m
速度計測範囲	20~80 km/h
測定精度	±0.3 km/h以下
応答時間	100ms以下
探知目標	小型乗用車・大型バス・トラック
使用条件	温度 -10~+50℃、可搬型

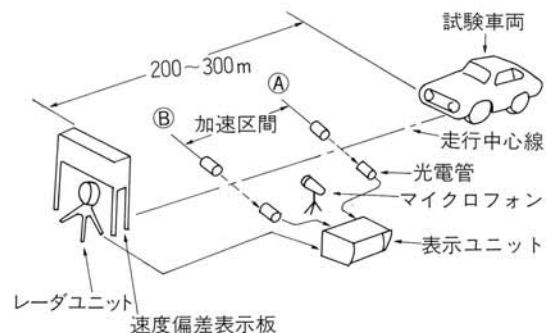


図-7 加速騒音計測システム

Fig. 7 Accelerating noise measuring system.

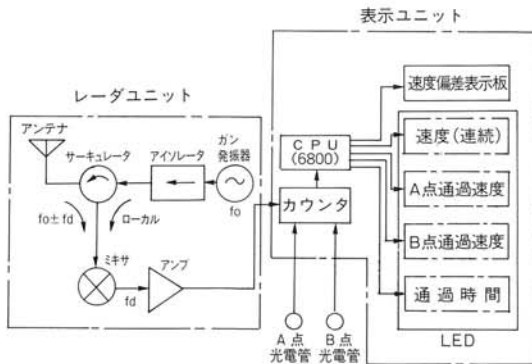


図-8 システム構成
Fig. 8 System configuration.

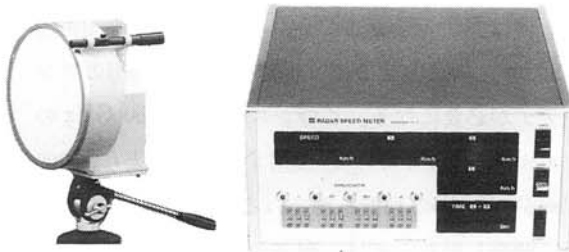


図-9 車速計測レーダシステム
Fig. 9 Speed measuring radar system.

ツキ、走行中心線からのズレを最小限におさえることが可能となった。

装置の主な機能は、

- ① 車両の走行速度を0.1秒毎に連続的に測定する。
- ② 光電管のトリガ信号により、加速区間④点と⑩点の速度をホールド表示する。
- ③ 表示ユニットに設けたデジタルスイッチで任意の速度範囲を設定し、走行速度がどの範囲にあるか、速度偏差表示盤で運転者に自車の速度を知らせる、などである。

レーダのシステム構成を図-8に示す。また、主要諸元を表-4に、外観を図-9に示す。

4.2.1 基本設計

1) 探知性能

表-4 レーダユニット主要諸元

項 目	性 能
送 信 周 波 数	59.5 ± 0.15 GHz
送 信 電 力	50mW以上
ビ ー ム 幅	[1.0°×1.2°] ± 10%
最大 探 知 距 離	300m以上
電 源 電 圧	AC100V ± 10%、50~60 Hz
消 費 電 力	50VA以下
サ イ ズ	345φ×230mm

式(1)より、最大探知距離300mを満足するように、レーダの送信出力、アンテナゲインなどを決定する。レーダの各諸元を

送信周波数：59.5 GHz

送信出力：50mW

アンテナ利得：40 dB

目標の有効反射断面積：10m²(小型自動車に相当)

大気による減衰：6 dB (10 dB/km)

受信機入力端ノイズ：-70 dBm

と見積ると、距離300mで、S/Nが16 dB得られる。

2) ドップラ周波数と速度精度

速度とドップラ周波数(f_d)の関係を次式に示す。中心周波数を59.5 GHzとした場合、速度100 km/hで、ドップラ周波数11.0 kHzが得られる。

$$f_d = \frac{2V}{C} \cdot f_0 \quad (4)$$

ここで

f_0 : 送信周波数

V : 相対速度

C : 光速 (3×10^8 m/sec)

式(4)より、送信周波数 f_0 が高くなるほど、同一精度を得るための測定時間が短くてよく、また逆に測定時間を一定にすると、周波数に比例して速度精度が向上することがわかる。

表-5 測定精度

No.	A点速度 (km/h)	B点速度 (km/h)	基準速度 (km/h)	誤差 (km/h)
1	40.9	40.9	41.0	-0.1
2	41.0	41.5	41.3	-0.3~+0.2
3	40.9	40.7	40.8	+0.1~-0.1

測定時間 (T) 一定の場合、速度誤差 ΔV は式 (4) を変形し、次式で示される。

$$\Delta V = \pm \frac{C}{2 \times f_0 \times T} \quad (5)$$

f_0 を 59.5 GHz、 T を 100ms とすると ΔV は ± 0.1 km/h におさえることができる。

速度誤差は、この他、送信周波数の温度安定度にも依存し、総合誤差を ± 0.3 km/h におさえるには、5 MHz/°C 以下の安定度が必要である。

4.2.2 精度確認

図-7の計測システムを使い、40 km/h で3回走行し、測定したデータを表-5に示す。基準速度は、図-7に示す①②点間の走行時間と距離から求めた。目標精度 ± 0.3 km/h を満足していることがわかる。

4.3 対地速度センサ

路面に向けて電波を放射し、路面とレーダの相

表-6 主要諸元

項目	性能
送信周波数	59.5 $\pm$ 0.15 GHz
周波数安定度	7 MHz/°C typ.
送信出力	1 mW以上
アンテナビーム幅	[5°×7°] $\pm$ 10%
測定精度 (標準偏差)	4.0% (ドップラ信号1周期)(注) 0.4% (100ms)
電源電圧	+10~16V
消費電流	1 A以下
サイズ	80(W)×80(H)×70(D)mm

注) () 内は計測時間を示す

対速度によって生じるドップラ周波数から車両の対地速度を測定するものである。

対地速度センサの応用としては、自動車の安全装置の一つである、制動時のタイヤロックによる車の横すべりを防止するアンチスキッド制御装置があり、いくつかの開発例も報告されている。⁴⁾⁵⁾⁶⁾

また、農耕用に、トラクタによる薬剤散布や、種蒔作業で、一定速度を保つような速度コントロール用センサとしての応用例もある。⁷⁾

この種のセンサには、高い測定精度と装置の小型化などが要求される。我々は、レーダの中心部である送受信回路をIC化し、小型で、高精度、高信頼度センサを開発した。

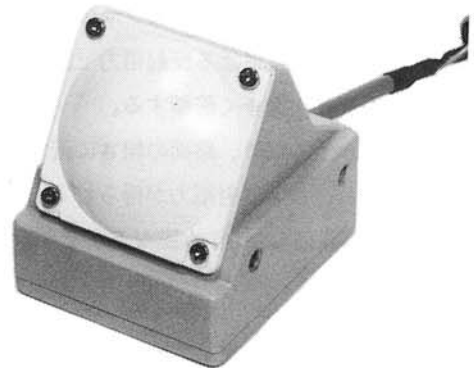


図-10 対地速度センサ

Fig. 10 Ground speed sensor.

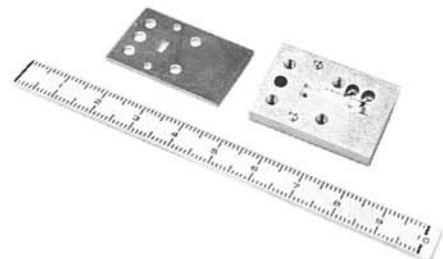


図-11 ICドップラモジュール

Fig. 11 IC doppler module.

試作したセンサの主要諸元を表-6に、外觀を図-10に示す。又、IC化したドップラモジュールの外觀を図-11に示す。

4.3.1 速度計測精度

速度誤差の要因として、主にアンテナビームの広がりやS/Nの低下がある。

アンテナビーム幅を $\Delta\theta$ 、アンテナ取付角を γ とすると、アンテナビーム幅に依存する速度誤差 σ_θ (標準偏差: %) は次式で示される。

$$\sigma_\theta = \frac{\Delta\theta}{2} \times \tan\gamma \times 100 \quad (6)$$

取付角 γ が一定であれば、速度誤差はビーム幅に比例することがわかる。

一方、S/NとS/Nに依存する速度誤差 σ_n の関係を図-12に示す。⁸⁾ 対地速度センサの信号レベルは、路面からの散乱による反射電力で決まり、路面の凹凸や波長が大きく影響する。

一般に波長が短くなり、路面の粗さに近づくと電波は散乱され、強い反射電力が得られる。

また、路面が凍結したり、水膜などができると、散乱係数が下がり、反射電力が低下し、精度がおちる。

以上、2つの誤差要因が独立であるとする、センサ出力に含まれる総合的な誤差は式(7)で表わされる。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

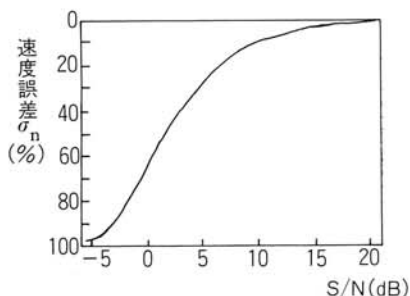


図-12 S/N と 精度

Fig. 12 S/N and accuracy.

今、アンテナビーム幅を 5° 、アンテナ取付角を 30° 、S/Nを20 dBとすると、 σ_θ は3.0%、 σ_n は0.6%、 σ は3.1%となる。この例のようにS/Nが十分大きければ、測定精度は、ビーム幅に支配される。

4.3.2 精度評価

図-13はシミュレータにより、アンテナビーム幅をパラメータにして求めた速度誤差を示す。

測定条件は、

アンテナ取付角: 30°

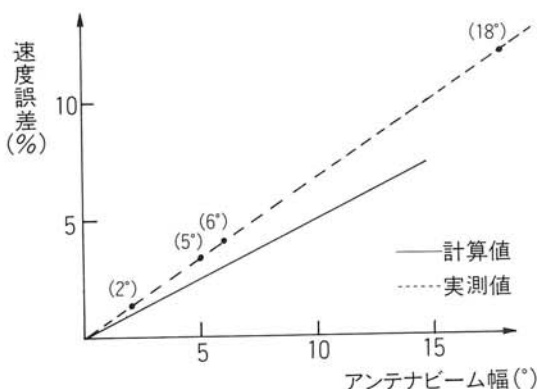
アンテナ取付高さ: 0.6m

路面の条件: 凹凸の平均値約 $\pm 2\text{cm}$ の路面である。図-13の誤差の実測値は、シミュレータの速度バラツキ(約0.5%)も含まれており、理論値より若干悪くなっているが、ほぼビーム幅に比例している。

5. む す び

以上述べたように、我々は、トヨタ自動車⁸⁾と共同で、車間距離制御レーダや車速計測レーダを開発し、実験局の電波免許も取得、フィールド実験で性能評価を行ない、実用性を確認してきた。

ミリ波レーダの実用化にあたっては、



(注) () 内数値は測定に使った
アンテナビーム幅

図-13 精度評価

Fig. 13 Evaluation of accuracy.

- 1) ミリ波用半導体のコストの低減
- 2) 高周波デバイスの精密加工技術、調整技術が必要
- 3) ミリ波帯のレーダセンサの電波割当の実現などの課題が残されているが、50 GHz 帯簡易無線装置が実用化され、市場にも出始めており、1)、2)項は徐々に解決されるものと思われる。

また、3) 項についても、郵政省でミリ波帯の近距離レーダへの割当を検討する動きもあるようで、⁹⁾ 今後の成りゆきに期待したい。

さらに、このような動向をふまえ、今後も、低コスト、高信頼性センサの開発に重点をおき、実用化に向けて努力したいと考えている。

おわりに、車速計測レーダの設計、評価にご協力いただいたトヨタ自動車(株)第二技術部第一振動実験課、ならびに、デバイスの開発にあたりご指導いただいた、(株)富士通研究所の関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 電子通信学会：レーダ技術 (1968)
- 2) T. Takehana et al: "Automotive Radar Using mm Wave", 3 rd Int. Conference on Automotive Electronics, (Oct, 1981.)。
- 3) D. E. Grimes and T. O. Jones: "Automotive Radar, A brief Review", proc IEEE Vol. 62, (June 1974.)。
- 4) T. M. Hylltin et al: "Vehicular Radar Speedometer", SAE paper 730125 (1973.)。
- 5) R. H. Johnston: "Speed Measurement by Radar for Anti-Lock Braking", IEEE 2 nd Int. Conference on Automotive Electronics, (Nov. 1979.)。
- 6) 金子他: "スキッドコントロール装置用マイクロ波車速センサ", 昭和51年7月自動車技術学術講演会。
- 7) Trevor O. Jones: "Status of Agricultural Electronics", Vehicular Technology Conference 25-27 (May 1983.)。
- 8) Baba and Fukumura: "Doppler Radar Speed Sensor for Anti-Skid Control System", SAE paper 780857 (1978.)。
- 9) 仲川、立野: "近距離センサと電波管理上の諸問題", 昭和57年度電子通信学会光・電波部門全国大会。