

自動車レーダ用ミリ波モジュール

稲常茂穂* 宇田川重雄*
 鈴木拓也* 倉茂和紀*
 神戸心一*

Millimeter Wave Module for Automotive Radar

Shigeho Inatsune, Takuya Suzuki, Shinichi Kambe, Shigeo Udagawa, Kazunori Kurashige

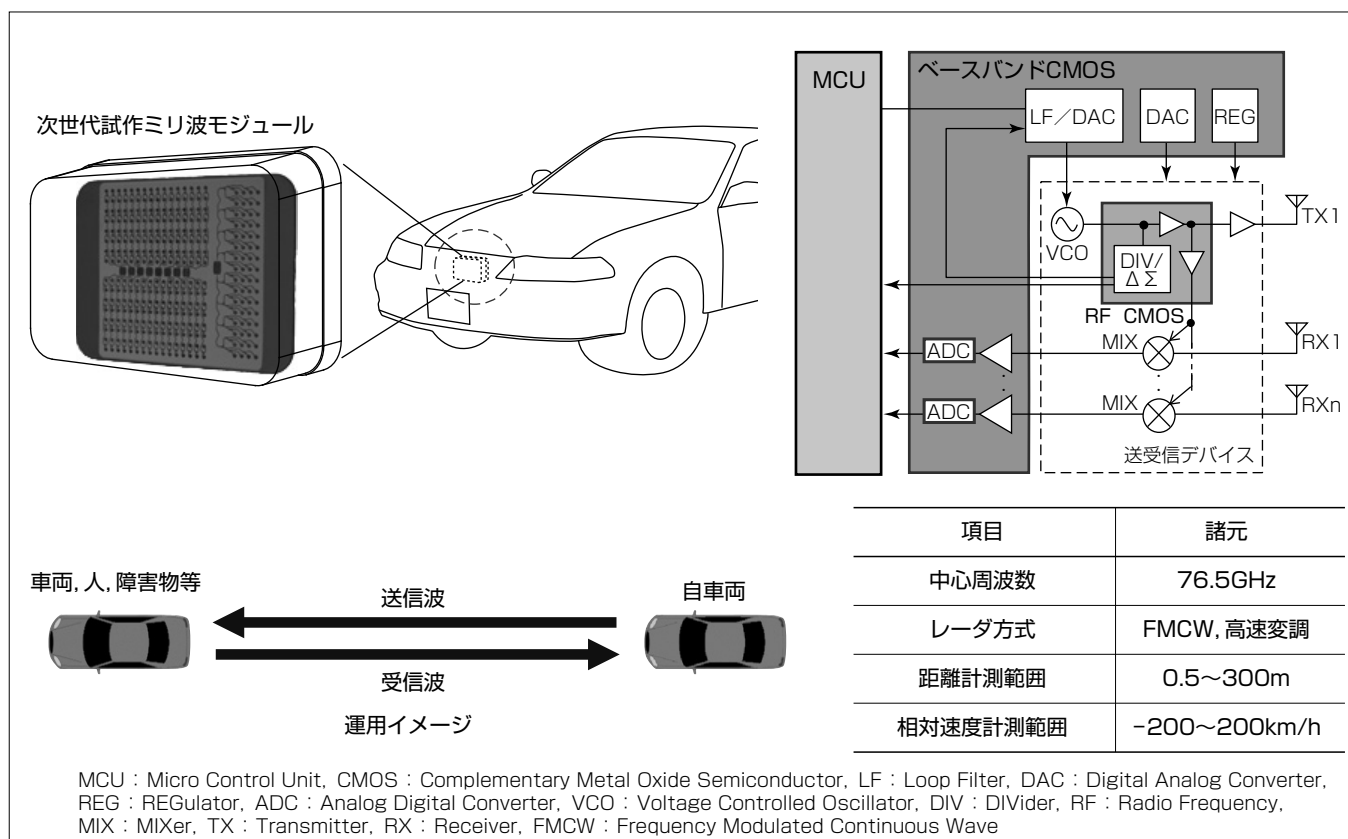
要旨

近年、自動車用安全運転支援システム(プリクラッシュセーフティ、自動緊急ブレーキ等)や車間距離を一定に保つACC(アダプティブクルーズコントロール)として、76GHz帯小電力ミリ波レーダを応用したシステムが各自動車メーカーから発売されている。ミリ波レーダは天候に左右されにくく、視界の悪い夜間でも性能を落とさず、遠くまで検知できるという特長がある。最近では自動運転技術の開発が盛んに行われるようになり、安全センサとしての役割が今後も期待される。

衝突防止を目的としたミリ波レーダの開発の歴史は古く、日本でも1980年頃から試作が行われているが、周波数が高いことから安価に使えるデバイスがなく、長年実用化に

結び付かなかった。三菱電機鎌倉製作所では宇宙・防衛機器開発で培ったミリ波帯MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)やその利用技術を応用して、1998年から自動車レーダ用ミリ波モジュールの開発を本格的に開始した。2003年1月の量産開始以来、小型化、低コスト化を進め、広く普及することで安全社会に貢献している。

今回、GaAs(ガリウムヒ素)による低位相雑音、高S/N(Signal to Noise)比、PLL(Phase Locked Loop)による変調補正の自動化、受信マルチチャネル化、コスト低減を図った次世代のミリ波モジュールを試作・評価するとともに、近年急激に拡大した生産規模に対応するため、製造や検査の自動化ラインを整備した。



次世代ミリ波モジュールの試作

自動緊急ブレーキ等で使われるミリ波レーダは自動車のフロントグリル付近又はバンパー付近に位置しており、ミリ波モジュールはその中のアンテナから送受信部、ADC、マイコンまでをまとめたものである。次世代のミリ波モジュールでは新たにCMOS ICを開発し、製品特性の安定化、調整検査削減、小型化を図る。試作では乗用車相当の目標物で250m以上離れた位置でも十分なS/N比を確保できることを確認した。

1. ま え が き

安全運転支援等を目的として搭載される自動車用のミリ波レーダで重視される性能は主に検知距離能力と角度精度である。法的に送信電力の上限が決められているため、高い検知距離能力を得るためには、アンテナを含めた送受信利得が高いことと雑音レベルが低いことが必要である。アンテナについては温度特性に優れた高利得のものを開発し、雑音特性についてはGaAsプロセスによってVCOやミキサを用いて低雑音化を図っている。また、角度精度を高めるには受信チャンネル間のアイソレーション特性を高め、振幅・位相の温度安定性を保つことが重要であり、このために独自のデバイス構造を採っている。

本稿では、今回試作した次世代ミリ波モジュールとそのフィールド試験結果及びミリ波モジュールの生産体制について述べる。

2. ミリ波モジュール

2.1 構成

ミリ波モジュールは、放射素子・分配回路・合成回路・マイクロストリップ変換器からなるアンテナ、VCO・増幅器・ミキサ等の高周波半導体素子が搭載される送受信デバイス、及び、送受信デバイスの制御と受信信号の処理を扱うMCUから構成され、ミリ波レーダの主要部分を占める。対応できるレーダ方式はFMCW方式と高速変調方式である。

量産開始以来、主に構造の簡素化・機能集約(集積化)・基板材料費の削減を実施することで、小型・軽量化による低コスト化を進めつつ高性能化を実現してきた。現在開発中の次世代ミリ波モジュールでは、新たにCMOS ICを開発し、低コスト化と製品特性の安定化、調整検査削減を図る。

図1のCMOS ICはVCOの変調補正回路とVCOの出力増幅を行うアンプを一体化したRF CMOS部と、送受信デバイス内の各ICのバイアス制御回路、及び受信信号の増幅、ADCを含むベースバンドCMOS部からなる。

次世代ミリ波モジュールの開発では、最新の技術動向調査と想定されるシステム要求を反映して機能・性能の拡充を行っている。より遠くまで検出し、かつより広く見たいという要求のバランスを取るため、アンテナについては高利得化に加えて広角化を優先した素子配列のものも用意している。今後、顧客の要求に合わせてアンテナ特性と送受信チャンネル数の適正化を図っていく。

2.2 アンテナ

レーダアンテナには高利得、低サイドローブ、高信頼性等が要求され、航空機、船舶等では導波管スロットアレー方式が主流となっている。当社でも自動車用としてこの技術を応用し、製品化した例があるが、現在では薄型化、軽

量化に加えて広角化と低コスト化で有利となるマイクロストリップアレー方式を採用している。基板材料はPTFE(フッ素樹脂)ではなく、より温度特性が優れ、自動車の厳しい環境条件に適合する樹脂材料を採用した。アンテナ設計は各チャンネルの中央から給電する方式とし、自動車レーダ用に最適化した素子配列と励振分布を用いて、導波管スロットアレーに匹敵する高利得、低サイドローブ特性を実現している。偏波は45度偏波とし、対向車との干渉低減を図っている。回路パターン形成は一般的な基板製造工程での製造を可能とし、高精度で大量生産を実現している。

図2に今回試作したアンテナを示す。送信は64素子をまとめて1チャンネルとし、受信は32素子をそれぞれまとめたものを並べて8チャンネル構成とした。水平面及び垂直面のアンテナ特性を図3に示す。サイドローブ特性として、-35~-40dBが得られている。

2.3 送受信デバイス

MMICを安定に動作させ、かつミリ波帯送受信信号をアンテナ給電点に伝送するために、従来の送受信デバイス

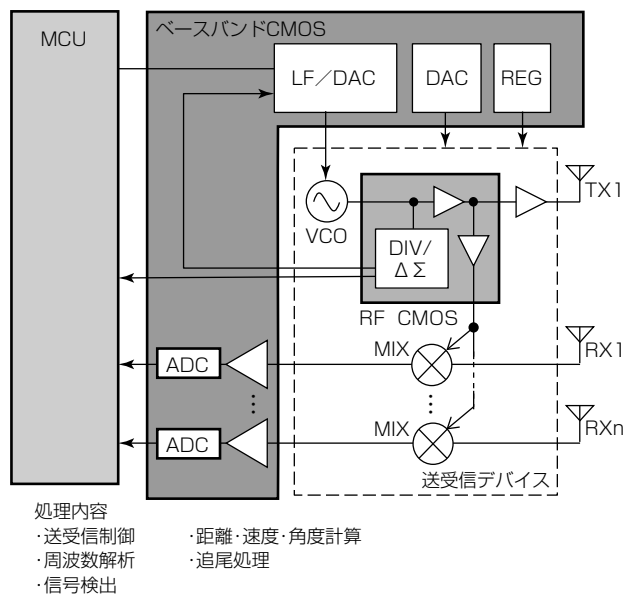


図1. ミリ波モジュールブロック図

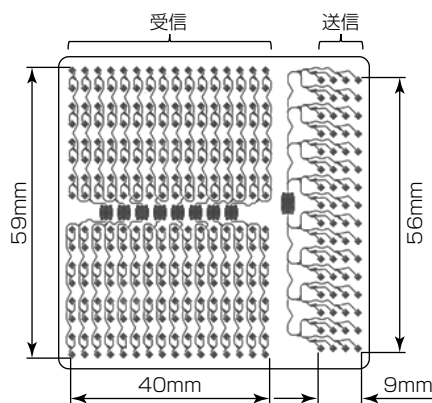


図2. アンテナ

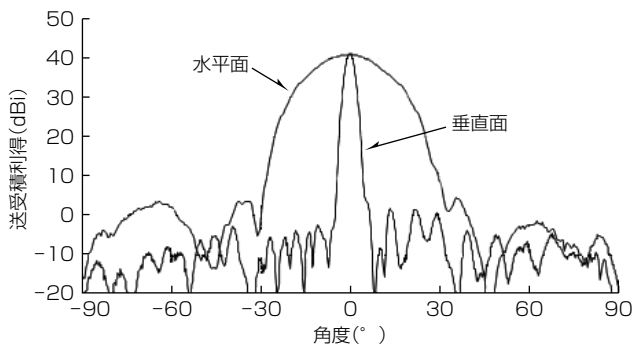


図3. 放射パターン評価結果

はセラミックパッケージ、ダイボンディング／ワイヤボンディングが主流であったが、低コスト化のために樹脂パッケージ、フリップチップ／リフロー実装を適用している。樹脂パッケージはMMICが実装された高周波用樹脂基板上にはんだボールを搭載して、制御基板上にBGA (Ball Grid Array)実装する構造によって、従来セラミックパッケージで使用されていた複雑な蓋材や信号接続ピンなしで、各IC間のアイソレーション／シールド機能とRF／制御信号接続機能を実現している。また、セラミックパッケージと比べて、制御基板との線膨張係数差がなくなり、耐環境性でも実装／接合信頼性が優れている。このBGA構造によって、ミリ波帯送受信信号は送受信デバイスから制御基板の反対面に実装されたアンテナ給電点に最短給電される(図4)。これによってアンテナと同一面に送受信回路を構成する場合に必要なとされるMMICからアンテナまでの引き回しが不要になり、各チャンネル間が等長でかつ1 dB未満の低損失なRF配線接続を実現している。

送受信IC(MMIC)は機能／性能によって、GaAsとCMOSプロセスを使い分けている。高速かつ直線性の高いFM変調を実現するオープンループ及びクローズドループ(PLL)方式の変調補正回路、受信ADCを含むベースバンド及びバイアス制御回路をCMOSプロセスによって集積化している。一方、1/f雑音特性や出力電力に優れるGaAsプロセスを発振器及びフロントエンドアンプに用いることによって、オープンループ方式で-105dBc/Hz@ 1 MHz off、PLLでは-88dBc/Hz (FOM(Figure Of Merit) = -223dBc/Hz) @ 1 MHz offの低位相雑音、出力>10dBm@125℃を実現している(図5)。

受信系は1/f雑音の低いGaAs SBD(ショットキバリアダイオード)を用いて、LNA(低雑音増幅器)なしのMIXダイレクトコンバージョン方式のマルチ受信構成(8チャンネル)となっており、LNAありの場合と同等の雑音性能を維持している。MIX回路はダイオードだけをチップ化／実装し、樹脂基板上でフィルタ回路を形成したディスクリット構成とすることで低コスト化を実現している。これらの構成によって利得温度偏差は-30~125℃で2 dB未満、受信各チャンネル間の振幅／位相トラッキング特性はそれぞれ、±0.5dB、±3°以下となっており(図6)、ミリ波レーダ

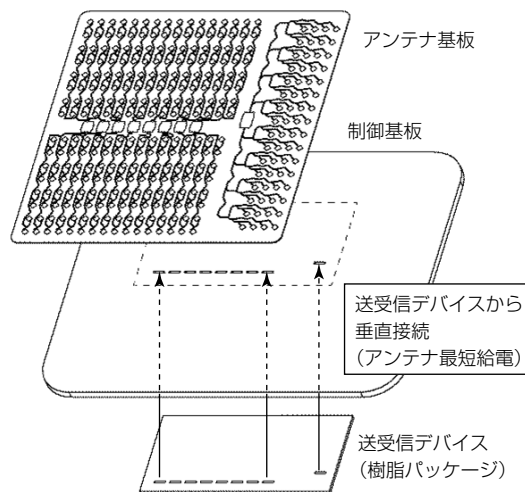


図4. RF信号接続構造

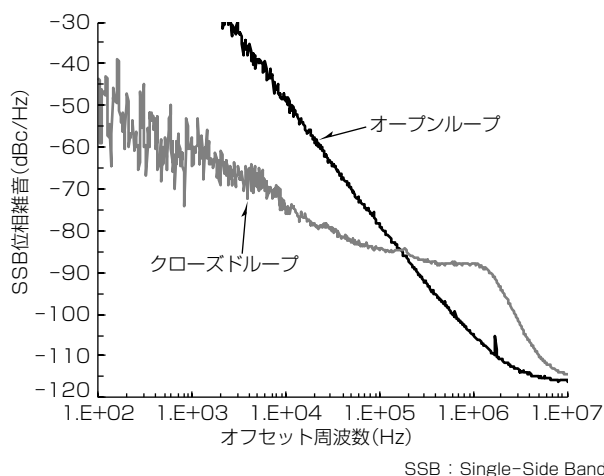


図5. 送信位相雑音特性(77GHz帯)

として高い角度検出特性が期待できる。

2.4 フィールド試験結果

試作ミリ波モジュールを試験車両のエンブレム付近に取り付け、目標物としてコーナーリフレクタ(反射断面積が乗用車相当の約15dBsm)と乗用車を用いて検知距離性能を確認した。図7はコーナーリフレクタを250m離れた位置から見たもので、10dB以上のS/N比が得られている。また、図8は乗用車を目標物としてレーダを搭載した試験車両を接近させた例で、約200mの位置でも十分なS/N比であることが分かる。

3. 生産体制

3.1 品質活動

量産開始以来、自動車レーダ用ミリ波モジュールは人命に関わる重要部品であるとの認識の下、過去のトラブル事例の水平展開、不良を発生させない活動、不良を流出させない活動、作業者の意識向上活動を活動方針とし、製品設計、工程設計、工程検証、量産までの各ステップでの実情に応じた種々の取組みを実施してきた。

最近では、新規点・変化点管理及び検証強化とロバスト性

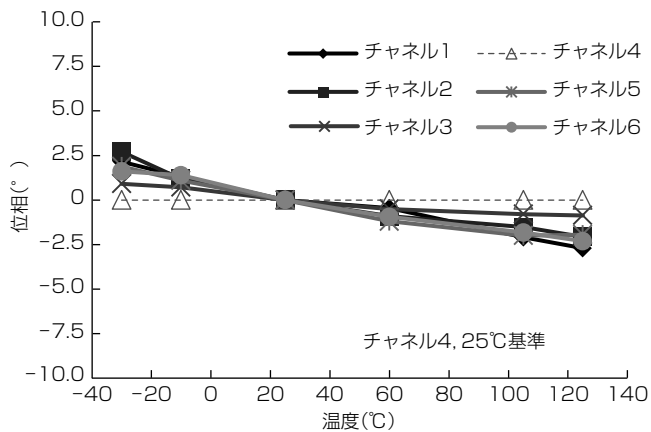
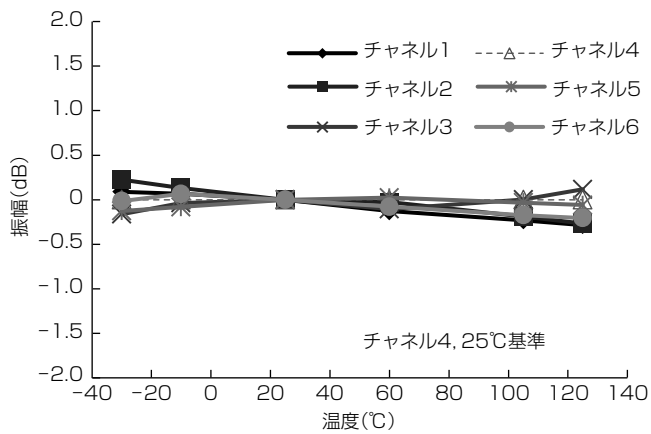


図6. 受信チャンネル間の振幅/位相トラッキング特性

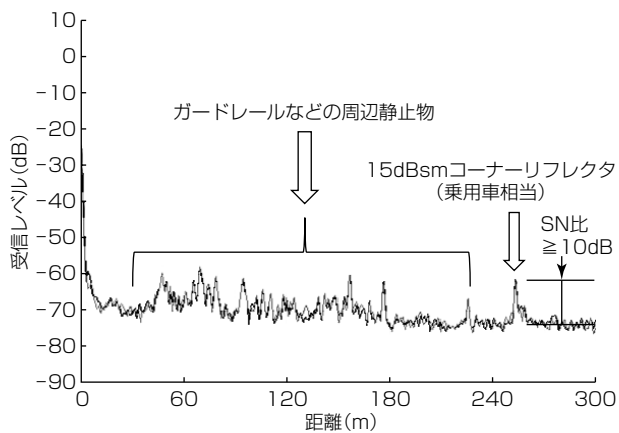


図7. コーナーリフレクタの受信信号スペクトル

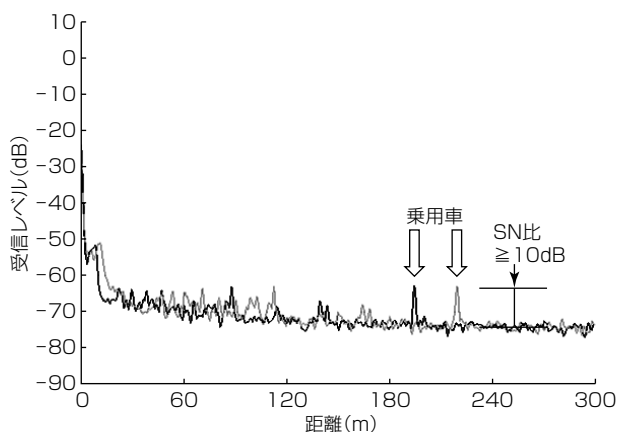


図8. 乗用車の受信信号スペクトル



図9. ミリ波デバイス専用製造ライン

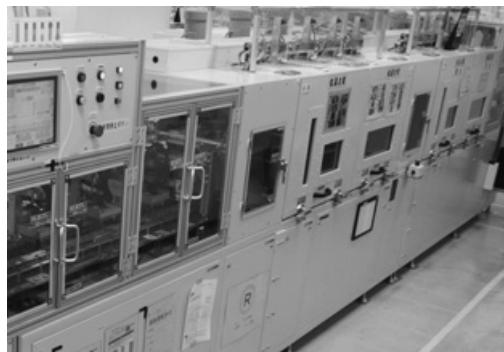


図10. 自動調整検査ライン

確保、部品購入先・外注先への管理強化、工程内品質・異常見える化と対策処置時間短縮化を重点事項として実施中である。

3.2 製造・検査ライン

製造ラインは、送受信デバイス組立てとミリ波モジュール組立てに分かれる。前者はデバイスパッケージ製造自動化ライン、後者はSMT(Surface Mount Technology)実装自動化ラインを複数持っている(図9)。

また、量産検査ラインは、常温、高温、低温で測定可能なインライン検査装置を複数導入しており、完全自動で全数検査に対応している。主な検査項目は電波法に関わる送信電力、周波数等の送信特性とレーダ動作を模擬した受信スペクトル特性である(図10)。

製造・検査ラインは、全部品と工程履歴のトレーサビリティデータや、各種の製造・検査結果のトレンドデータをサーバ上で管理しており、必要時には瞬時にデータを確認することができる。

4. む す び

次世代試作ミリ波モジュールの構成、アンテナ特性、送受信デバイスの構造や特性について述べ、フィールド試験結果について示した。コスト低減や調整検査の負荷を減らすために新たに開発したCMOS ICによって検知距離等、所望の性能が得られることを確認した。

今後は製品化に向けて送受信チャンネル数やアンテナビームパターンの適正化、信頼性評価等を計画している。