

# 高分解能路側設置レーダー用RFモジュール

Radio Frequency Module for High-Resolution Infrastructure Radars

姉川 修\*  
Osamu Anegawa

大塚 晃  
Akira Otsuka

川崎 健  
Takeshi Kawasaki

塚島 光路  
Koji Tsukashima

久保田 幹  
Miki Kubota

中林 隆志  
Takashi Nakabayashi

路側設置レーダー用に76GHz帯トランシーバーであるRFモジュールを開発した。本研究では、小型化・低コスト化に有利な、当社独自の技術である3-Dimensional Wafer Level Chip Size Package (3-D WLCSP) を用い、76GHz帯のチップセット (送信用周波数変換器、受信用周波数変換器、高出力増幅器) を開発した。開発したチップセットをPCB<sup>\*1</sup>に搭載することで、20×34.5mm<sup>2</sup>の小型RFモジュールを作製し、電波法 (送信電力、不要波電力等) に適合し、レーダーシステムから要求されるRF特性 (雑音指数、ポート間アイソレーション等) を実現した。

We have developed a radio frequency module for 76-GHz band infrastructure radars. In this work, we built a chip set consisting of a transmitter, receiver, and power amplifier by using our 3-D Wafer Level Chip Size Package technology that allows for miniaturization and cost saving, and mounted it to a printed circuit board. The module is as small as 20 × 34.5 mm<sup>2</sup> in compliance with the standard set by Association of Radio Industries and Business, and meets performance requirements for radar applications.

キーワード：76GHz帯トランシーバー、WLCSP、RFデバイス、RFモジュール

## 1. 緒 言

近年、交通事故の撲滅に向けて、各種レーダーが盛んに開発、製品化されている。中でもミリ波レーダーは全天候性 (雨、雪、濃霧の影響) と分解能に優れているため、衝突防止用のレーダーとして注目されている。現在、ミリ波レーダーの使用帯域は76~77GHzに加え、77~81GHzの帯域も割り当てが進められている。ミリ波製品が普及するためには、安価なデバイスの開発が鍵となる。

当グループでは、3次元多層配線と半田ボールを有するRFデバイスを、パッケージを用いずに直接基板上に実装することで、小型化・低コストを実現するWLCSP技術を開発してきた<sup>(1)~(4)</sup>。本研究では、この技術をミリ波帯に適用し、RFデバイスを試作し、モジュール用に設計したPCBに実装することで、サイズ20mm×34.5mmの76~81GHz小型トランシーバー (RFモジュール) を開発した。以下では、開発したチップセット、PCB、RFモジュールについて報告する。

により、送信ポートから出た信号を前方に放射し、反射を4つのアンテナで受けることで、反射してきた方向を検知できる。

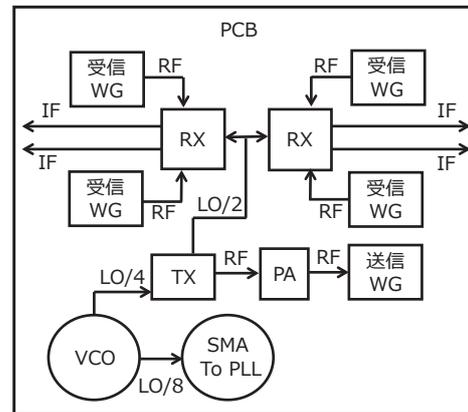


図1 RFモジュールのブロック図

## 2. 開発目標

開発するRFモジュールはアンテナを除くミリ波部分を構成する。レーダーシステム的设计要求から決定したRFモジュールのブロック図を図1に示す。RFモジュールは、導波管 (WG) ポートを5つ (送信1、受信4) 有し、PCB上に発振器VCO、送信用周波数変換器TX、受信用周波数変換器RX、高出力増幅器PAを搭載した構成である。本構成

レーダーシステム的设计要求から決定したRFモジュールの主な目標仕様を表1に示す。ARIB standard<sup>\*2</sup>に適合するため、不要波電力には十分マージンを取る必要がある。

以下では、RFモジュールの仕様を基に設計試作したRFデバイス、PCB、RFモジュールについて述べる。

表1 RFモジュールの目標仕様

項目	Min.	Typ.	Max.	単位
送信電力	4.8	10	11.7	dBm
送信利得		10		dB
不要波電力			-15	dBm
受信利得	5	8		dB
受信NF		7	9	dB
送受信間アイソレーション	40	60		dB
受信ポート間アイソレーション	20	40		dB

### 3. RFデバイスの開発

主要なRFデバイスにはWLCSP技術を適用した。WLCSP構造は、パッケージが不要で小型化に適している。また、格子状で搭載された半田ボールにより、リフロー工程で実装できる。ここではRFモジュールの目標仕様を基に設計した主要なRFデバイスの試作結果を示す。

#### 3-1 送信用周波数変換器

送信用周波数変換器から放出される信号は、レーダーに必要なRF信号以外にも不要に発射されるローカル信号とイメージ信号がある。図2にRF信号と主な不要発射の関係を示す。RF信号はローカル信号とIntermediate Frequency (IF) 信号の周波数和の成分として生成され、同時にローカル信号とIF信号の周波数差の成分としてイメージ信号が生成される。また、ローカル信号は漏洩して不要波として出力される。ARIB standardの規格で不要波の漏洩電力はRF信号の0.5%以下 (23dBc以上) にする必要がある。表1では、マージンを考慮し、送信電力10dBmに対し、不要波電力を-15dBm以下 (25dBc以上) としている。

図3に試作した送信用周波数変換器のブロック図を示す。送信用周波数変換器は19GHz帯ローカルアンプ、2通倍器、38GHz帯ローカルアンプ、ダブルバランス型高調波ミキサで構成される。入力された19GHz帯のローカル信号は2通倍器で周波数を2倍にされ、高調波ミキサを駆動する。IF信号 (I+, I-, Q+, Q-) は、高調波ミキサにより76/79GHz帯のRF信号へ変換される。ダブルバランス回路では、同性能のミキサ4つに入るローカル信号とIF信号の位相関係を変え、各ミキサから出力される信号の位相関係も変えて合成している。これら位相関係を精度良く設計することで、イメージ信号とLO信号はお互いに打ち消し合うように合成され、RF信号のみが4倍に合成されて出力される。目標の25dBc以上の抑圧を実現するには、ミリ波帯で5度以下の位相精度を実現する必要がある。本研究では位相差が3度以下になるように、ライン調整の設計誤差を10um以下となるよう設計した。

図4に試作した送信用周波数変換器を示す。図4で格子状に配置された白い丸が半田ボールになる。図5はPCBに実装した送信用周波数変換器の特性を示す。IFの入力電力は0dBm、LOの入力電力は8dBmである。RFの電力-14dBm

に対してイメージとローカルの電力が30dBc以上抑圧されており、ARIB standardを十分満足する特性が得られた。

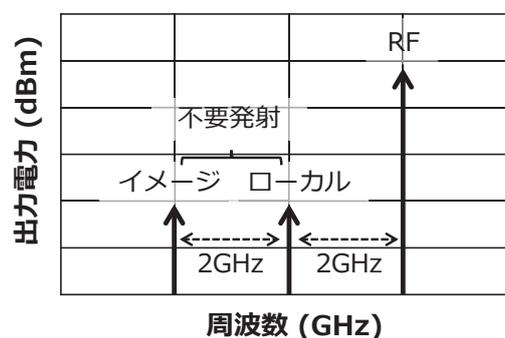


図2 送信用周波数変換器の出力信号

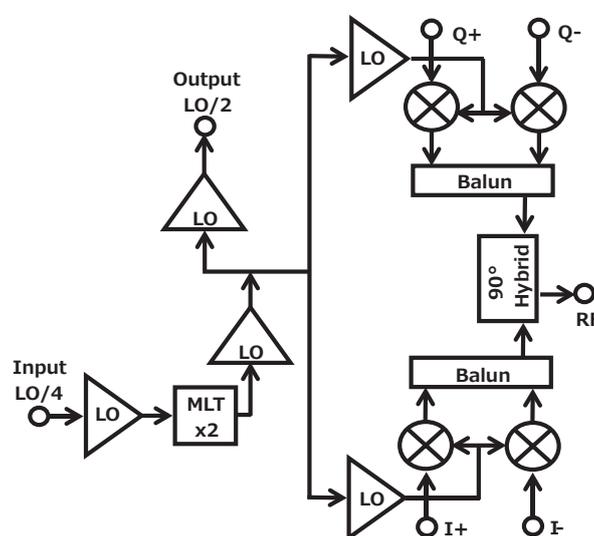


図3 送信用周波数変換器のブロック図

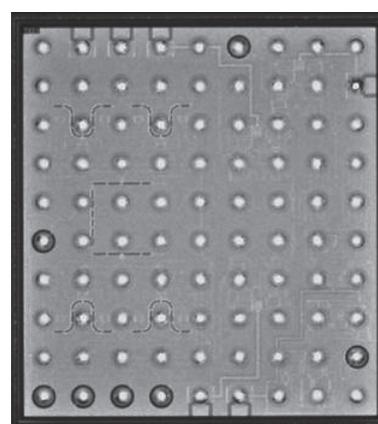


図4 送信用周波数変換器 (2.9mm×3.2mm)

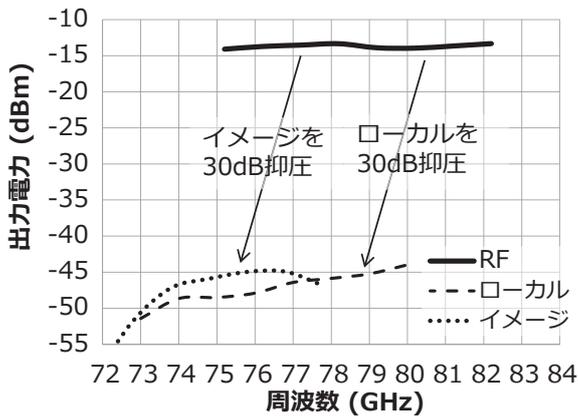


図5 送信用周波数変換器の評価結果

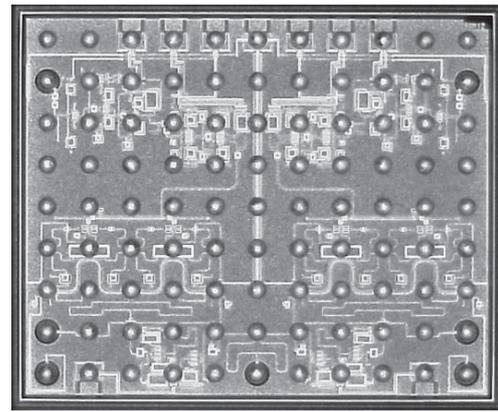


図7 受信用周波数変換器 (3.5mm×2.9mm)

### 3-2 受信用周波数変換器

受信用周波数変換器には、高い感度を得るため、低い雑音指数 (NF : Noise figure) が要求される。受信用周波数変換器では、イメージ帯域のノイズがIF帯域へ周波数変換され、NFが劣化する。このNFの劣化を防ぐため、受信用周波数変換器の構成は、送信用周波数変換器と同様にイメージ抑圧型のバランス回路を採用し、イメージ信号の周波数変換利得を抑圧している。図6に受信用周波数変換器のブロック図を示す。受信用周波数変換器は、2チャンネルの受信系を1つのデバイスに集積し、低雑音増幅器LNA、バランス型高調波ミキサ、ローカルアンプで構成される。

図7に設計した受信用周波数変換器を示す。受信用周波数変換器は左右対称で左右それぞれに1チャンネル分の回路がレイアウトされている。図8には実装した受信用周波数変換器の評価結果を示す。バランス回路の効果で、イメージの変換利得を30dBc抑圧でき、イメージがNFに影響を与えることなく、受信用周波数変換器のNFはLNAと同等の値が得られた。

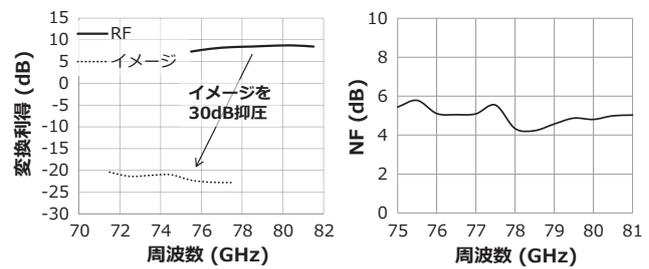


図8 受信用周波数変換器の評価結果

### 3-3 高出力増幅器

図9に高出力増幅器のブロック図を示す。高出力増幅器はカレントリユースアンプの4段構成で、電力モニタ用にディタクタを搭載している。カレントリユースアンプは2つのField Effect Transistor (FET) をカスコード接続<sup>※3</sup>したアンプで、消費電流を半分にする事ができる。電流量を半減することでDC線路を小型化している。図10に試作した高出力増幅器を示す。高周波増幅器では、右側に入力ポート、左側に出力ポート、下側にDC端子とディテクタ

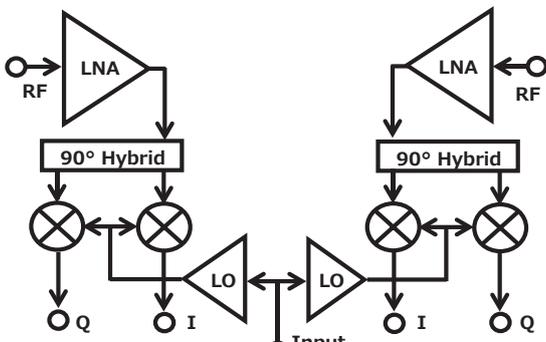


図6 受信用周波数変換器のブロック図

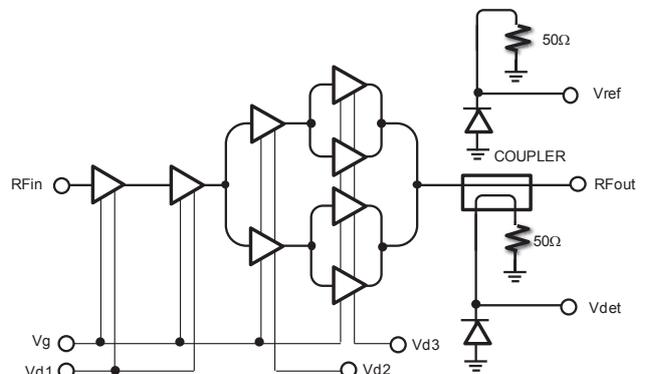


図9 高出力増幅器のブロック図

端子を配置している。図11に実装した高出力増幅器の評価結果を示す。レーダー帯域 (76~81GHz) において25dB以上の利得と、20dBm以上の飽和電力が得られた。この結果から、PCBの損失 (約1dB) 込でも、線形性の良いバックオフ領域で、送信用周波数変換器の出力を10dBmにできることが確認できた。

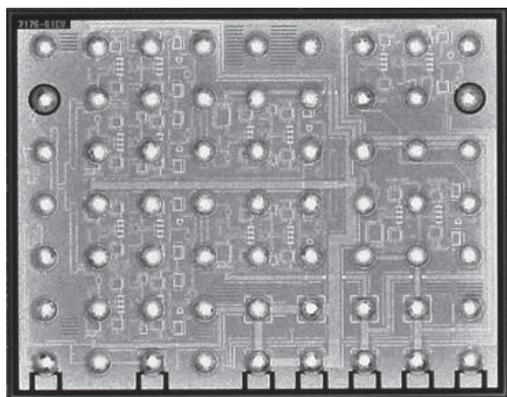


図10 高出力増幅器 (2.9mm×2.3mm)

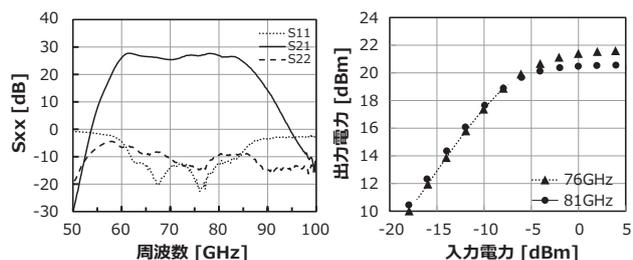


図11 高出力増幅器の評価結果

アンテナとアンテナから $\lambda/4$ 上方にバックショートを設定するだけで、低ロスにできる。図14に試作したMSL一導波管変換部の評価結果を示す。S<sub>11</sub>は、PAやアンテナへ影響を与えない-15dB以下の目標に対して、-18dB以下の良好な特性が得られた。また、S<sub>21</sub>は0.5dB程度で低ロスの特性が得られた。

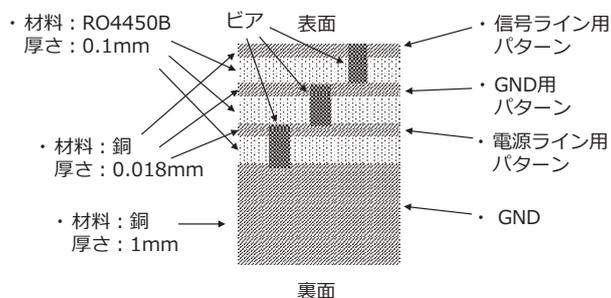


図12 PCBの層構成

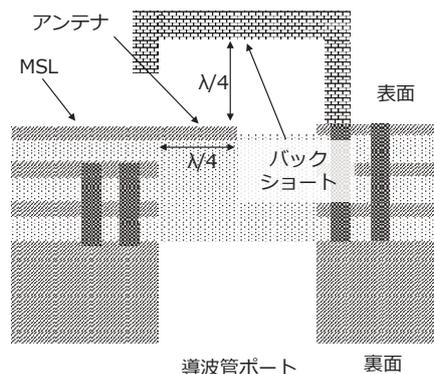


図13 導波管ポートの断面構造

#### 4. PCBの設計

RFモジュールは、PCB上にマルチチップを搭載するため、DCラインと信号ラインを多数引き回す必要がある。ミリ波帯ではパターン間で信号が結合しやすく、ラインを隣接できない。ライン間の干渉低減とPCB面積削減のため、PCBの層構成を図12の4層構造とした。ミリ波帯でロスが少ない最上層は信号ライン用の層とし、信号ラインとの干渉を低減するため、GND層を挟んで電源ライン用の層を設けている。

導波管ポートは、広帯域で変換効率の良いバックショートを用いたマイクロストリップライン (MSL) 一導波管変換構造を採用した。導波管変換部の断面構造を図13に示す。導波管変換部の通過特性は送信電力やNF特性に直接影響を与えるため、低ロスで設計する必要がある。この変換構造は、基板の上下方向に導波管構造を形成し、 $\lambda/4$ の

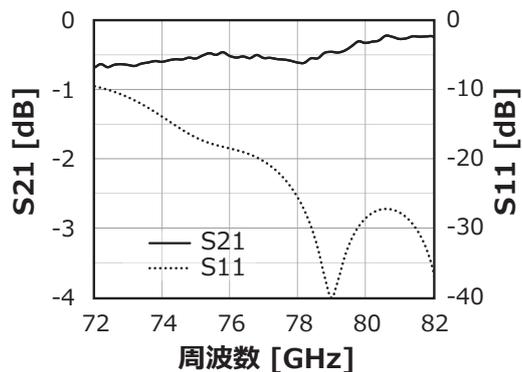
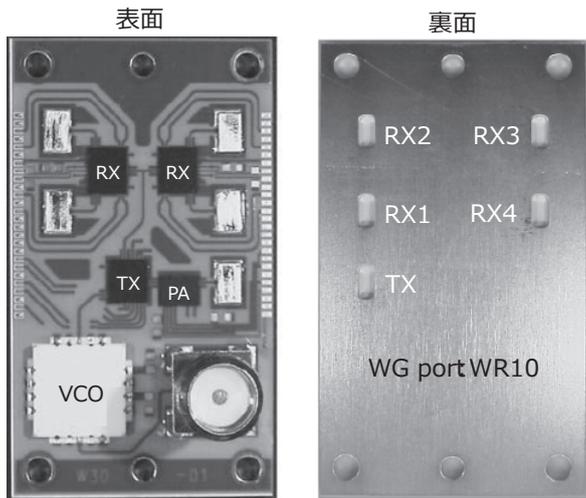


図14 導波管ポートの試作結果

## 5. RFモジュールの試作結果

試作したRFモジュールを図15に示す。RFモジュールは図1に示す構成でRFデバイス、バックショート、VCO等がPCB上に実装されている。VCOはInGaP HBTで作成したものをを使用した<sup>(5)</sup>。裏面には導波管ポート (TX: 1つ、RX: 4つ) を配置している。RFモジュールのサイズは、WLCSPを採用することで、20mm×34.5mmに小型化できた。



Size : 20mm × 34.5mm

図15 試作したRFモジュール

RFモジュールの送信特性を図16に示す。RF出力は規定の10dBmが得られた。また、イメージ、ローカルの出力は-20dBm程度で不要波の規格を十分満足した。図17は受信特性を示している。変換利得が9dBで、NFは6dBと、設計通りの結果が得られた。図18はアイソレーション特性を示している。送受信間アイソレーションは、送信信号が導波管ポートを経由しないで受信する信号の減衰量を示しており、この値が低いとレーダーで受信した信号がモニタできなくなる。今回、送受信間アイソレーションは40dB以上で目標の特性が得られた。受信ポート間アイソレーションは、異なるRXポートに入った信号を受信する減衰量を示している。この値が低いとレーダーの角度分解能が低下してしまう。今回、受信ポート間アイソレーションは30dB以上で良好な値が得られた。

表2はRFモジュールの評価結果一覧を示す。表が示すように、今回試作したRFモジュールは目標仕様を満たすことができた。

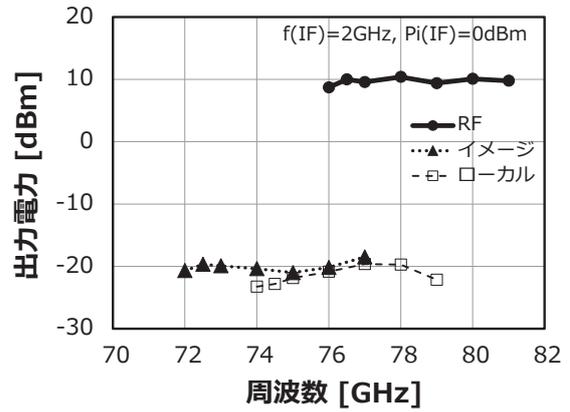


図16 RFモジュールの送信特性

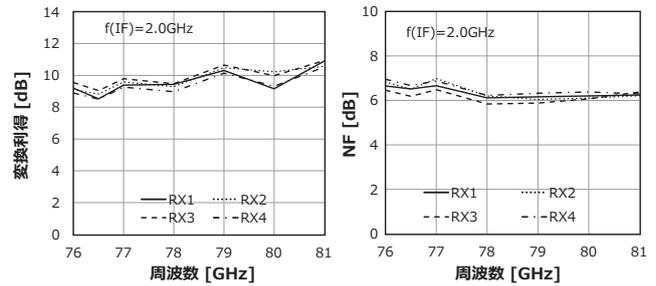


図17 RFモジュールの受信特性

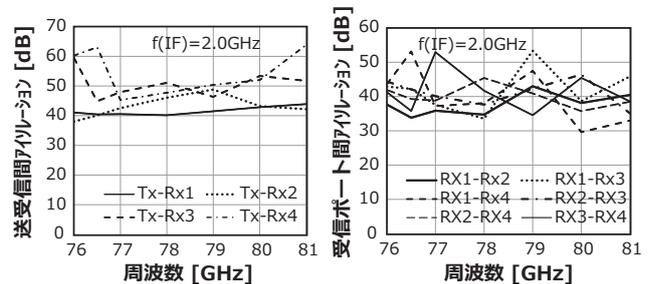


図18 RFモジュールのアイソレーション特性

表2 RFモジュールの評価結果一覧

項目	仕様			試作結果			単位
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
送信電力	4.8	10	11.7	8.7	10	10.3	dBm
送信利得		10			10		dB
不要波電力			-15			-19	dBm
受信利得	5			9			dB
受信NF			9		7		dB
送受信間アイソレーション	40			40			dB
受信ポート間アイソレーション	20			30			dB

## 6. 結 言

当社独自技術のWLCSP技術を適用し、路側設置レーダー用のRFデバイスを開発した。また、RFデバイスをRFモジュール用に設計したPCBに実装して、RFモジュールを試作した。試作したRFモジュールはARIB standardに適合し、レーダーとして必要な仕様を全て満足することができた。WLCSP技術は、パッケージ不要のため、小型化にも適しており、RFモジュールのサイズを20×34.5mm<sup>2</sup>に小型化できた。

## 7. 謝 辞

本件の一部は、総務省の委託研究「狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダー技術の研究開発」プロジェクトのもとに実施したものである。今回ご助力頂いた皆様に心から感謝の意を表させていただきます。

### 用語集

#### ※1 PCB

Printed Circuit Boardの略。機材となる誘電体に銅などの金属で微細な配線パターンが形成されたもの。抵抗やコンデンサ、ICチップなどの部品を実装して使用する。部品を実装する前は、回路が形成されていないため、PWB (Printed Wiring Board) とも呼ばれる。

#### ※2 ARIB standard

日本の電波利用に関する標準規格で、電波産業会 (Association of Radio Industries and Businesses) で策定されている。

#### ※3 カスコード接続

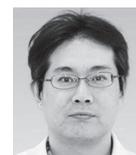
2つのFETで、片方のソースをもう片方のドレインに接続させ、残りのソースをGNDへ設置し、残りのドレインにDCをバイアスした接続方法。電圧が2倍になるが、電流は半分にできる。

### 参考文献

- (1) K. Tsukashima, M. Kubota, A. Yonamine, T. Tokumitsu, and Y. Hasegawa, "E-band radio link communication chipset in cost effective wafer level chip size package (WLCSP) technology," in Proc. of the 6th European Microwave Integrated Circuits Conference, Manchester, pp. 29-32 (Oct. 2011)
- (2) T. Kawasaki, M. Kubota, K. Tsukashima, T. tokumitsu, and Y. Hasegawa, "A full E-band low noise amplifier realized by using novel wafer-level chip size package technology suitable for reliable flip-chip reflow-soldering," in IEEE International Microwave Symposium Dig., Tampa Bay, TU3G-1 (June 2014)
- (3) K. Tsukashima, O. Anegawa, T. Kawasaki, A. Otsuka, M. Kubota, T. Tokumitsu, S. Ogita, "Transceiver MMIC's for street surveillance radar", 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), pp. 329-332 (Oct. 2016)
- (4) O. Anegawa, T. Kawasaki, K. Tsukashima, M. Kubota, T. Tokumitsu, S. Ogita, "A WLCSP 79-GHz band harmonic mixer with high LO-leakage suppression," 2016 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp. 1-3 (Aug. 2016)
- (5) T. Kawasaki, A. Otsuka, M. Kubota, T. Tokumitsu, S. Ogita, "Improvement of 19 GHz VCO with use of Feedback Coupled-Line Resonator," 2015 European Microwave Conference (EuMC), pp. 239-242 (Oct. 2015)

### 執筆者

姉川 修\* : 伝送デバイス研究所 主席  
工学博士



大塚 晃 : 伝送デバイス研究所



川崎 健 : 伝送デバイス研究所 主席



塚島 光路 : 伝送デバイス研究所 主席



久保田 幹 : 伝送デバイス研究所 グループ長



中林 隆志 : 伝送デバイス研究所 部長



\*主執筆者