

シングルチップMMIC応用自動車用76GHzミリ波レーダ

76GHz Millimeter Wave Automobile Radar using Single Chip MMIC

山	野	真	市	<i>Shinichi Yamano</i>
東	田	博	文	<i>Hirofumi Higashida</i>
生	野	雅	義	<i>Masayoshi Shono</i>
松	井	貞	憲	<i>Sadanori Matsui</i>
玉	置	智	彦	<i>Tomohiko Tamaki</i>
矢	木	秀	和	<i>Hidekazu Yagi</i>
浅	沼	久	輝	<i>Hisateru Asanuma</i>



要 旨

1990年代後半から、自動車用ミリ波レーダを利用した、走行支援としての「ACC(Adaptive Cruise Control)システム」が自動車メーカーから発売され、さらに2003年には「衝突被害軽減システム」という安全運転支援へ応用され始めている。今後は、あらゆる走行場面に対応できるようなミリ波レーダの性能向上および採用車種の拡大につながるような低価格化が進むことが予測される。

当社はミリ波レーダ普及のための低価格化アプローチのひとつとして、ミリ波送受信器内のMMIC(Monolithic Microwave IC)モジュールのシングルチップ開発と、それを利用したレーダ開発を行った。本論では、そのシングルチップMMIC応用自動車用76GHzミリ波レーダについての報告を行う。今後はこの低価格レーダの製品化を推進していく。

Abstract

In the latter half of the 1990s, auto manufacturers released driving assistant "Adaptive Cruise Control (ACC) Systems" that utilized Millimeter Wave radar. Then in 2003 this technology started being applied to safe driving support in the form of "Collision Mitigation Systems." In the future, Millimeter Wave radar is expected to undergo performance improvements that will enable it to be adapted to all driving situations, and continued reduced pricing is expected to lead to an expansion in a wide variety of models that adopt it.

As an approach to price reduction aimed at expanding the use of Millimeter Wave radar, FUJITSU TEN LIMITED developed a single chip for Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) modules in Millimeter Wave frequency transceivers and also developed radar that utilizes that technology. This report describes a 76GHz Millimeter Wave radar using such single-chip-MMIC. This low-cost radar will be produced on a commercial basis from this point forward.

1

はじめに

安全運転支援技術はITSの重要な開発分野であり、自動車用レーダはその要素技術のキーパーツである。自動車用レーダの開発は、1970年頃から始まり、1990年代後半にはAdaptive Cruise Control(ACC)Systemが基本的な走行支援システムとして、自動車メーカーから発売されている。

レーダは、レーザーレーダとミリ波レーダのそれぞれを使用するものが発表されているが、車両の汚れや天候（雨・雪・霧）に左右されにくい理由から、世界的にミリ波レーダの開発と展開が推進されている。

本稿では、自動車用76GHz帯ミリ波レーダの採用動向と開発動向を紹介するとともに最新の開発例について述べる。

2 ミリ波レーダのアプリケーション動向

最近の自動車メーカー各社の採用動向を表-1に示す。採用当初のミリ波レーダは、先行車との距離と相対速度等を計測し、適当な車間距離を保ちながら追従走行ができるように、加減速を行い自車速を自動制御する「ACC(Adaptive Cruise Control)システム」と呼ばれる利便装置に適用された。ところが昨年から変化の兆しが出てきている。「ACCシステム」に代表される利便装置に加え、ホンダやトヨタから発売された「衝突被害軽減システム」に代表されるような危険性を判断して運転者に警告を発生し、衝突した場合の被害を低減すべくブレーキを自動的に踏み込むという安全支援装置へ応用され始めている。この「衝突被害軽減システム」は、国土交通省が1990年より推進しているASV(先進安全自動車)プロジェクトの中で開発が進められてきたが、ここにきて自動車の「目」となるミリ波レーダのセンシングの安定度と性能向上により車両への搭載が実現した。

「衝突被害軽減システム」は、ミリ波レーダで先行車を検知し、先行車に接近して追突の危険が迫ると、警報ブザーとディスプレイ表示で警報を発生して、ドライバーに減速を促す。しかしそれでも減速が不十分で衝突の回避が困難と判断されたときは、強いブレーキ制御が自動で行われ、衝突速度を下げるのと同時にシートベルトを巻き取り、乗員を拘束することで被害の低減を図る。

レーダアプリケーションの進化予測を図-1に示す。今後、適応速度範囲を拡大し、低速走行時のみを想定した渋滞追従システムという利便装置へも応用されていくことが予想される。

また現時点ではあくまでもドライバーに注意を促し、衝突の被害を低減するためにブレーキ操作をアシストする「衝突被害軽減システム」は、将来的には周囲の危険を予知して、ステアリング操作までも補助し、危険を回避する「危険回避システム」へも進化していくことが予想される。

今後さらにミリ波レーダを普及させるには、高速道路や一般道路、高速走行時や渋滞時など道路と走行状態を選ばず、あらゆる場面に対応でき、車の周囲全体を監視できるように機能/性能面の向上を図る必要がある。また同時にエアバックやABSと同じような安全装備として採用車種の拡大につながるようシステム価格の低減をすすめることが重要である。

表-1 ミリ波レーダのアプリケーション動向
Table 1 Trends in the Application of Millimeter Wave Radar

(2003年10月現在)

発売年月	メーカー	システム	特徴
1998/11	ダイムラー クライスラー	・ACC	低G ブレーキ制御
1999/07	日産 (シーマ)	・ACC	低G ブレーキ制御
1999/09	ジャガー	・ACC	低G ブレーキ制御
2001/10	BMW	・ACC	低G ブレーキ制御
2002/10	ホンダ (アコード)	・ACC	低G ブレーキ制御
2003/02	トヨタ (ハリアー)	・ACC ・衝突被害軽減	高G ブレーキアシスト
2003/06	ホンダ (インスパイア)	・ACC ・衝突被害軽減	高G ブレーキ強制作動
2003/08	トヨタ (セルシオ)	・ACC ・衝突被害軽減	高G ブレーキ強制作動
2003/10	ホンダ (オデッセイ)	・ACC ・衝突被害軽減	高G ブレーキ強制作動

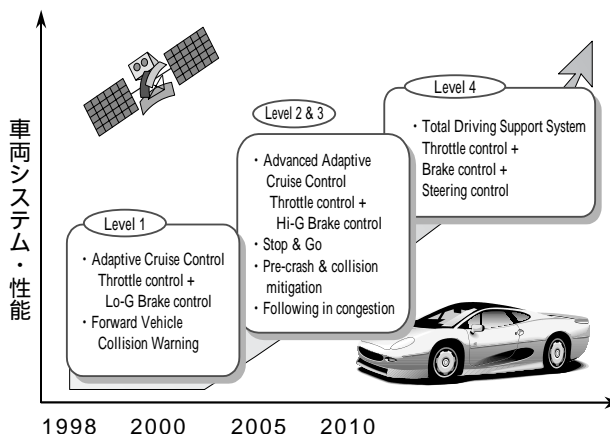


図-1 レーダアプリケーションの進化予測
Fig.1 Prediction of the Evolution of Radar Application

3 自動車用レーダの要件

自動車用レーダは、小型バイクから大型車両まで種々の物体を距離計測範囲は数m～百数十m程度まで、また計測速度は0km/h～±200km/h程度を気象条件や時間帯によらず、安定検出することが求められる。

同時に直線路、カーブ路を問わず、自車の進行方向前方に存在する先行車両が車両制御に必要な自レーン上に存在する車両か隣接レーンに存在する車両かを識別するために相対横位置（角度）を検出することが要求されるため、ビームを所定の角度範囲にスキャンする必要がある。

また、レーダは車両前面の限られたスペースに取り付けられるため、車両の意匠や冷却性能、衝突安全性に影響を与えない寸法に抑える必要がある。

市場への普及のためには、低コストであることも重要である。

左右方向の角度検出方式としては、ビーム切換、モノパルス等の電子的な方法とアンテナ等をメカニカルにスキャンさせる方法が採用されている。ビーム切換方式は、3ビームや9ビームの切換が報告されており、ビーム数を増やすことで角度分解能向上と広角化ができる。また、2つの受信で角度検出が可能なモノパルス方式やビーム形状が可変できるフェーズドアレー方式も報告されている。

一方、アンテナをメカニカルにスキャンする方式は、比較的簡単にシャープなビームを広角にスキャンでき、角度分解能も高くできる。

水平検知角は、±4°程度から±10°のものが報告されており、広角化の傾向にある。

76GHz帯の送受信を担うミリ波デバイスは、Gunnダイオードを用いたものから、量産性の優れたMMIC（Monolithic Microwave IC）を採用したものに移行しており、MMICの特徴を生かした開発が行われている。

4 自動車用レーダの開発動向

主な海外及び国内のメーカーで製品化された最近の自動車用レーダの概要を表-2に示す。

ミリ波レーダにはFM-CW、2周波CW、パルス、スペクトラム拡散（SS）方式等様々な変調方式があるが、高周波部が比較的簡易な構成で距離と相対速度を同時に高精度で計測でき、また相対速度がゼロの時も計測できることからFM-CW(Frequency-Modulated Continuous Waves)方式の採用例が多い。

5 当社ミリ波レーダ製品の概要

ミリ波とは、一般に30GHz～300GHz（波長10mm～1mm）の周波数帯であり、波長が非常に短い電波である。

当社ミリ波レーダがミリ波帯の76GHzを採用しているのは、主要な市場である日米欧の電波行政において周波数割当が決められている為である。

現行のミリ波レーダシステムはFM-CW（Frequency-Modulated Continuous Waves）レーダ方式を採用したレーダシステムであり、簡易な構成でターゲットまでの距離と相対速度を計測する事を可能としている。

表-2 各社ミリ波レーダの概要
Table 2 Comparison of Millimeter Wave Radars from Various Manufacturers

メーカー	当社	ADC	Delphi	Bosch	ホンダエレス	デンソー	日立
外観							
外形寸法 (mm)	89×107×86	136×133×68	137×67×100	91×124×79	123×98×79	77×107×53	80×108×64
変調方式	FM-CW	FM/パルス	FM-CW		FM-CW	FM-CW	2周波CW
検知距離	4～120m以上	1～150m程度	1～150m程度	2～120m以上	4～100m以上	2～150m程度	1～150m程度
水平検知角	±8°	±5°程度	±5°程度	±4°	±8°	±10°	±8°
角度検出方式	メカスキャン	ビーム切換	メカスキャン	ビーム切換	ビーム切換	フェーズドアレイ	モノパルス
ミリ波デバイス	MMIC	GUNN	GUNN	GUNN	MMIC	MMIC	MMIC

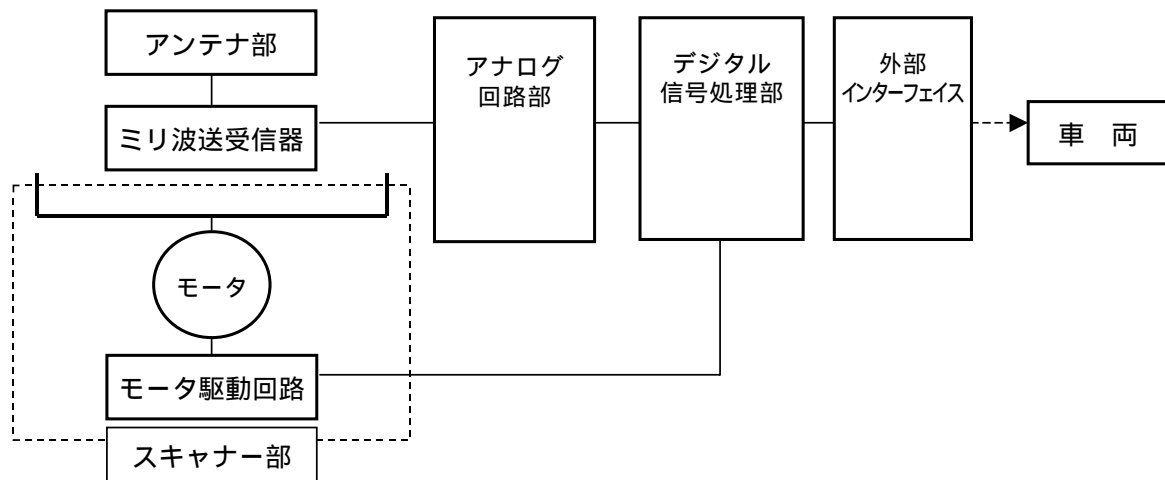


図-2 レーダシステムブロック図
Fig.2 Radar System Block Diagram

ミリ波レーダのシステム構成を図-2に示す。レーダは、アンテナ部、ミリ波送受信器、スキャナー部、アナログ回路部、デジタル信号処理部、外部インターフェイスなどから構成されている。アンテナをミリ波送受信器に接続し、信号処理部で障害物の位置を演算する。これらの演算結果は通信インターフェイスを介して車両側の制御コンピュータへ出力する。レーダシステムの外観を図-3に、主要諸元を表-3に示す。

本ミリ波レーダシステムは、平面アンテナとミリ波送受信器を導波管接続し、アクチュエータにて左右にスキャニングを行う。そして信号処理部では、レーダのビート信号をAD変換しDSP回路にて周波数分析を行い、距離、相対速度、角度情報を演算する事により障害物の位置を検出する。

センサには、小型バイクから大型車両まで種々の物体を時間帯及び気象条件によらず、瞬時に位置、速度を検出できる性能が要求される。そのために、アンテナ、ミリ波送受信器には、大小の障害物をとらえる事のできるダイナミックレンジ及び車両搭載性、スキャニングの負荷を減らす為の小型化が求められている。

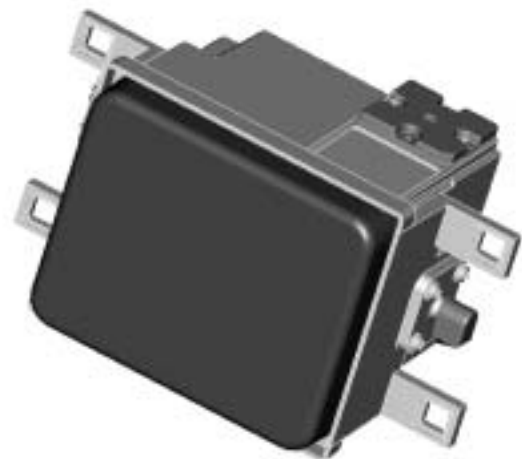


図-3 76GHzミリ波レーダ
Fig.3 76GHz Millimeter Wave Radar

表-3 ミリ波レーダ主要諸元
Table 3 Primary Specifications of Millimeter Wave Radar

項目	諸元
レーダ方式	FM-CW
中心周波数	76 ~ 77GHz
送信電力	10mW以下
アンテナ偏波特性	45° 直線偏波
最大検知距離	約120m

6

ミリ波送受信器

76GHz帯ミリ波レーダの中で、最も重要でかつ技術が急速に進歩している部分はミリ波送受信器である。今後の自動車用レーダの普及には、レーダの低コスト化が望まれており、ミリ波レーダの心臓部とも言えるミリ波送受信器の小型、低コスト化の開発が進められている。

具体的には、セラミック多層基板上に直接MMICチップを実装し、配線を立体的に配置する3次元多層配線構造やMMICとアンテナとの高周波信号接続をパイアホール構造で多層基板に作り込んだ開発等が報告されている。

今回、我々は小型、低コスト化へのアプローチの1つとしてミリ波送受信器内のMMICモジュール実装方法の開発とICの集積化を応用したシングルチップ統合MMICモジュールを開発した。ミリ波送受信器の構成を図-4に示す。

MMICを2モジュール構成とし、VCOを除く送受信の機能を1チップのMMIC内に収めた。シングルチップ統合MMICモジュールは、気密パッケージに封止され信頼性を確保しており、周波数逡倍器(MLT)、ミキサ(MIX)、増幅器(AMP)の機能を集約した送受信統合MMICで構成されている。

この送受信器のシステム構成は従来品と同じであるが、シングルチップ統合MMICモジュールにする事で、従来品と比較して、ユニット体積比75%、重量比75%を達成した。また、チップ内に高周波伝送ラインを形成するため接続数も削減する事が可能となり、製作の簡略化、性能の安定化も実現できた。

6.1 シングルチップMMIC (統合MMIC)

統合MMICチップの写真を図-5に示す。用いたプロセスはInGaP/InGaAsヘテロ接合を持つPHEMT(Pseudomorphic HEMT)をベースにしており、PHEMTはゲート長0.15 μ m、遷移周波数(transition frequency) $f_t=90$ GHz、最高発振周波数(maximum frequency of oscillation) $f_{max}=170$ GHzの性能である。キャパシタは、SiNを用いたMIM(Metal Insulator Metal)構造である。抵抗はエピタキシャル活性層を用いる。統合MMICのチップ面積は8.46 mm^2 であり、従来のMMICチップの総合面積の3分の1に収める事ができた。また、図-5のチップ写真に示すように、回路間の不要輻射による干渉を防止するために、250本以上のアースされた金ピラーをMMICチップ上に配置した。

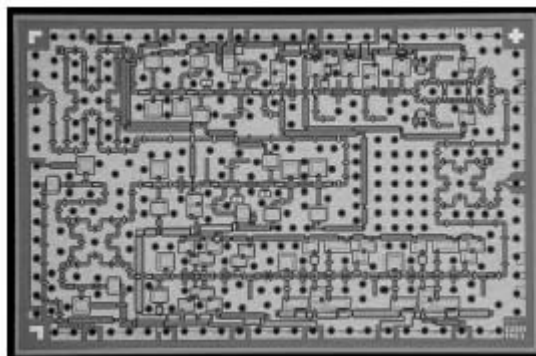


図-5 シングルチップ統合MMIC写真
Fig.5 Single Chip Integrated MMIC

開発したシングルチップMMICモジュールの性能を表-4に示す。また送信性能と受信性能を図-6と図-7に示す。従来のMMICモジュールを組合せたものと比較して、同等の性能が確認できた。

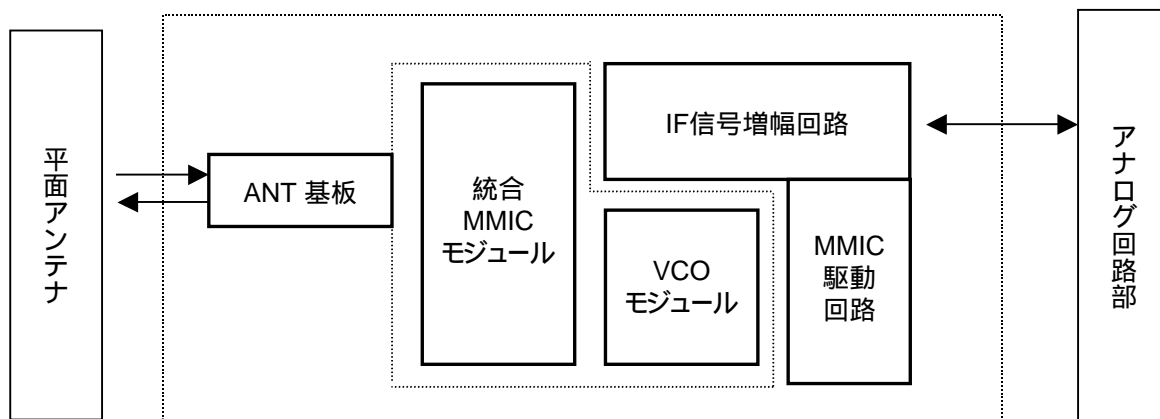


図-4 ミリ波送受信器ブロック図
Fig.4 Millimeter Wave Transceiver Block Diagram

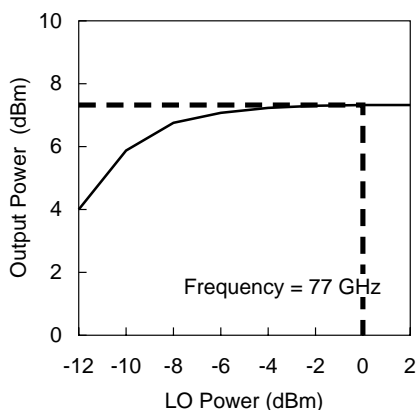


図-6 シングルチップ統合MMIC出力電力
Fig.6 Output Power of Single Chip Integrated MMIC

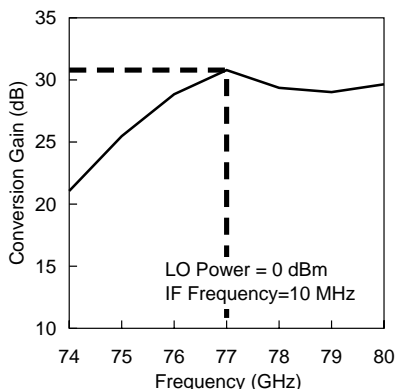


図-7 シングルチップ統合MMIC変換利得
Fig.7 Conversion Gain for Single Chip Integrated MMIC

表-4 シングルチップ統合MMICの性能

Table 4 Performance of Single Chip Integrated MMIC

項目	送信性能	受信性能
高周波特性	送信電力 7.3dBm (0dBm@38GHz in)	利得 30.8dB (0dBm@38GHz in)
		雑音指数 11dB (@IF 1MHz)
消費電力	0.54W _{DC}	0.3W _{DC}

6.2 シングルチップ統合MMICの回路動作

1チップ統合MMICモジュールのブロックダイアグラムを図-8に示す。前章で説明したように、従来の4つのMMICチップを1つのチップに統合した。

統合MMICモジュールは、外部から38GHzのVCO信号を入力するポートと76GHzの信号の入出力ポート、及び2つのIF信号出力ポートを持つ。信号の経路は、大きく、ローカル信号の経路、送信信号の経路、受信信号の経路に分かれる。

送信モード時には受信部はOFFされ、受信モード時には送信部はOFFされる。

送信・受信の切替は、送信部のアンプと受信部のアンプのドレインバイアス電圧を順番に可変する。

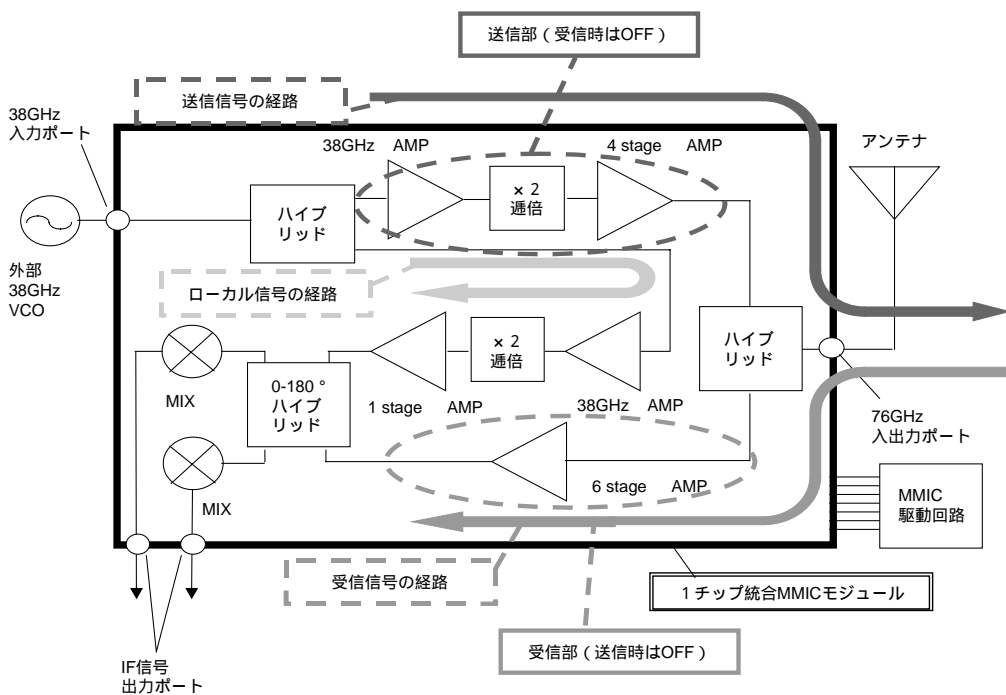


図-8 シングルチップ統合MMICブロックダイアグラム
Fig.8 Block Diagram for Single Chip Integrated MMIC

三角波状の変調信号が入力されたVCOモジュールは、FM変調された信号を出力する。VCOからの信号は38GHzブランチラインハイブリッド回路により2つに分離される。分離した信号のうち1つはローカル信号として、38GHzアンプで増幅後、逡倍器に入り、1段アンプにより再度増幅され、76GHzミキサのローカルポートに供給される。

また、別の分離した信号は、38GHzアンプにより増幅後、逡倍器に入り、アンプにより増幅され、76GHzブランチラインハイブリッドを通して、76GHz入出力ポートより送信信号として出力される。

受信信号は、76GHz入出力ポートから76GHzブランチラインハイブリッドを通して、アンプにより増幅され、0 - 180度ハイブリッド回路から1対のシングルエンドミキサによりダウンコンバートされ、IF信号出力ポートより出力される。

今回のシングルチップ化においては、従来送受信器と同等特性を持つよう、レベルダイヤを設定した。また、ハイブリッドもチップ内に構成し、コストダウン・小型化を目指した。

7 レーダ評価結果

今回開発したシングルチップMMICを使用し、遠方に停止した乗用車に徐々に近づいていった時の距離と相対速度の検知性能(Tracking Performance)を図-9に示す。乗用車の検知性能については170m以上から2mまで検出可能であ

る。また、乗用車を検知している状況を図-10に示す。図-10の中のターゲットとなる乗用車に重なった四角はレーダが検知した位置を示しておりターゲットを正確に捉えていることが分かる。また、図-10の右側はレーダの検知状態を上から見た状況を示しており縦方向がターゲットの距離、横方向がターゲットの横位置を示す。丸い点線で囲った箇所にターゲットとなる乗用車を正しい距離・横位置で検知していることが分かる。

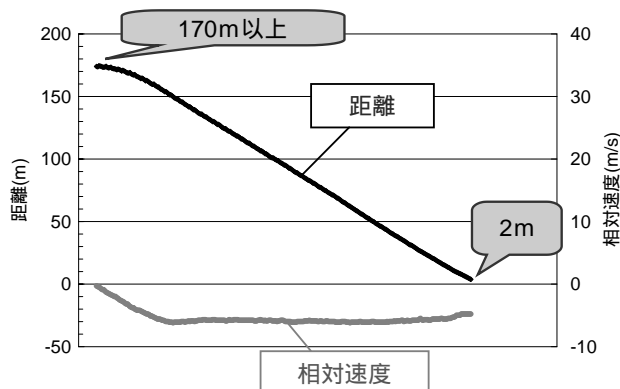


図-9 実車評価結果
Fig.9 Actual Tracking Performance

図-11, 12はRCS (Radar Cross Section) 値が約 10m^2 (乗用車相当) のリフレクタを定点に設置して測定した距離と相対速度の精度を示す。20mから160mまでの各距離での検知距離誤差は1m未満、相対速度の誤差も0.5m/s未満と良好な結果を得た。

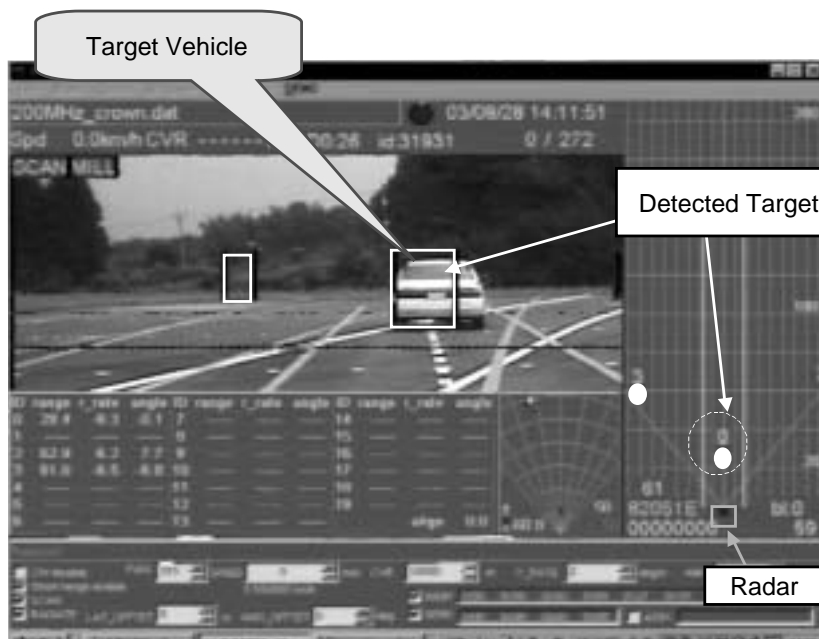


図-10 ターゲット検知状況
Fig.10 Target Detection Mechanism

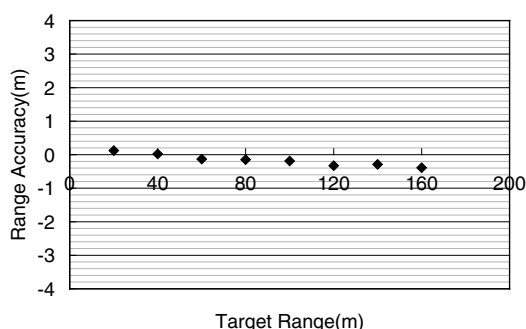


図-11 距離精度

Fig.11 Range vs. Accuracy

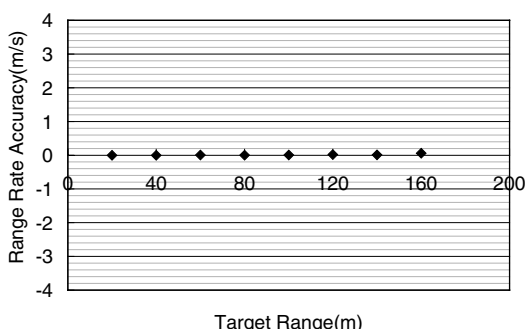


図-12 相対速度精度

Fig.12 Range Rate Accuracy

市場ではACCシステムに代表される利便装置や衝突被害軽減システムに代表される安全支援装置として、ミリ波レーダを搭載した車両がさらに増加していくことが予想され、低価格化とともにさらに高機能、高性能化が要求される。

ミリ波レーダのキーパーツであるMMICの技術開発とそれを利用する周辺回路を含めたシステム開発を進め、今後ミリ波レーダの市場拡大に寄与したい。

参考文献

- 1) 山脇, 山野: 60GHz帯自動車用ミリ波レーダ. 富士通テン技報, Vol.15 No.2
- 2) 山脇, 山野, 加藤木, 田村, 大平: 障害物検知用ミリ波レーダ装置. 富士通テン技報, Vol.18 No.1
- 3) 青木, 渡邊, 大久保: 76GHz車載レーダ用HEMT MMIC. FUJITSU, Vol.51 No.3
- 4) 大橋, 長谷川, 元二, 矢木, 山野: 76GHzシングルチップMMIC高周波ユニットの開発. 富士通テン技報, Vol.20 No.1
- 5) T.Shimura et al: A Single-chip Transceiver Module for 76-GHz Automotive Radar Sensors. 31st European Microwave Conference Proceedings, vol.3, pp.153-156, 2001.
- 6) 日経メカニカルD & M, 2003.8 No.587. 日経BP社
- 7) 日経エレクトロニクス, 2003.8. 日経BP社
- 8) 本田技研工業ホームページ: <http://www.honda.co.jp/INSPIRE/message/index.html>
- 8) 日立製作所ホームページ: <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/>

8

おわりに

今回ミリ波レーダの低価格化への取組みのひとつとしてミリ波受信器に使用するシングルチップMMIC開発とそれを利用したレーダの開発を行い、特性の評価を実施した。

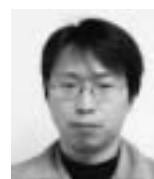
筆者紹介



山野 眞市
(やまの しんいち)
1980年入社。以来、自動車用電装製品のハード設計に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在、事業本部ITS・安全システム事業部第一技術部長。



東田 博文
(ひがしだ ひろふみ)
1984年入社。以来自動車用電装製品のソフト設計に従事。1998年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在、事業本部ITS・安全システム事業部第一技術担当部長。



生野 雅義
(しょうの まさよし)
1988年入社。以来、自動車用電装製品の開発に従事。1991年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在事業本部ITS・安全システム事業部第一技術部長在籍。



松井 貞憲
(まつい さだのり)
1989年入社。以来、自動車用電装製品の開発に従事。2000年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在事業本部ITS・安全システム事業部企画チーム在籍。



玉置 智彦
(たまき ともひこ)
1991年入社。以来、自動車用電装製品の開発に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在事業本部ITS・安全システム事業部第一技術部長在籍。



矢木 秀和
(やぎ ひでかず)
1992年入社。以来、自動車用電装製品の構造開発に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在事業本部車両制御事業部車載技術第四設計チーム在籍。



浅沼 久輝
(あさぬま ひさてる)
1993年入社。以来、自動車用電装製品の開発に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在事業本部ITS・安全システム事業部第一技術部長在籍。