

# ミリ波64QAM通信を実現する 60GHz帯局部発振器

東京工業大学 大学院理工学研究科 松澤・岡田研究室

桂木 真希彦, 上野 智大, Teerachot Siriburanon, 木村 健将, 近藤 智史, 岡田 健一, 松澤 昭

## 1. 研究背景

### ・60GHz帯無線通信

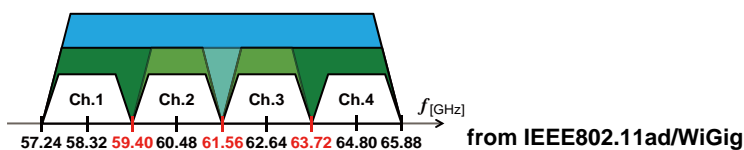
- 広帯域を用いて、超高速無線通信が可能
- QPSK → 3.52Gbps/ch
- 16QAM → 7.04Gbps/ch
- **64QAM → 10.56Gbps/ch (not reported yet)**

### ・60GHz帯発振器の課題

- 表皮効果により受動素子の損失が大きい  
→ 広帯域と低位相雑音の両立が困難

### ・局部発振器の要求性能

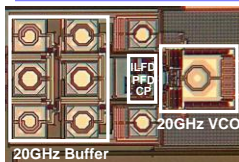
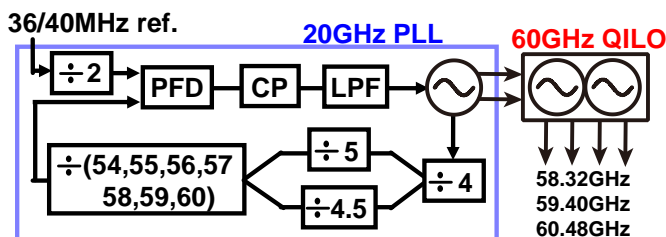
- **広帯域: 58.32 - 64.80GHz**
- **低位相雑音: -96dBc/Hz@1MHz for 64QAM**



## 2. 60GHz帯局部発振器

### ・20GHz PLL + 60GHz QILO<sup>[1]</sup>

- 注入同期により位相雑音性能を改善



[1] K. Okada, et al., ISSCC 2011

←20GHz PLLのチップ写真  
Area: 0.90mm<sup>2</sup>

Ref.	REF Freq. (MHz)	Frequency (GHz)	Phase Noise @1MHz	Features	Power (mW)
[2]	100	57.0-66.0	-75dBc/Hz	Direct 60GHz QPLL	78
[3]	203.2	59.6-64.0	-92dBc/Hz	30GHz PLL + hybrid	76
[4]	100	56.4-63.4	-90dBc/Hz	60GHz AD-PLL	48
This[5]	36	58.1-65.0	<b>-96dBc/Hz</b>	Sub-harmonic Injection 20GHz PLL + 60GHz QILO	72
This[6]	36/40	58-66	<b>-97dBc/Hz</b>	Sub-harmonic Injection 20GHz PLL + 60GHz QILO	79
This	36/40	58.3-65.4	<b>-95dBc/Hz</b>	Sub-harmonic Injection 20GHz PLL + 60GHz QILO	33

- [2] K. Scheir, et al., ISSCC 2009 [5] W. Deng, et al., JSSC 2013  
 [3] C. Marcu, et al., JSSC 2009 [6] K. Okada, et al., ISSCC 2014  
 [4] W. Wu, et al., ISSCC 2013

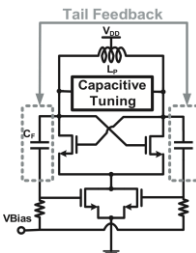
### ・結論

- **全チャネル64QAM通信を達成<sup>[5]</sup>**  
**(60GHz帯無線機として世界初)**

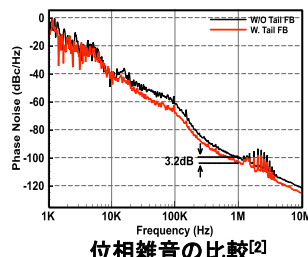
## 3. 20GHz VCO

### ・Tail Capacitive-Feedback VCO<sup>[1]</sup>

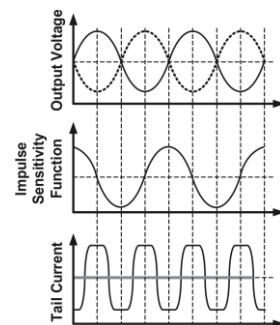
- 雑音感度(Impulse Sensitivity Function)が小さいタイミングで駆動させる



Tail Capacitive-Feedback VCOの回路図



位相雑音の比較<sup>[2]</sup>



フィードバックの様子

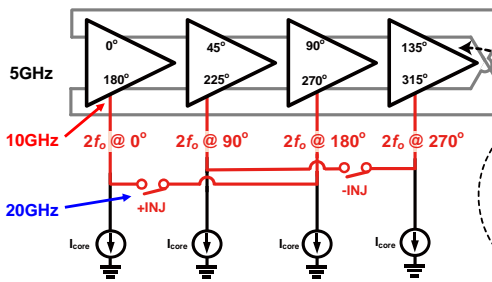
**-107dBc/Hz@1MHz  
を達成**

- [1] K. Okada, et al., JSSC 2011  
 [2] A. Musa, et al., IEICE Trans. Electron. 2013

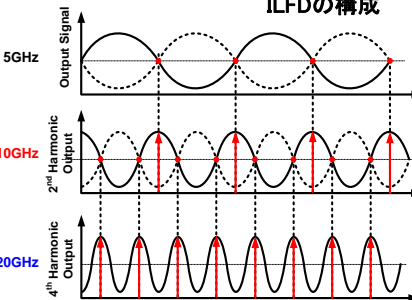
## 4. 20GHz-to-5GHz ILFD

### ・注入同期型周波数分周器(/4)

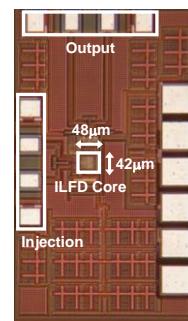
- 高調波を利用して注入同期<sup>[5][6]</sup>



ILFDの構成



4分周時の動作 ↑ ↓4分周器の性能比較



ILFDのチップ写真  
Area: 0.002mm<sup>2</sup>

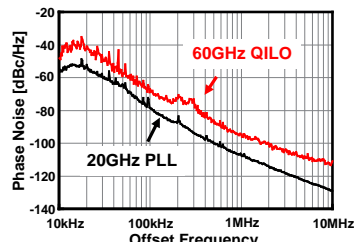
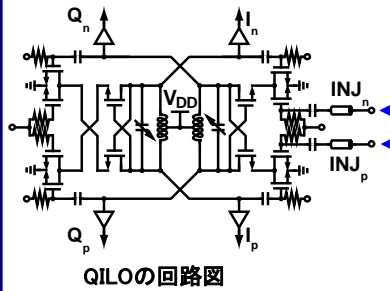
	Features	Locking Range (GHz)	Power (mW)	Area (mm <sup>2</sup> )
[1]	Direct mixing	22.6-28 (21%)	8.3	0.140
[2]	Direct mixing	31.0-41.0 (27%)	3.3	0.002
[3]	LC Direct mixing	58.5-72.9 (22%)	2.2	0.032
[4]	CML + LC ILFD	13.5-30.5 (77%)	7.3	0.33
This	<b>Progressive mixing</b>	13.4-21.3 (31%)	<b>3.9</b>	<b>0.003</b>
This	<b>Progressive mixing</b>	15.2-20.4 (24%)	<b>3.1</b>	<b>0.002</b>

- [1] A-SSCC 2007  
 [2] ISSCC 2006  
 [3] CICC 2012  
 [4] T-MTT 2011  
 [5] A. Musa, et al., A-SSCC 2011  
 [6] T. Siriburanon, et al., ESSCIRC 2013

# 5. 60GHz QILO

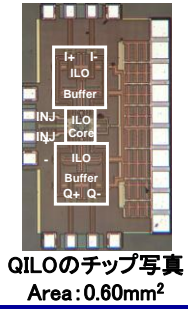
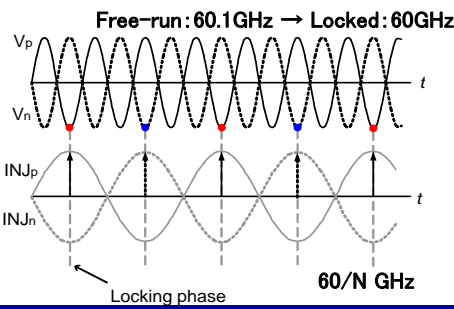
## ・60GHz帯注入同期型周波数通倍器<sup>[1][2][3]</sup>

- 直交位相出力 (Quadrature ILO)
- 位相雑音は注入信号に依存



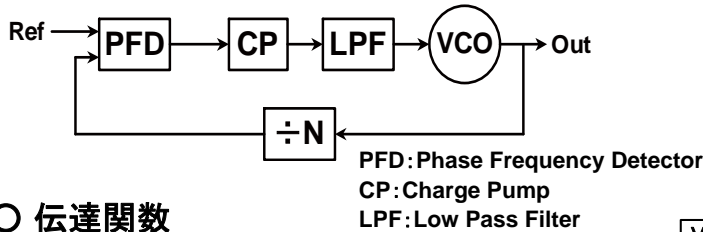
## ・注入同期

- 注入信号に位相が同期することで発振周波数が注入信号周波数のN倍にロック

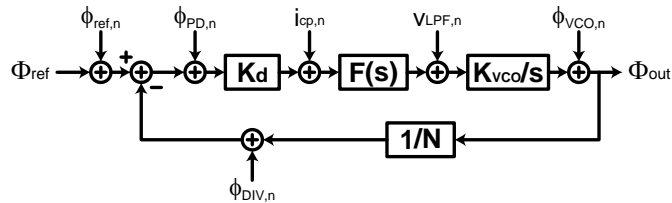


# 6. サブサンプリングPLL

## ・従来回路(チャージポンプPLL)

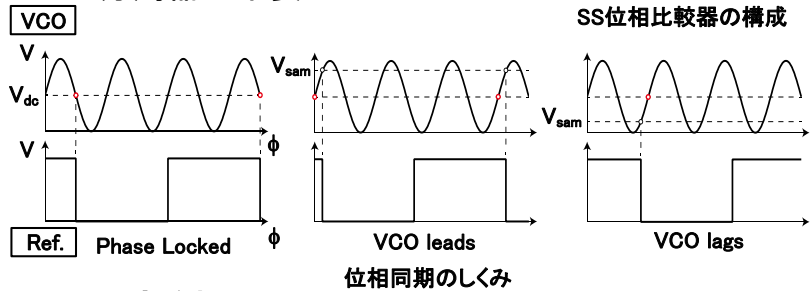
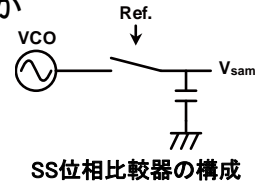


### ○ 伝達関数



## ・サブサンプリング位相比較器

- 位相差を電位差に変換
- 参照信号に対してVCOの位相が進んでいると  $V_{sam} > V_{dc}$
- 遅れていると  $V_{sam} < V_{dc}$
- 分周器が不要



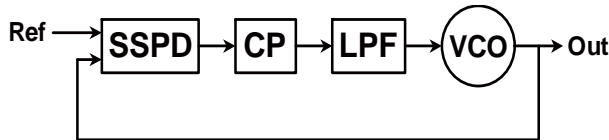
## ・測定結果

### (20GHz SS-PLL+60GHz QILO)

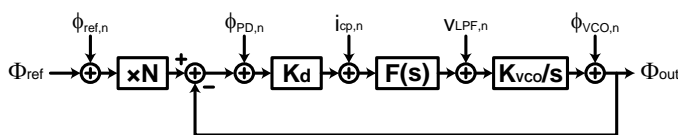
Ref.	REF Freq. (MHz)	Frequency (GHz)	Integrated Jitter (ps)	Phase Noise @10kHz offset	Phase Noise @10MHz offset	Features	Power (mW)
[2]	100	57.0-66.0	1.5	-66 dBc/Hz	-108 dBc/Hz	Direct 60GHz QPLL	78
[3]	203.2	59.6-64.0	2.3	-65 dBc/Hz	-112 dBc/Hz	30GHz PLL + Coupler	76
[4]	100	56.0-62.0	0.94	-71 dBc/Hz	-109 dBc/Hz	60GHz AD-PLL	48
This (normal)	36/40	58.3-65.4	12.0	-40 dBc/Hz	-115 dBc/Hz	Sub-harmonic Injection 20GHz PLL + 60GHz QILO	32.8
This (SS)	36	58.3-65.4	2.1	-69 dBc/Hz	-115 dBc/Hz	Sub-harmonic Injection 20GHz SS-PLL + 60GHz QILO	34.2

## ・提案回路(サブサンプリングPLL<sup>[1]</sup>)

- サブサンプリング位相比較器を利用
  - 分周器を削除
- [1] X.Gao, et al., JSSC 2009



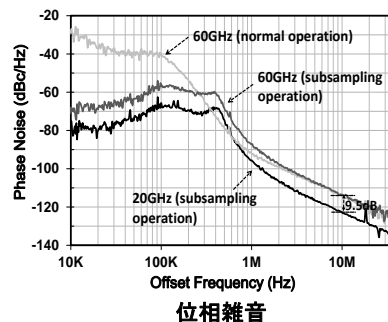
### ○ 伝達関数



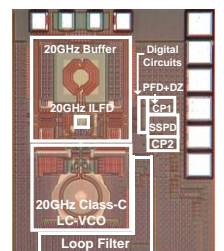
$$\Phi_{out} = \frac{1}{i_{cpn}} \frac{H(s)}{K_d(1+H(s))}$$

H(s): 一巡伝達関数

- ☺ 分周器のノイズがなくなる
- ☺ ループ帯域内のノイズがN倍されない



- [2] K. Scheir, et al., ISSCC 2009
- [3] C. Marcu, et al., JSSC 2009
- [4] W. Wu, et al., ISSCC 2013



## 謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究『電波資源拡大のための研究開発』、総務省SCOPE、科学研究費補助金、半導体理工学研究センター、並びに東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス株式会社およびアジレント・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。