

近接ギガビット通信用60GHz - CMOS トランシーバChipの開発

Development of 60GHz-CMOS Transceiver device for Near field Gigabit radio communication

中野 洋 Hiroschi Nakano	諸星光 則 Mitsunori Morohoshi	辻田 雅之 Masayuki Tsujita
小林 純 Jun Kobayashi	平林 和雄 Kazuo Hirabayashi	谷口 徹 Toru Taniguchi

要 旨

近年、スマートフォンに代表される携帯情報端末の急速な普及に対応する超高速無線通信用デバイスの開発が急務になっている。ミリ波のような高い周波数の電波は、その広帯域性から情報の超高速伝送に適している。当社は携帯端末搭載可能なミリ波RF-CMOSデバイスの開発に着手した。ここで紹介するRF-CMOSは、ミリ波帯回路を構成するために十分な高周波特性をもつ65nmCMOSプロセスを用いて製作した。また、送信及び受信の機能を有しており、通信時にはデバイスのもつバラツキを検知し、修正する独自開発のキャリブレーション機能を持つ。従来のWi-Fi 通信デバイスの20倍以上高速となる7.04Gbps (16QAM) の超高速伝送可能なミリ波RF-CMOSデバイスを実現した。

Abstract

Recently, with the rapid spread of portable wireless communication terminals represented by smart-phones, there is an increasing demand for large-capacity wireless infrastructure equipment. Millimeter-wave is suited for ultra-high-speed transmission from the broadband performance. JRC has developed Millimeter wave RF-CMOS device that can be mounted on the portable communication terminal. RF-CMOS device was fabricated using 65nm-CMOS process technology, and it has a function of transmitter and receiver. When this RF-CMOS device is in operation, corresponding to a change by the device characteristic variations and temperature variations, always it has a function to calibrate to a certain behavior. As a result, JRC has developed Millimeter-wave wireless RF-CMOS of a conventional about 20 times the transmission performance. This device's data transmission rates can reach 7.04Gbps (16QAM).

1. まえがき

近年、無線通信技術の発達により携帯電話・スマートフォンに代表される携帯情報端末が普及し、広く利用されている。通信も音声のみではなく、画像や映像等のマルチメディア通信に利用され、Wi-Fi等を介して通信が行われている。

現在、利用されている無線通信は、使用する通信周波数や使用帯域幅等が電波法により細かく規定されている。また、通信に利用されている周波数の多くは、5GHz帯以下の周波数に留まり、限られた電波資源を多くの規格が隙間を埋めるかのように使用している。

今後、データ量が増加していくことを考えると、現在、あまり利用されていない10GHzを超えるような高い周波数帯での通信が必須となってくる。特に、30~300GHzのミリ波帯と呼ばれる周波数帯の活用が期待されている。この周波数帯は、直進性の高い伝搬特性を生かし、主に車載レーダー分野での活用がなされてきた。通信においては、60GHz帯が注目されているが、空気中の酸素分子の吸収が大きく、減衰量が多いため、遠距離通信には向かない。このため、世界各国において、無免許で使用できる周波数として開放

されている。この解放された周波数を用いることで、従来の通信速度の数十倍から数百倍の高速な通信が可能となる。さらに、空間の減衰量が多いため、同一周波数を空間で分離し繰り返し再利用することで、電波利用効率の良い通信が可能となる。

2. ミリ波デバイス

60GHz帯の通信を実現する無線通信デバイスとしては、移動度が高く、高周波で高い性能を示す化合物半導体がいわれてきた。しかし、集積化や大量生産が困難であることから携帯情報機器等への実装を考慮するとコスト面での課題が残る。近年、CMOSプロセスの微細化が進み、最大動作周波数 (f_{max}) も化合物半導体と肩を並べるまで向上している。更に、RFアナログ回路のみならず、デジタル回路を混載することもCMOSプロセスでは実現可能であり、化合物半導体に対して有利な点である。このように、ミリ波回路を実現し、普及させるためには、CMOS技術の活用が重要である。

一方、大量生産をめざし、Siウエハの大口径化や微細化されたプロセスのため、ミリ波帯で動作するRFのアナログ回

路は、デジタル回路に比して素子バラツキを考慮した設計を行わなければならない。当社は65nm CMOSプロセスを用いてミリ波帯通信用デバイスの開発を行っている。ここでは、デバイスの動作バラツキを判定し、補正する独自開発のキャリブレーション機能を持つミリ波帯通信用デバイスについて報告する。

3. ミリ波回路技術

ミリ波通信CMOSデバイスは、携帯電話やWi-Fi等で使用される通信デバイスと同様、発振器、ミキサ、増幅器等の基本回路から構成されている。図1に開発したミリ波RF-CMOSデバイスのブロック図並びに仕様を示す。

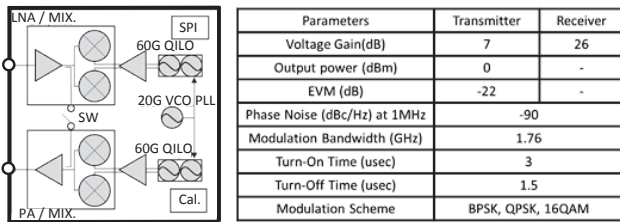


図1 ミリ波通信CMOSのブロック図, 仕様
Fig.1 Block-diagram of mm-wave RF CMOS, Specification

開発したミリ波RF-CMOSデバイスは、60GHzQILO (Quadrature Injection locked oscillator) とPA (Power Amp) ならびにMix. (Mixer) からなる送信部とLNA (Low-noise Amp) ならびにMix.からなる受信部から構成され、更に両者に共通の構成要素として、20GHz VCO (Voltage-controlled oscillator), 自動校正を可能とするCal. (Calibration) 部, Cal.動作時にループバック経路を構成するミリ波帯のSW (Switch), ならびに外部ベースバンド回路とのインターフェースであるSPI (Serial Peripheral Interface) から構成されている。開発したミリ波RF-CMOSデバイスは、16QAMの多値変調に対応しており、伝送速度は7.04Gbpsの超高速伝送が可能としている。

一般に、多値変調の実現には局部発振器の低位相雑音化が必須である。しかし、局部発振器の周波数が高くなるとQ値が小さくなることから、位相雑音性能が劣化し、多値変調の実現が困難となっている。本デバイスではより位相雑音性能に優れた20GHz帯の発振器の出力を60GHz帯の発振器に注入し同期することで、優れた低位相雑音性能が得られる注入同期方式を用いている⁽¹⁾。しかし、デバイスばらつきや温度変動に対して敏感で動作が不安定になる欠点がある。当社では、この課題に対し、局部発振器の高精度設計、ならびにIQバランスのキャリブレーション技術の実現によりギガビット伝送を可能としている。

3.1 20GHzVCO

ミリ波RF-CMOSデバイスの20GHzVCOは、位相雑音特性の点で有利なLC型を採用している。LC型VCOの基本構成を図2に示す。

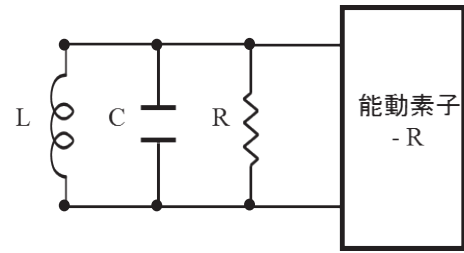


図2 LC発振器
Fig.2 LC-Oscillator

発振器の発振周波数 f は (1) 式にあらわされる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

発振器の周波数 f は、図2に示されたインダクタLとキャパシタCで決まる値である。実際には、それぞれの素子を接続する配線に対して、配線長にともなう寄生インダクタLsや寄生キャパシタCsが存在する。図3に寄生素子を考慮したLC発振器の構成図を示す。

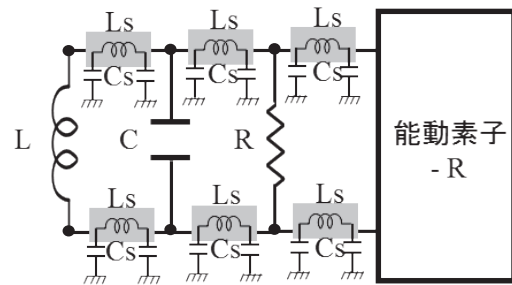


図3 LC発振器 寄生素子あり
Fig.3 LC-Oscillator with stray capacity and inductance

20GHzを超えるLC型VCOでは、L、Cの値(物理的サイズも)が非常に小さくなるため、寄生成分がL、Cと同程度となり、発振周波数に与える影響が大きいため、設計に際し配慮が必要となる。ミリ波RF-CMOSデバイスに搭載したLC型VCOのレイアウトを図4に示す。

精度の高い設計のためには、LC素子による設計を行った後、配線レイアウトをもとに寄生素子を抽出し、設計にフィードバックすることが特に重要であり必須となる。

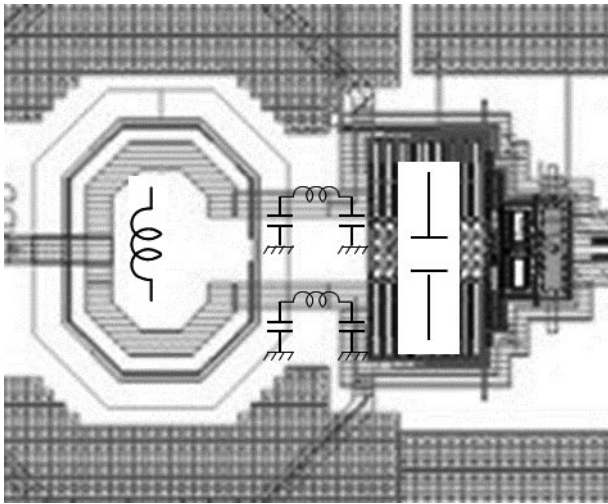


図4 LC-VCOレイアウト
Fig.4 Layout of LC-VCO

試作したLC型VCOの設計値、ならびに測定結果を図5に示す。寄生成分を考慮し設計した結果、測定値とよく一致する良好な結果を得た。位相雑音特性については、 $-102\text{dBc}/\text{Hz}$ at 1MHz off carrier となり、60GHz注入信号として十分良好な結果を得た。

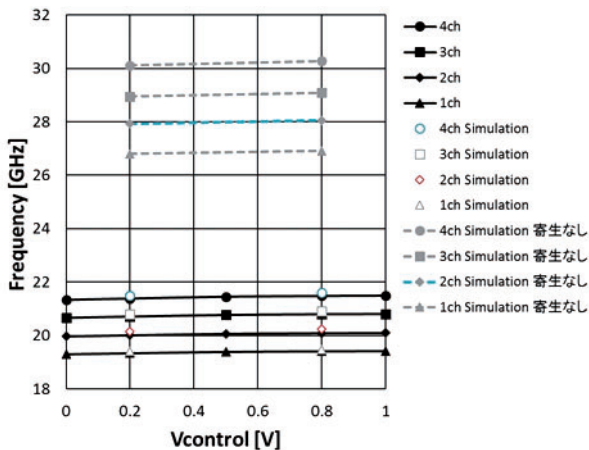


図5 20GHz-VCO 測定結果
Fig.5 Measured 20GHz-VCO

3.2 60GHz帯QILOとキャリブレーション

QILOは20GHzVCOと同様にLC発振器を基本とした注入同期型の4相発振器である。図6にQILOのブロック図を示す。I側とQ側の2つの発振器が互いに注入しあい、20GHzVCOからの信号がQ側のみ注入される構造となっている。60GHz帯QILOに求められる特性は、低位相雑音の実現と精度の高い4相出力の実現である。ここでは、注入同期を安定に行うキャリブレーション技術、ならびにIとQ出力の位相誤差キャリブレーションについて報告する。

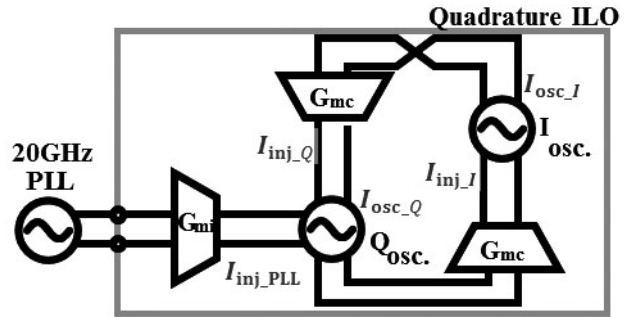


図6 QILOのブロック図
Fig.6 Block diagram of QILO

60GHzQILOにおいて、60GHz発振回路に20GHzVCO (PLLあり) が注入されると、注入された信号の3乗倍周波数に60GHz発振器のフリーラン周波数が同期する様に設計されている。ここで、 Q_{osc} 、 I_{osc} は60GHz発振器、 G_{mc} はIQカップリング素子である。この際、同期可能なロックレンジは(2)式で表される⁽²⁾。

$$\omega_0 - \omega_{inj} = \frac{\omega_0}{2Q} \cdot \frac{I_{inj}}{I_{osc}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{I_{inj}}{I_{osc}}\right)^2}} \quad (2)$$

ここで、 ω_0 は発振角周波数、 ω_{inj} は注入信号の角周波数、 I_{osc} は共振器に流れる電流、 I_{inj} は注入電流となる。この式から、注入信号により同期可能なフリーラン周波数はロックレンジ内に限定される。このとき、フリーラン周波数は、デバイスばらつきや環境温度変動により変動する。このため、QILOをこのロックレンジ内で動作するようキャリブレーションする必要がある。QILOがフリーラン動作時は、制御電圧により周波数が変化するが、ロック状態では、制御電圧に対して周波数が変化しない。この状態を検出すればロック状態の判別が可能となる。周波数の変化を検出する方法として、スイッチトキャパシタを用いた周波数-電圧 (F/V) 変換回路を用いた。

$$z = \frac{1}{\text{Frequency} \cdot \text{Capacitor}} \quad (3)$$

スイッチトキャパシタのインピーダンス z は、(3)式であらわされる。周波数変化によりインピーダンス z が変化するため、電圧変化として容易に検出できる。

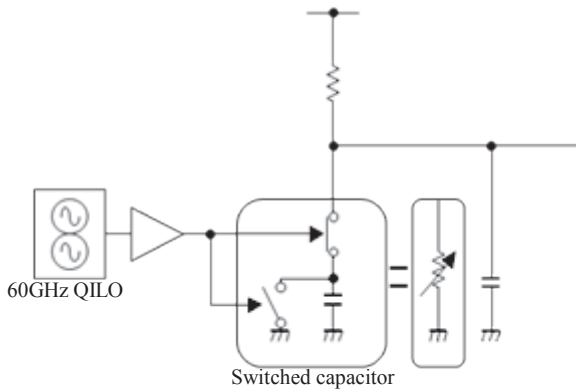


図7 周波数-電圧変換回路
Fig.7 Frequency-Voltage converter

図7にスイッチトキャパシタを用いたF/V変換回路を示す。図8は、注入同期時における同回路の入出力特性と各状態でのスペクトルを示す。

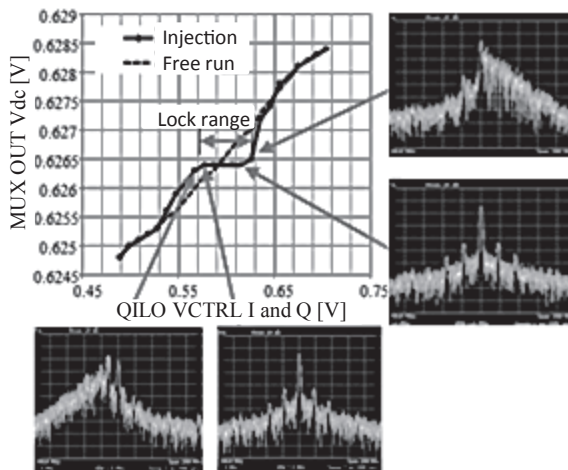


図8 F/V回路の入出力特性
Fig.8. Input-output characteristics of F/V converter

LC発振器のキャパシタCに並列に付加された周波数可変用バラクタに印加されるバラクタ制御電圧 (QILO VCTRL I and Q) を変化させ、F/V変換回路の電圧 (周波数) が変化しない制御電圧範囲を探索し、制御電圧をこの範囲内に決定することでキャリブレーション機能を実現した。

次に、IとQ出力の位相誤差のキャリブレーションについて報告する。60GHzQILOは図6に示すように、20GHzVCOからの信号がQ側のみ注入される構造である。この際、I出力とQ出力は理想的には直交するよう設計されている。これら理想的な位相からの偏差 ϕ_i 、 ϕ_q は(4)式、(5)式で表すことができる。また、IQ出力の直交位相からの位相差 $\Delta\phi$ は(6)式で表される。

$$\phi_i = \sin^{-1} \left[2Q \left(\frac{\omega_{0_i} - \omega_{inj_PLL}}{\omega_{0_i}} \right) \cdot \frac{I_{OSC_i}}{I_{inj_i}} \right] \quad (4)$$

$$\phi_q = \sin^{-1} \left[2Q \left(\frac{\omega_{0_q} - \omega_{inj_PLL}}{\omega_{0_q}} \right) \cdot \frac{I_{OSC_q}}{I_{inj_q} + \alpha I_{inj_PLL}} \right] \quad (5)$$

$$\Delta\phi = 2(\phi_q - \phi_i) \quad (6)$$

I, Qのフリーラン周波数により決まる ω_{0_i} と ω_{0_q} と、注入信号による ω_{inj_PLL} との離調に対し、 ϕ_i 、 ϕ_q は異なる位相偏差となる²⁾。IQ発振器のフリーラン周波数を調整することで、 $\Delta\phi$ が変化する。キャリブレーションは、位相差 $\Delta\phi$ が小さくなるようにフリーラン周波数を変化させ行う。

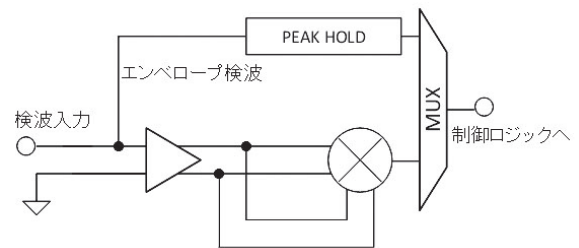


図9 IQ キャリブレーションブロック図
Fig.9 Block diagram of IQ-Calibration

図9に、IQキャリブレーションのブロック図を示す。ICに内蔵した既知の4相信号源を用いベースバンド信号をI,Q交互に入力する。RF出力に設けられた図中のエンベロープ検波並びにPEAK HOLD回路において、I信号とQ信号の振幅情報を検出し、振幅差が小さくなるように予め決められた制御ロジックで出力振幅を調整する。また、図中のミキサで自乗検波を行い、結果より位相差 $\Delta\phi$ が最小となるようにIQ発振器のバラクタ電圧を調整する。

開発したミリ波RF-CMOSデバイスにおいて、注入同期及びIQ信号のキャリブレーション等を行った後、送信EVMを評価した。図10に送信EVMの出力電力依存性を示す。デバイスの仕様である出力電力0dBmにおいて16QAM伝送 (~7.04Gbps) が十分可能な-29dBという良好な結果を得た。試作したRF-CMOSチップ外観図を同図に示す。また、チップサイズは、3.0×3.0 mmであった。

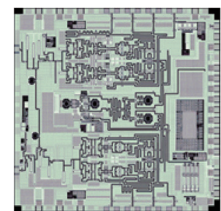
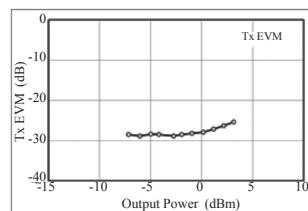


図10 Tx-EVM vs Tx-Output power RF-CMOSチップ
Fig.10 Tx-EVM vs Tx-Output power RF-CMOS chip

4. あとがき

近年、スマートフォンに代表される携帯情報端末の急速な普及に対応する超高速無線通信用デバイスの開発が急務になっており、ミリ波帯超高速通信の研究開発が盛んに行われているが、スマートフォン等を実装可能な安価で安定なミリ波デバイスは実現できていない。われわれは、低コスト化が可能な65nmCMOSデバイス技術を用い、更にデバイスばらつきや外乱に対しキャリブレーション機能を有するミリ波RF-CMOSデバイスを開発した。

この開発にあたり、ご協力頂いた新日本無線株式会社、上田日本無線株式会社、日清紡ホールディングス株式会社、共同研究パートナーの東京工業大学に感謝致します。

参考文献

- (1) X. Zhou X. Zhang and A. S. Daryoush. "A Theoretical and Experimental Study of the Noise Behavior of Subharmonically Injection Locked Local Oscillators", TMTT, Vol. 40, No. 5, pp. 895-902, May 1992.
- (2) 山口達也, 岡田健一, 松澤昭, "60 GHz 注入同期型周波数逡倍器のI/Q ミスマッチに関する検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-12-34, Mar. 2011.

用語一覧

CMOS: Complementary MOS (相補型MOS)
Wi-Fi: Wi-Fi (Wi-Fi Allianceの定めた無線LAN規格)
VCO: Voltage-controlled oscillator (電圧制御発振器)
QILO: Quadrature Injection locked oscillator (注入同期型4相発振器)
SPI: Serial Peripheral Interface (デバイス間を接続する接続方式)
QAM: quadrature amplitude modulation (直角位相振幅変調)