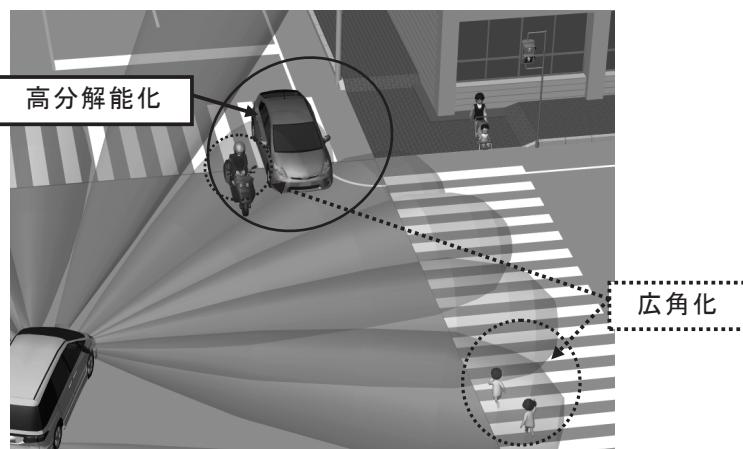


RF CMOS技術を活用した高性能レーダ開発の取り組み

Effects to develop a high-performance millimeter-wave radar with RF CMOS technology

沖 田 靖 能 Yasuyoshi OKITA
菅 井 清 和 Kiyokazu SUGAI
浜 田 和 亮 Kazuaki HAMADA
大 橋 洋 二 Yoji OHASHI
関 哲 生 Tetsuo SEKI



要 旨

当社では、交通情報や人、外界、自車、運転の状況をセンシングし「普段との違い」や「起きうる事象」を分析することを目的とした「**Future Link.**」の実現を目指している。「**Future Link.**」で用いる外界センサは、全天候で、車両の周囲環境を正確に検知することが必要である。そこで、当社では、微細化の進歩により、動作性能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CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術に着目し、ミリ波レーダの開発を進めている。本稿では、近接する自動車と歩行者を分離して検知するための距離分解能の高分解能化や、車両全周囲を検知するための広角化などCMOS技術を用いた取り組みについて報告する。当社では、CMOS技術を用いたミリ波レーダの高機能化を進め、「**Future Link.**」が目指す、クルマ社会の実現に貢献していきたい。

Abstract

We are aiming for the realization of a "**Future Link.**" for analyzing "unusual driving situations" and "possible events" by sensing traffic information, a pedestrian, an external environment of vehicles, a host vehicle, and a driving status. The sensors for the "**Future Link.**" need to detect the surrounding environment of the vehicle in all weathers accurately. Then we are developing the millimeter-wave radar focused on the RF CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) technology which can handle the millimeter-wave signal because of the enhancement of miniaturize process technology and the speed-up of its operational frequency. This paper reports the effects of achieving the highly distance resolution for detecting the adjacent targets such as vehicles and pedestrians separately and the wider FOV (Field of view) for detecting the all objects around the vehicle. We will contribute a vehicle society, which is the objective of the "**Future Link.**", by enhancing the performances of the millimeter-wave radar with the RF CMOS technology.

1

はじめに

当社では、交通情報や人、外界、自車、運転の状況をセンシングし、センシング結果を組合せ、「普段との違い」や「起きうる事象」を分析することを目的としたつながるサービス「Future Link.」の実現を目指している。

「Future Link.」の活用により、例えば、渋滞や危険を先読みし、ドライバに行動を促すような情報を提供することが可能となる。危険を先読みするためには、外界センサにより、全天候で、車両の周囲環境を正確に検知することが必要である。当社では、外界センサとして、霧など視界の悪い状況下でもターゲットの検知が可能であるミリ波レーダの製品化を行っている¹⁾。しかし、現在のミリ波レーダの検知対象は主に、前方の自動車であり、正確に周囲環境を把握するためには、近接する自動車と歩行者を分離して検知するための距離分解能の高精度化や、車両全周囲を検知するための広角化などの高機能化が必要不可欠である。

ミリ波レーダは、主に高周波信号を送受信する回路であるMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) と信号処理回路、制御回路で構成されるが、なかでも、MMICは、ミリ波レーダの性能・コストを大きく左右する。これまで、高周波性能に優れたGaAs (ガリウムヒ素) やSiGe (シリコンゲルマニウム) の半導体技術を用いたMMICを用いることが一般的であったが、コスト高であった。一方、CPUやメモリで用いられているCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術は、微細化の進歩により、動作性能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。図1に汎用的に生産または開発されているSi系プロセス用デバイスの指標である周波数性能指数Ft、Fmaxと低雑音指数NFminをプロットしたものを示す²⁾。

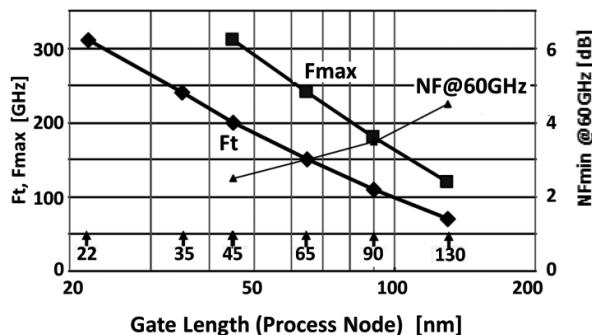


図1 Si CMOSプロセスのデバイス性能
Fig.1 Device Performances of the Conventional Si-CMOS Process

また、CMOS技術は、低コスト、低消費電力、デジタル回路との親和性が良いという特徴があり、GaAsやSiGe技術より安価で集積化に向いた技術である。

当社では、CMOS技術に着目し、ミリ波レーダの高機能化を進めている。本稿では、CMOS技術を用いた、ミリ波レーダの広角化と高分解能化への取り組みについて報告する。

2

CMOS MMICの動向と期待

無線通信用MMICはSi系デバイスの性能向上により携帯電話、無線LANなどの比較的低い周波数帯、低出力電力向けにはCMOS技術を用いたデバイスが主力となっている。また、これらCMOS技術はRF部の機能回路のみならず、変復調部やベースバンド信号処理部、制御回路を一つのデバイス内に構成するシステムオンチップ化が進んでいる。一方、ミリ波帯においても最先端のプロセス適用によりRF部の高性能化が進んでいる。ミリ波帯MMICも低周波数帯と同様に低出力電力を扱う応用分野において、今後もCMOS化が加速していく可能性がある。

図2にミリ波レーダのブロック図を示す。現在のミリ波レーダは、トランシーバ (TX) MMICとレシーバ (RX) MMICとその制御回路が、別々のチップで構成されている。このMMIC (図2:点線部分) にデジタル回路との親和性が高いCMOS技術を用いることにより、MMICと制御回路や温度センサなどの各種センサ類を混載できる。これにより、自動的に出力電力などを自己補正するなど、送受信器を高精度に制御することができ、高周波性能の向上、高機能化が期待できる。

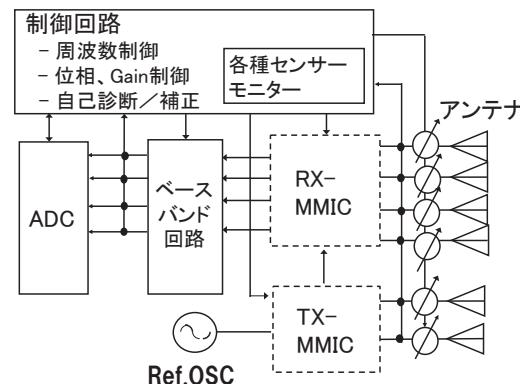


図2 ミリ波レーダのブロック図
Fig.2 Block Diagram of the Proposed Millimeter-Wave Radar

3

CMOS技術を用いたミリ波レーダの課題

表1に従来の半導体SiGe、GaAs技術と、CMOS技術とを比較した結果を示す。CMOS技術は、高集積性の他、消費電力にも優れている。

このようにCMOS技術を用いてMMICを開発することで、ミリ波レーダの高機能化が期待できる半面、高周波特性が実用レベルに達しているかが懸念される。また、世の中にはCMOS技術を用いたミリ波レーダの開発事例

が少ない。

そこで、当社では、次のステップでCMOS技術による高機能化の効果を確認することにした。

Step1では、CMOS技術を活用した要素回路の開発により、高機能化の実現性を確認する。

Step2では、トランシーバMMICを開発し、従来のSiGeなどを用いた半導体技術と比較してMMICとしての実現性を確認する。

表1 半導体技術の比較表

Table 1 Comparisons of the Semiconductor Technology

	CMOS	SiGe	GaAs
消費電力	◎	○	△
高速性	◎	○	○
出力電力	○	○	○
集積度	◎	○	△
コスト	○	○	△

4

高機能化に向けた取り組み

4.1 広角化を実現するCMOS回路

Step1として、ミリ波レーダの検出範囲広角化をターゲットとして、CMOS技術を用いた回路開発を実施した。今回、ミリ波レーダの広角化を実現するためAPA (Active Phased Array) 方式での回路開発を行った。図3に、送信 APA (Active Phased Array) 方式に対応したレーダの構成図を示す⁶⁾。APA方式では、各送信チャンネルに搭載された移相器により、位相合成によるビームの狭角化、およびビーム走査が可能となる。広い指向性をもつアンテナからの信号をデジタル信号処理することにより到来方向を推定する、DBF (Digital Beam Forming) 方式と比較して、APA方式では、狭角ビームを発生、走査させることで単ビーム辺りの利得が向上するため、広角化が可能となる。

今回開発したCMOS回路である、移相器のブロック図を図4に⁵⁾、DACによる移相器の評価結果（位相設定可能範囲）を図5に示す⁷⁾。

移相器は一つの90degハイブリッド、二つのシングル入力-差動出力アンプ、四つの出力可変アンプ（VGA）からなる。四つのVGAにはそれぞれ90degずつ位相がずれた信号が入力され、このうち2信号を選択することにより、ベクトル合成を行い、所望の位相情報を持つ信号を得る。各VGAはデジタルアナログ変換機（DAC）に接続されており、これによりゲートバイアス電圧、2信号の出力電力を高精度に設定することを可能とした。また、図5の評価結果は、74GHzから82GHzの広い周波数帯域に渡り、±180degの全範囲で位相を設定することができる、およびリニアリティに優れていることを示しており、これにより高

精度な位相制御ができ、APA方式のビーム走査が可能となる。

位相差/振幅差検出ミキサの構成を図6に示す。位相差/振幅差検出ミキサは、送信もしくは受信チャンネル間に搭載されるもので、チャンネル間の位相/振幅のずれ量の検出を可能とする回路である。この回路は二つのミキサと、遅延回路からなり、入力する信号の位相差に応じて図6のA、Bそれぞれに電圧V_A、V_Bが outputされる。これら電圧の和と差を実施した結果を図7-1、図7-2に示す。ここで、電圧の和と差の感度最大点は0deg、+90deg、180deg、-90deg、となるため、図7-1、図7-2の楕円部分の位相誤差が最小となる。今回、この位相誤差が最小となる長丸部分を選択（電圧の和と差のいずれかを選択）することにより、検知誤差3deg以下と、高精度に位相差検出できることを確認した（図8）。

これらのCMOS回路により、図3に示すAPA方式が構成可能となり、ミリ波レーダの検出範囲の広角が実現できる。さらに、これらCMOS回路を制御するロジック回路と混載していくことで、各チャンネルの位相を高精度に検出し、瞬時に補正を行うことが可能となり、APA方式の更なる高性能化が期待できる。

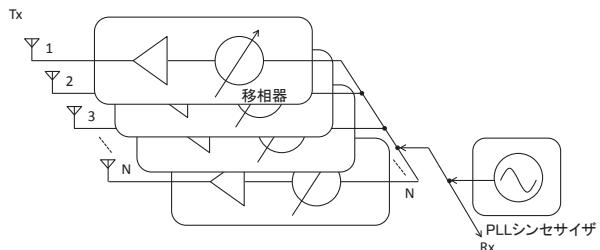


図3 送信APAレーダの構成⁶⁾

Fig.3 Configuration of the Tx APA Radar

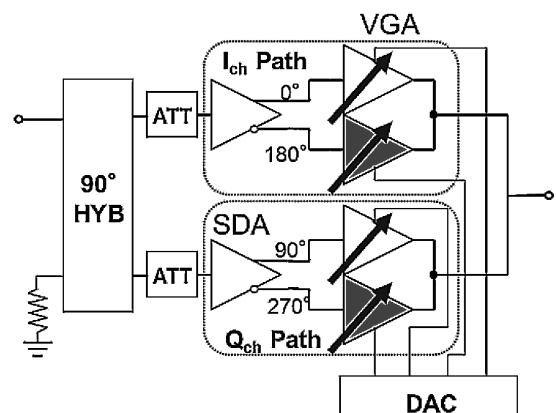


図4 移相器のブロック図

Fig.4 Block Diagram of the Phase Shifter Using a Vector Combining Technique

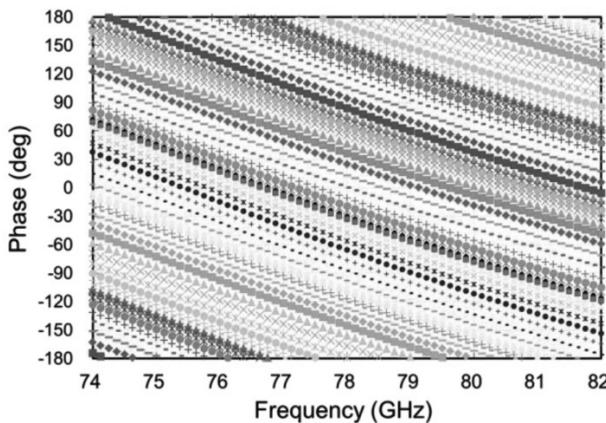


図5 移相器の評価結果（位相設定可能範囲）

Fig.5 Measured Phase Variation of the Phase Shifter.
The Phase Shifter Achieves 360-degree Phase Variation.

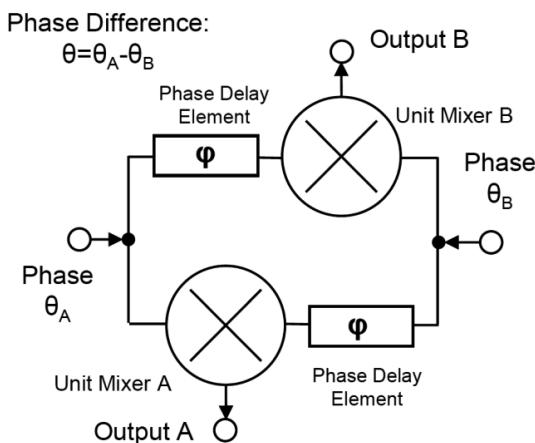


図6 位相差/振幅差検出ミキサの構成

Fig.6 Configuration of the Phase and Power Difference Detection Mixer

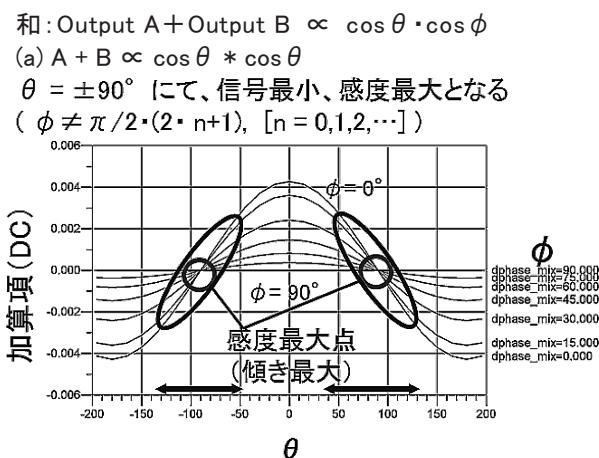


図7-1 位相差検出ミキサ出力（電圧の和）

Fig.7-1 Phase Difference Detection Mixer Output (Sum of Voltage)

差: Output A - Output B $\propto \sin \theta \cdot \sin \phi$
(b) $A - B \propto \sin \theta * \sin \theta$
 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ にて、信号最小、感度最大となる
($\phi \neq \pi \cdot n$, $[n = 0, 1, 2, \dots]$)

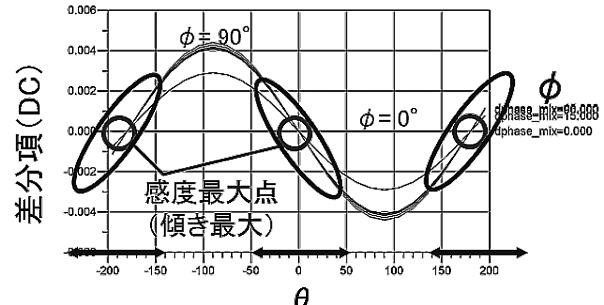


図7-2 位相差検出ミキサ出力（電圧の差）

Fig.7-2 Measured and Calculated Outputs of the Phase Difference Detection Mixer

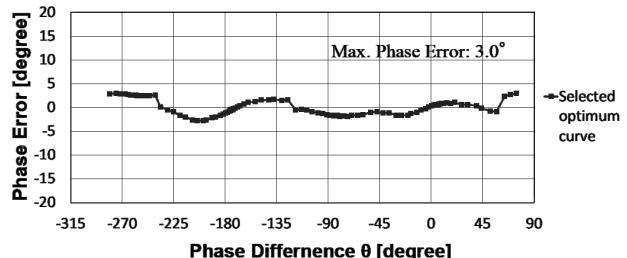


図8 位相差/振幅差検出ミキサの評価結果（位相差の検出精度）⁷⁾
Fig.8 Measured Phase Difference Detection Performance

4.2 CMOSトランシーバMMIC

Step2として、CMOS技術を用いたレーダ用トランシーバMMICの開発を行った。MMICは、従来の当社SiGeトランシーバ仕様に合わせて、送信器Tx MMICと受信器Rx MMICで構成した。

開発したTx MMICとRx MMICのブロック図を図9、図10に示す。また、図11にMMICの写真を示す³⁾。Tx MMICは、マルチチャンネル出力(Tx1, Tx2)を可能として、パワーアンプ(PA)、ドライブアンプ(DA)および信号生成用の位同期回路(PLL)、Local部から構成される。Rx MMICは、マルチチャンネル入力(Rx1からRx4)が可能であり、低雑音増幅器(LNA)、DA、ミキサ(MIX)から構成する。

今回、CMOS技術により開発したMMICと、従来の当社SiGe MMICとの特性を比較することで、MMICとしての性能課題の抽出を行った。表2にCMOS MMICの諸特性を示す。

表2の結果は、CMOS MMICが、従来のSiGeと同等の性能を得ていることを示しており、ミリ波レーダ用MMICにCMOS技術を活用可能であることが確認できた。また、出力電力や雑音特性も、ミリ波レーダ用MMICとしては十分

な値を確認した。

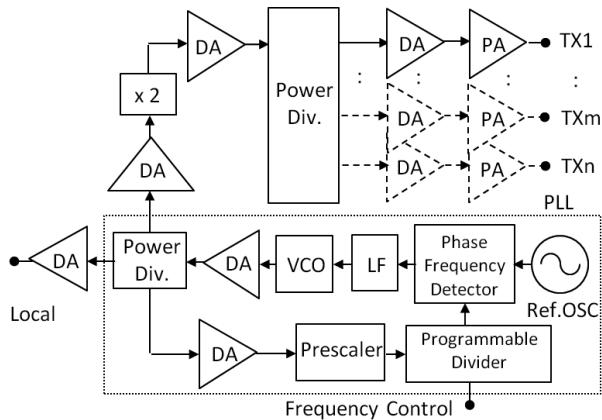


図9 Tx MMICのブロック図
Fig.9 Block Diagram of Tx MMIC

表2 CMOSおよびSiGe MMICの諸特性
Table 2 Characteristics of CMOS MMIC

Tx	Frequency (GHz)	76-81
	Output Power (dBm)	10
	Phase Noise (dBc/Hz)	-84
	Power Consumption (W)	0.75
Rx	Frequency (GHz)	76-81
	Conversion Gain (dB)	20
	Noise Figure @100kHz offset (dB)	12
	Power Consumption (W)	0.5

4.3 CMOS技術を用いた高分解能化の取組み

Step2で開発したCMOS Tx MMICとRx MMICを用いて、高分解能化の評価を行った。

ミリ波レーダの距離分解能はその変調方式によってその性能が決まつくる。変調方式には、FMCW (Frequency Modulated Continious Wave) 方式、パルス方式などがあり、この選択によって距離、相対速度検出の方法、得られる性能や、システム構成が変わつくる。

今回開発したMMICは、当社で実績のあるFMCW方式へ対応しており、FMCW方式を採用したミリ波レーダの距離分解能 ΔR は、次式で表される。

$$\Delta R = A \frac{c}{2\Delta F}$$

ここで、 c は光速、 ΔF は変調周波数帯域幅、 A は窓関数や信号処理の影響など、距離分解能を劣化させる要因を係数化したものであり、 ΔF を大きくとるほど高分解能化が可能である。今回試作したTx MMICの周波数変調帯域は、従来の76-77GHz帯に加え、高分解能化を実現する広帯域変調方式に対応するため、78-81GHz帯にも対応させて開発を行つた。この際、RF高周波回路のみならず、高速デジタル回路の制御とチューニングにより、高分解能化へ対応させた⁴⁾。図12にTx MMICのトランジェント特性を示す。この結果から変調帯域を広帯域にした場合でも線形に周波数スイープしており、高分解能方式への応用が可能であることを確認した。図13に中心周波数79GHz、変調帯域幅3GHzとしたときの送信スペクトラムを示す。この結果から3GHzと広帯域に変調送出した場合でも所望の送信スペクトラムが得られていることを確認した。

ここで、このMMICを送受信器として組み上げ、これを用い、距離30m付近にターゲット（コーナリフレクタ）を設置して、隣接した二つのターゲットからの反射を受信してビート周波数信号から距離分解能を計測した。このとき、高分解能方式に対応させた場合の距離分解能向上効果を確認するため、変調帯域幅480MHzと、3GHzに設定し

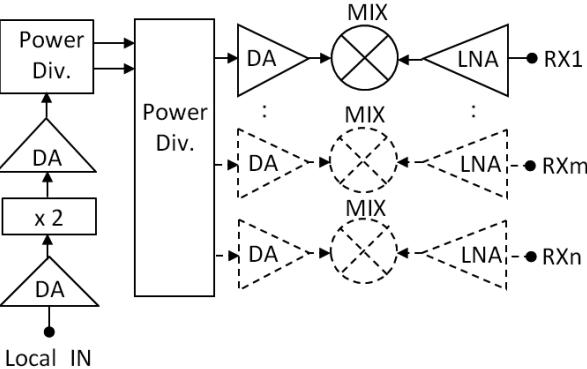
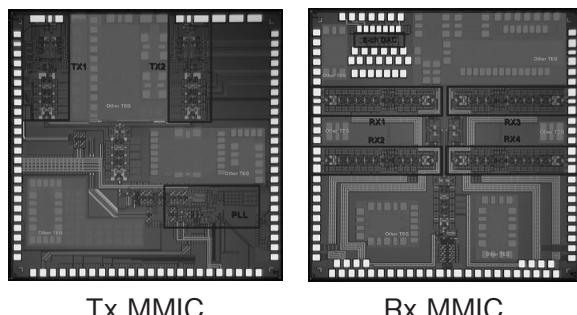


図10 Rx MMICのブロック図
Fig.10 Block Diagram of Rx MMIC



て距離分解能の計測を行った。測定結果を図14に示す。変調帯域幅を480MHzに設定した場合（図14-1）は、二つのターゲット間の距離 $\Delta R=1.2m$ 程度まで分離できるのにに対し、高分解能方式の場合（図14-2）は $\Delta R=0.2m$ まで接近しても分離して検知することができた。この結果から、例えば、接近した自動車と歩行者や歩行者同士の検知も可能であり、CMOS技術により高分解能化を確認できた。

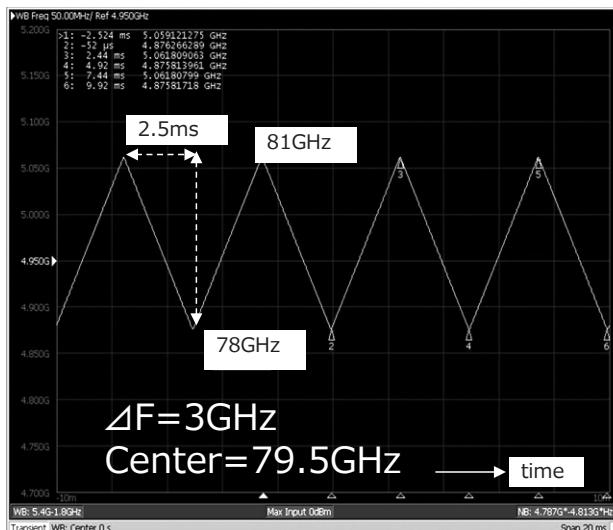


図12 トランジエントレスポンス

Fig.12 Measured Transient Response of the Transmitter

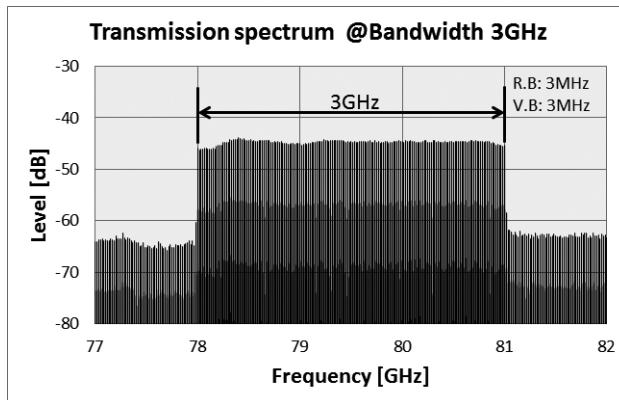


図13 変調帯域幅3GHz時の送信スペクトラム特性

Fig.13 Measured Transmission Spectrum at 3GHz of Modulation Bandwidth

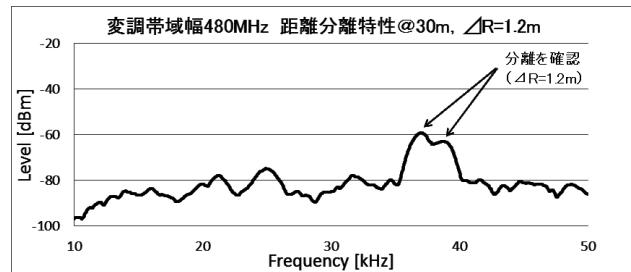


図14-1 距離分離特性

($\Delta R=1.2m$ 、変調帯域幅480MHz)

Fig.14-1 Characteristics of Distance Separation

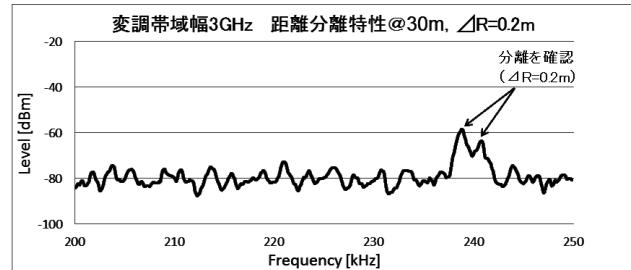
(a) $\Delta R=1.2m$ 、 $\Delta F=480MHz$ 

図14-2 距離分離特性

($\Delta R=0.2m$ 、変調帯域幅3GHz)

Fig.14-2 Characteristics of Distance Separation

(b) $\Delta R=0.2m$ 、 $\Delta F=3GHz$

5 CMOS技術による高機能化のまとめ

ミリ波レーダの高機能化を目的として、CMOS技術に着目してMMICやCMOS回路の開発を実施したことにより、以下を確認することが出来た。

- ① CMOS技術を用いてトランシーバMMICを開発した。結果として、CMOS技術を用いることでも従来のSiGeなどを用いたMMICに迫る特性を得られることが確認できた。
- ② 広帯域変調に対応したCMOS MMICおよびこれを搭載した送受信器を開発し、評価を実施した。評価結果から、CMOS技術を用いることでも高分解能化方式が実現可能であることを確認した。
- ③ CMOS回路として、移相器、位相差検出ミキサを試作し、その回路動作を確認した。これにより、検知範囲の広角化を実現するレーダ方式の一例として、CMOS技術により、APA方式を実現可能であることを確認した。今後は、広角化を実現するCMOS回路を搭載したトランシーバMMIC、またそれを搭載したレーダ開発により、APA方式に対応したレーダの実現性を確認していく予定である。

6

おわりに

本論では、CMOS技術を活用したミリ波レーダの高機能化の取り組みについて報告した。我々はCMOS技術を用いたミリ波レーダの高機能化を進め、「**Future Link.**」が目指す、クルマ社会の実現に貢献していきたい。

Future Link®は、富士通テン株式会社の登録商標です。記載した製品名などの固有名詞は、各社の商標または登録商標です。

参考文献

- 1) 60GHz帯自動車用ミリ波レーダ（富士通テン技法 vol.15, No.2）
- 2) 電子情報通信学会『知識の森 第10群 集積回路 7編 モノリシックマイクロ波集積回路』(<http://www.ieice-hbkb.org/>)
- 3) Kiyokazu Sugai, Kazuaki Hamada, "MILLIMETER-WAVE MULTI-CHANNEL ELECTRONIC SCAN RADAR IN 65-nm CMOS TECHNOLOGY", ITS-WC 2014
- 4) Hiroshi Matsumura, et al., "Novel Millimeter-wave PLL Synthesizer with Cascaded Phase Detectors", The 8th European Microwave Integrated Circuits Conference 2013
- 5) S. Pacheco, R. Reuter, S. Trotta, D. Salle and J. John, "SiGe Technology and Circuits for Automotive Radar Applications." Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2011 IEEE 11th Topical Meeting on, pp.141-144, 17-19 Jan. 2011.
- 6) Toshihiro shimura, et al., "A 76-81 GHz Active Phase Shifter for Phased Array", The 8th European Microwave Integrated Circuits Conference 2013
- 7) Toshihiro shimura, et al., "Phase and Power Difference Detection Technique using Symmetric Mixer with Input Level Switching for Millimeter-wave Phased-Array Calibration", International Microwave Symposium (IMS) 2015

筆者紹介



沖田 靖能
(おきた やすよし)

AS技術本部
レーダ技術室
技術開発チーム



菅井 清和
(すがい きよかず)

AS技術本部
レーダ技術室
技術開発チーム



浜田 和亮
(はまだ かずあき)

AS技術本部
レーダ技術室
技術開発チーム



大橋 洋二
(おおはし ようじ)

(株)富士通研究所
ワイヤレス基盤PJ



関 哲生
(せき てつお)

AS技術本部
センシングシステム開発室