

CMOS技術で実現したミリ波レーダ用ワンチップ送受信IC

One-Chip Transceiver IC Using CMOS Technology for Millimeter-Wave Radar Applications

三友 敏也 星野 洋昭

■ MITOMO Toshiya

■ HOSHINO Hiroaki

近年、77 GHz帯のミリ波信号を用いた高直進性で高分解能なレーダ技術が注目されている。従来のレーダ送受信器は化合物半導体を用いたモジュールが一般的で、民生用としてはコストが課題であったが、低コスト化かつ高集積化可能なCMOS（相補型金属酸化膜半導体）技術は、微細化によりその動作が非常に高速化し、ミリ波の信号を取り扱えるようになってきている。

東芝は、77 GHz帯ミリ波レーダ用として周波数変調連続波（FMCW）方式を採用したワンチップ送受信ICを90 nm CMOS技術を用いて開発し、CMOS ICとして世界で初めて^(注1) 77 GHz帯の高精度FMCW信号の発生と距離測定（測距）に成功した。

Demand has been increasing for commercial radar applications using 77 GHz-band millimeter waves, which offer enhanced ranging operations due to the advantages of high straight-line performance and high resolution. However, the high costs of conventional radar transceivers fabricated with compound semiconductors have been hindering the dissemination of millimeter-wave radar applications. A recent deep-submicron complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) technology has therefore been attracting considerable attention as a solution to this issue.

Toshiba has developed the world's first one-chip transceiver IC for 77 GHz-band millimeter-wave radar using a 90 nm CMOS technology based on frequency modulated continuous wave (FMCW) radar technology. We have confirmed the effectiveness of this transceiver IC through experiments on its FMCW signal generation and ranging performance.

1 まえがき

77 GHz帯のミリ波信号を用いたレーダは、高直進性かつ高分解能であることから、様々な測距の用途に応用できる。ミリ波は、非常に高い周波数であるため、これまで高周波性能に優れた化合物半導体を組み合わせたモジュールを用いることが一般的であった。しかし、これらはコストが高く、民生向けに広く普及させることが困難であった。

一方、CPUやメモリなどで用いられるCMOS技術は、微細化の進歩によりその動作が非常に高速化しており、ミリ波信号を取り扱えるようになってきている。このような状況から、化合物半導体より安価で集積化に向けたCMOS技術を用いたミリ波アプリケーション向けICの実現が望まれている。

東芝は、CMOS技術を用いたミリ波回路の開発に取り組んでおり、これまでに60 GHz帯を用いた高速通信アプリケーション向けに高集積CMOS ICを開発している。

ミリ波レーダは、更に周波数の高い77 GHz帯信号を扱うだけでなく、レーダ向け信号として77 GHz帯での高精度な変調技術が必要であり、CMOS技術で実現することは困難であった。

今回、90 nm CMOS技術を用いることで、CMOS ICとして世界で初めて77 GHz帯で動作し、測距が可能なミリ波レーダ用のワンチップ送受信ICを開発した。ここでは、このICの概

要と評価結果について述べる。

2 77 GHz帯を用いたレーダ送受信器

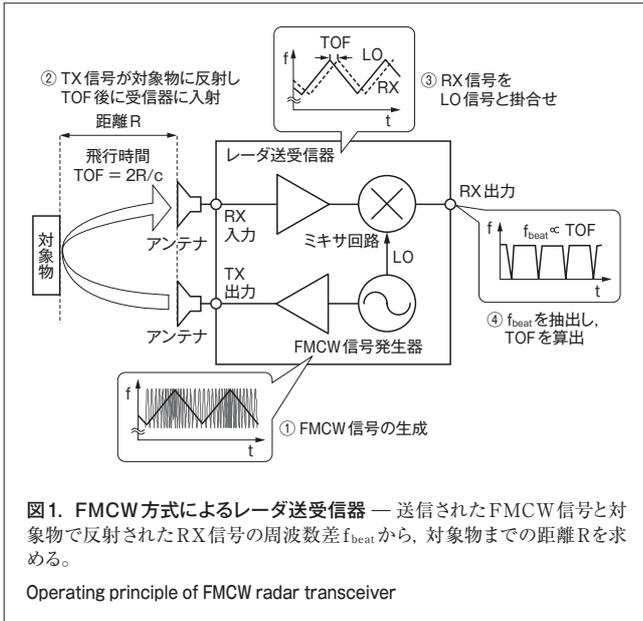
2.1 CMOS技術に適したレーダ方式の選定

レーダシステムでは、アンテナから放射し対象物で反射された信号を受信することで、対象物までの距離を求める。

測距方式の一つである周波数変調連続波（FMCW）方式を用いたレーダ送受信器の例を図1に示す。FMCW信号発生器は、77 GHz帯で周波数が時間に対し三角波状に変化する、FMCW信号を生成する（図1の①）。この送信（TX）信号はアンテナから空間に放射されて対象物で反射後、受信アンテナに入射する（②）。このときレーダ送受信器から対象物までの距離をR、光速をcとすると、信号の往復にかかった飛行時間（TOF）は $2R/c$ で表される。この受信（RX）信号は、送受信器内部のミキサ回路で、FMCW信号発生器で生成されたFMCW信号と同一の局部発振（LO）信号と掛け合わされ（③）、両者の周波数差であるビート周波数（ f_{beat} ）を持つ信号が出力される（④）。 f_{beat} を高速フーリエ変換処理などにより求めてTOFを算出し、距離Rを得ることができる。

このFMCW方式の特徴は、ほかのパルスを用いた測距方式に比べ、出力信号のピークパワーが小さいことである。CMOS技術では電源電圧が低く、瞬間的に高い出力パワーを得ることは困難である。FMCW方式は比較的低いピークパワーで

(注1) 2009年6月時点、当社調べ。

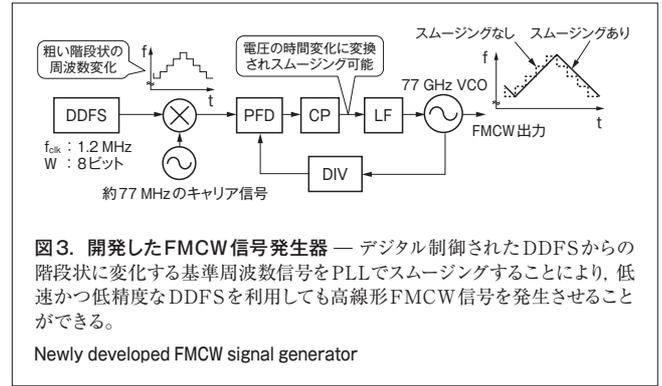
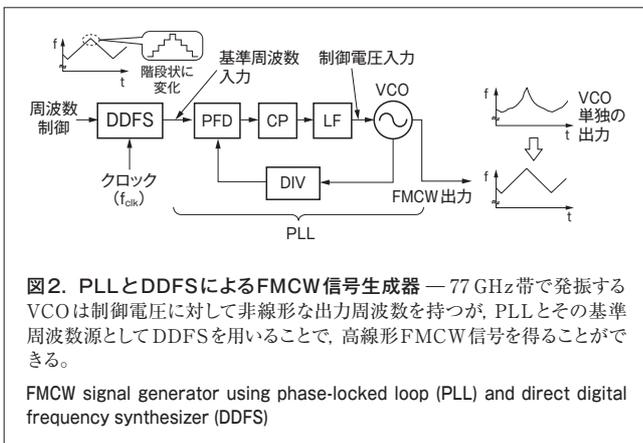


利用可能なため、ここでは77 GHz帯レーダをCMOS技術で実現するための方式として採用した。しかしFMCW方式では、周波数変調の誤差が測距精度に大きく影響⁽¹⁾するため、非常に正確な周波数の掃引が必須となる。

2.2 低速かつ低精度のDDFSで動作するFMCW信号生成器

線形に周波数を掃引したFMCW信号を得る方法はいろいろ提案されている。この中で、位相ロックループシンセサイザ(以下、PLLと略記)やダイレクトデジタル周波数シンセサイザ(DDFS)を用いたFMCW信号生成器は、高集積化とデジタル化を得意とするCMOS技術に適した方法の一つである。PLL及びDDFSを用いたFMCW信号生成器の例を図2に示す。

PLLは、77 GHz帯電圧制御発振器(VCO)、VCOの信号を分周する分周器(DIV)、分周信号と基準信号の位相周波数比較器(PFD)、チャージポンプ(CP)、及びループフィルタ(LF)から成り、VCOの出力周波数を基準周波数に比例した



周波数に制御できる。77 GHz帯で発振するVCOは、その周波数制御電圧に対して非線形な出力周波数を持つが、PLL及びその基準周波数源として正確な信号を出力できるDDFSを用いて、高線形FMCW信号を得ることができる。しかし、DDFSはデジタル制御されるため、DDFSから出力できる周波数はクロック周波数(f_{clk})と位相精度(W)に依存した階段状に離散化された値となる。したがって、レーダに必要な線形FMCW信号を得るためには、この階段の大きさがある程度以下に抑える必要がある。例えば要求されるレーダ測距精度が1 mである場合、150 MHz以上の f_{clk} と24ビット以上の W が必要となり、消費電力とIC実装面積の増加を伴ってしまう。

今回開発したFMCW信号生成器(図3)は、小型で低消費電力な低速かつ低精度のDDFSによる高精度な信号の発生を実現している。

低速かつ低精度のDDFSを基準周波数信号源として用いた場合、その周波数変化は粗い階段状になるが、このPLLでは、階段状の周波数変化をスムージングすることで線形な周波数掃引信号を生成できる。DDFSから出力された信号は時間に対して周波数が変化するが、PLL内部のCPの出力ではその信号が電圧の時間変化に変換され、この電圧信号に対してLFで適切にフィルタリングすることにより、スムージングを実現できる。また、DDFSのキャリア信号(77 MHz)をミキサ回路により与え、DDFSの出力周波数を下げることで、更に f_{clk} と W を低減できる。

この手法により、1.2 MHz、8ビットと低速かつ低精度のDDFSを基準としても、100 m離れた対象物を50 cmの精度で測距できることが見積もられた。PLLの高周波部は、クロスカプル型トポロジーに基づいた77 GHz帯VCOと、その信号を1/4分周する初段分周器によって構成されている⁽²⁾。

2.3 ワンチップ送受信IC

今回開発したレーダ用ワンチップ送受信ICは、低雑音増幅器(LNA)、ミキサ回路、及び出力用アンプから成る受信器と、パワーアンプ(PA)及びドライバアンプ(DA)から成る送信器、FMCW信号生成用のPLL、LO信号分配器から構成される(図4)。

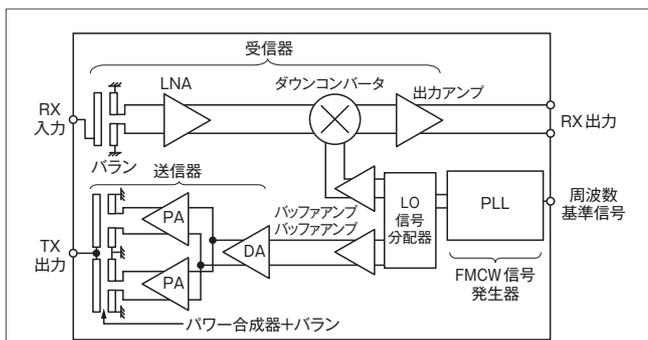


図4. 開発したレーダ用ワンチップ送受信IC — 77 GHz帯の回路はすべて正負の振幅を持つ信号を扱う差動構成とし、電源・基準電圧配線による性能劣化を回避している。

One-chip transceiver IC for millimeter-wave radar

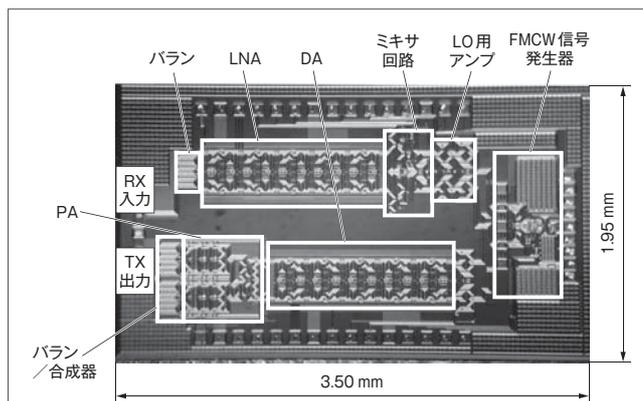


図5. レーダ用ワンチップ送受信ICチップ — 各回路には半導体基板に対しシールド構造になっているオンチップ伝送線路を使用しており、同一チップ上に存在するPAなどからの信号漏えいを低減している。

Chip micrograph of one-chip transceiver IC for millimeter-wave radar

これらの回路ブロックの多くはミリ波信号を扱うことから、半導体基板の損失やIC内配線の影響が顕著となり、特性が劣化する問題がある。また、レーダ送受信器は送信器と受信器が同時に動作することから、送信信号が受信器に漏れ込むことによる特性劣化も発生する。

そこで、正負の振幅を持つ信号を扱う差動構成を採用することで、ミリ波での基準電圧が回路ブロック内部に発生する効果により、配線による性能劣化を回避している⁽²⁾。また、半導体基板に対しシールド構造となっているオンチップ伝送線路が信号伝達や負荷に使用されており、半導体による損失及び送信器からの信号の漏えいを低減している。

77 GHz帯LNAは、必要な電力利得を得るためにアンプ回路を5段重ねた構成を取っている。前述のようにLNAは差動構成となっている。レーダ用途に適したビーム直進性の良い高利得アンテナは一般的に単相入出力であるため、アンテナからICに入力した単相信号は伝送線路を用いたオンチップ差動-同相変換器(バラン)により差動信号に変換される。ミキサ回路はダブルバランス型トポロジーで構成され、低消費電力化のため低電圧のLO信号でも動作可能な手法を採用した⁽²⁾。

PAは、高出力を得るとともに、出力の差動信号をアンテナ向けの単相信号に変換するため、2系統の差動アンプとオンチップバランによって二つのアンプ出力パワーの合成と差動-単相変換を同時に行い、損失を最小限に抑えている⁽³⁾。

FMCW信号発生器の出力信号は送信器と受信器に分配されるが、その際の損失や実装面積を最小限にするため、伝送線路によるシンプルな分配器を採用した。

3 評価結果

試作したレーダ用送受信ICの顕微鏡写真を図5に示す。このICは90 nm CMOS技術を使用しており、入出力パッドを含めたチップサイズは3.50(横)×1.95(縦)mmである。図6

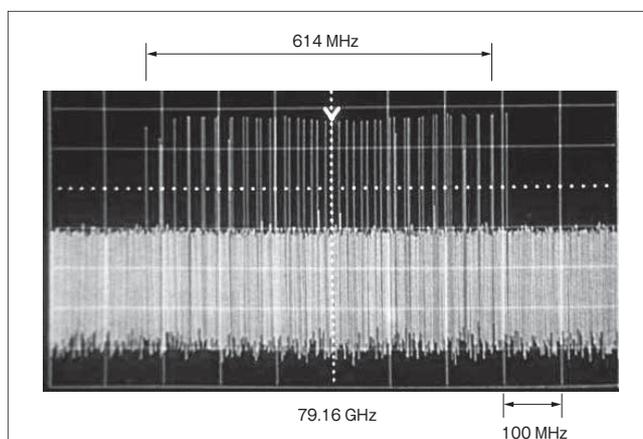


図6. 送信器出力信号のスペクトル — 77 GHz帯で614 MHzの帯域を持ったFMCW信号の発生に成功した。

Spectrum of transmitter output signal

に示すICの送信器出力信号のスペクトルから、77 GHz帯で614 MHzの帯域を持ったFMCW信号が出力されていることがわかる。出力信号周波数の時間変化を図7に示す。三角波状のFMCW信号の生成に成功しており、DDFSによる周波数誤差は約92 kHzであることから、100 mの距離の対象物に対し約1 mの測距精度を実現できる。

このICの送受信端子にホーンアンテナを接続して送信器から電波を放射し、2.8 mの距離にある対象物からの反射波を受信した際の受信信号スペクトルを図8に示す。距離2.8 mに対応したビート信号は46 kHzで、測距に成功しており、前述のDDFS非線形性によって発生するスプリアスはフロアノイズ以下に抑圧されている。また、金属製の反射板までの距離を1~8 mの間で変化させてレーダ測距した結果、誤差1%以内で測距できている(図9)。

開発したICの評価結果を表1に示す。これらの測定結果を

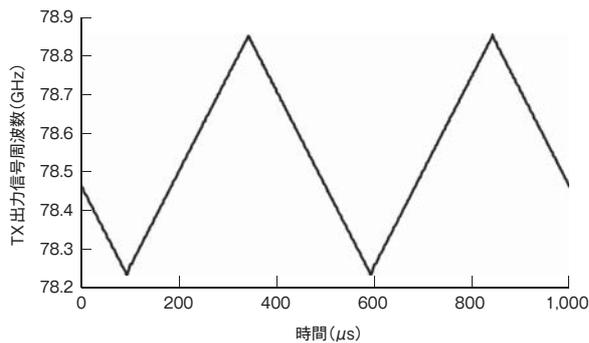
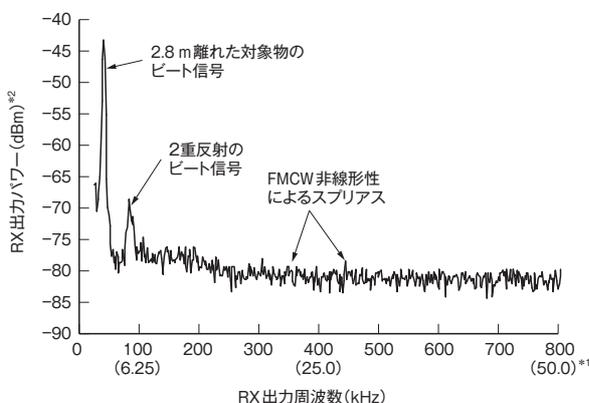


図7. 出力信号周波数の時間変化 — 77 GHz帯で三角波状のFMCW信号を生成することに成功した。

Time variation of output signal frequency



*1: RX出力周波数に対応するレーダ送受信器と対象物間の距離 (m)
*2: 測定系の損失を含む

図8. 対象物から反射した受信信号のスペクトル — 2.8 m離れた対象物で反射された信号の受信信号スペクトルから、その距離に対応したビート信号が得られており、正確な測距に成功した。

Spectrum of received signal reflected from fixed target

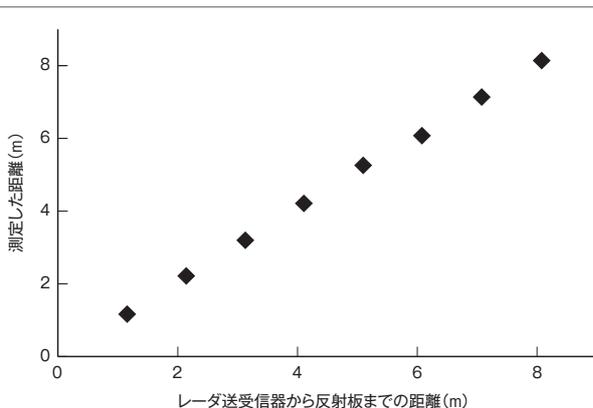


図9. 距離を変化させた対象物に対する測距結果 — レーダ送受信器から金属製の反射板までの距離を1 mから8 mに変化させて距離測定を行った結果、その誤差は1%以内であった。

Results of radar ranging experiments at target distances from 1 m to 8 m

表1. レーダ用ワンチップ送受信ICの評価結果

Results of evaluation of one-chip transceiver IC for millimeter-wave radar

項目		値
PLL	出力周波数 (GHz)	78.1~78.8
	出力パワー (dBm)	-13
	位相雑音 (1 MHzオフセット) (dBc/Hz)	-85
	消費電力 (1.2 V電源) (mW)	101
送信器	出力パワー (dBm)	-2.8
	利得 (dB)	14
	消費電力 (1.2 V電源) (mW)	305
受信器	利得 (dB)	23.1
	雑音指数 (dB)	15.6
	消費電力 (1.2 V電源) (mW)	111

基に見積もった結果、反射断面積が10 m²である対象物に対して最大約107 mの位置で1 mの距離分解能の測距ができる。

4 あとがき

当社は、77 GHz帯の高精度なFMCW信号を発生できる、CMOS技術を用いた世界初のミリ波レーダ用のワンチップ送受信ICを開発した。その評価結果から、レーダ送受信器として測距に必要な基本性能が得られていることを確認した。

今後はいっそうの集積化と高機能化を実現し、コストパフォーマンスの良い民生用ミリ波レーダを実現することで、安全で安心な社会の実現に貢献していく。

文献

- Piper, S. O., et al. "Homodyne FMCW radar range resolution effects with sinusoidal nonlinearities in the frequency sweep". Proc. IEEE International Radar Conference. Alexandria, VA, USA, 1995-05, IEEE, 1995, p.563 - 567.
- Mitomo, T., et al. A 60-GHz CMOS Receiver Front-End With Frequency Synthesizer. IEEE J. Solid-State Circuits. **43**, 4, 2008, p.1030 - 1037.
- Yoshihara, Y., et al. "A 60-GHz CMOS Power Amplifier with Marchand Balun-based Parallel Power Combiner". Proc. IEEE Asian solid-state circuits conference. Fukuoka, Japan, 2008-11, IEEE, 2008, p.121 - 124.



三友 敏也 MITOMO Toshiya

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー研究主務。無線通信向け高周波アナログICの研究・開発に従事。電子情報通信学会, IEEE会員。

Wireless System Lab.



星野 洋昭 HOSHINO Hiroaki

研究開発センター ワイヤレスシステムラボラトリー。無線通信向け高周波アナログICの研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。

Wireless System Lab.