

60GHz帯ダイレクトコンバージョン 無線機の直交局部発振器

◎山口 達也, 岡田 健一, 松澤 昭

東京工業大学 大学院理工学研究科
電子物理工学専攻

- **研究背景・目的**
 - 60GHz帯ダイレクトコンバージョン無線機
 - 60GHz帯局部発振器
- **提案する回路構成**
 - 20GHz PLLと60GHz QILOの組み合わせ
 - 広帯域化のためにレイアウトを考慮
- **測定結果**
- **まとめ**

- 60GHz帯RFフロントエンド
 - Si CMOSプロセス
 - ダイレクトコンバージョン方式
 - 16QAMなどの多値変調

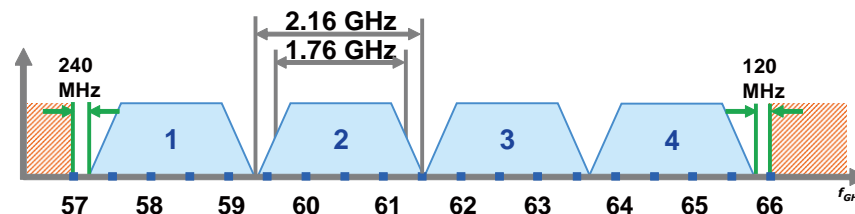


60GHz帯局部発振器(LO)の要求性能

- 広帯域(57~66GHz)
- 低位相雑音
($< -90\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{MHz}\text{-offset}$ [2])
- 直交位相(Quadrature)出力

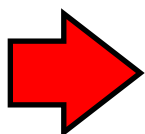


| Channel Number | Low Freq. (GHz) | Center Freq. (GHz) | High Freq. (GHz) | Nyquist BW (GHz) | Roll-Off Factor |
|----------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------|
| A1 | 57.24 | 58.32 | 59.40 | 1.76 | 0.25 |
| A2 | 59.40 | 60.48 | 61.56 | 1.76 | 0.25 |
| A3 | 61.56 | 62.64 | 63.72 | 1.76 | 0.25 |
| A4 | 63.72 | 64.80 | 65.88 | 1.76 | 0.25 |



[1] IEEE 802.15.3c

[2] K. Okada, ISSCC 2011

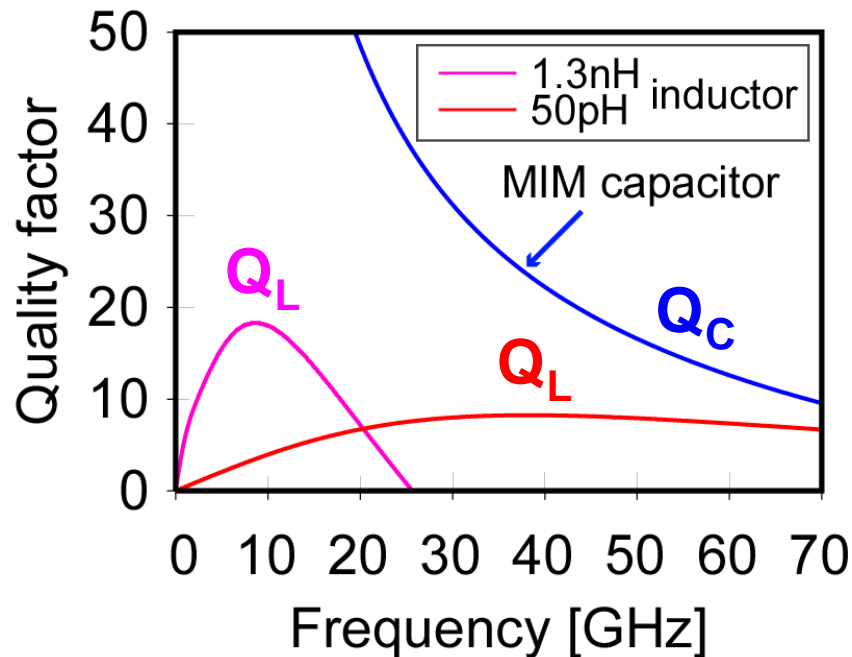


60GHz帯LOの実現と高性能化

• 位相雑音の増加

- LC-VCOの位相雑音は共振器のQ値が支配的
- 表皮効果により受動素子のQ値が減少
- 従来研究[3]では-75dBc/Hz @ 1MHz-offset

[3] K. Scheir, ISSCC 2009



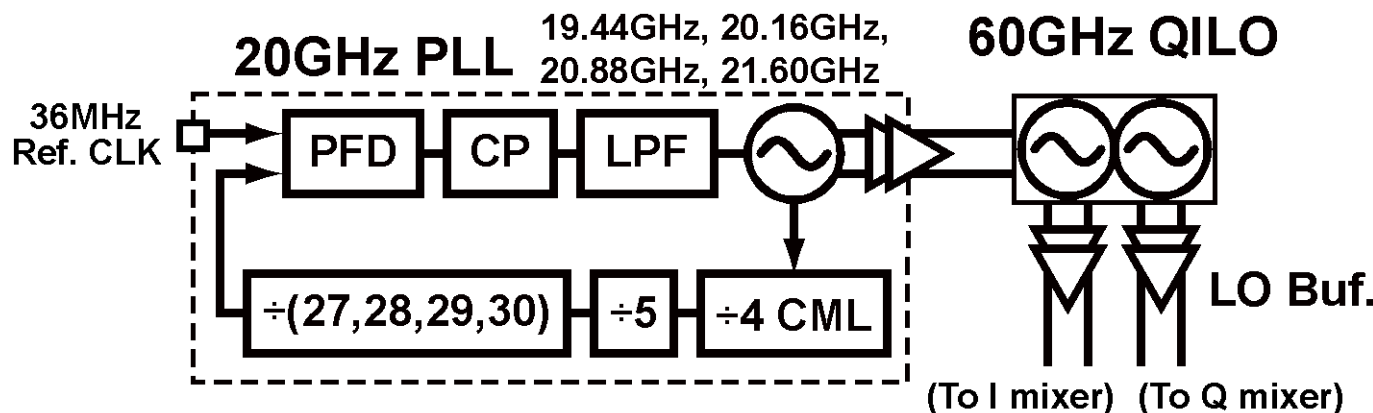
共振器のQ値

$$Q_{\text{tank}} = Q_L // Q_C$$

- 20GHz PLL + 60GHz 注入同期型直交周波数逓倍器 (QILO) [2][4]

[2] K. Okada, ISSCC 2011

[4] A. Musa, JSSC 2011



- ☺ 基本信号は20GHzで生成するため
60GHzに比べ低位相雑音と広帯域の両立が容易
- ☺ 差動逓倍器を2つ結合させることで直交位相出力が可能

16QAMでの通信が可能な60GHz帯LOが構成可能

• 逓倍器固有の課題

- ☹️ 逓倍器のロックレンジに限界
- ☹️ 注入同期による位相誤差

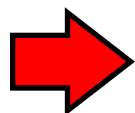


Free-run周波数を可変にすることで解決

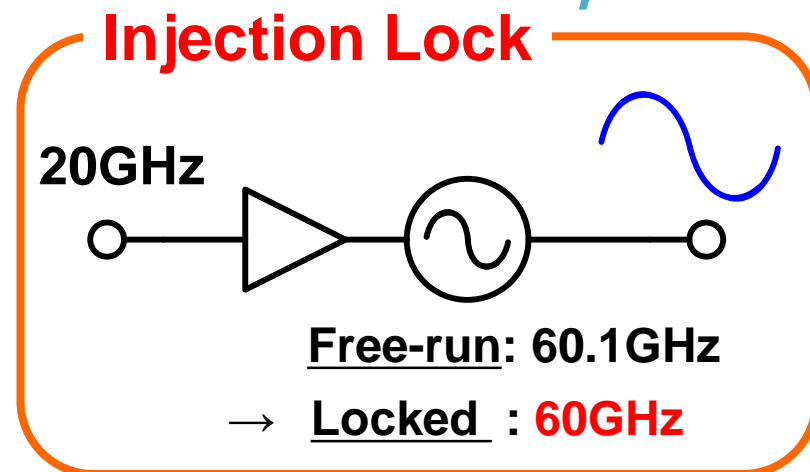


• 広帯域化が難しい

- 60GHz帯ではわずかな寄生成分も周波数に大きく影響
- [2]はCh.1からCh.2まで、[4]はCh.2からCh.4まで

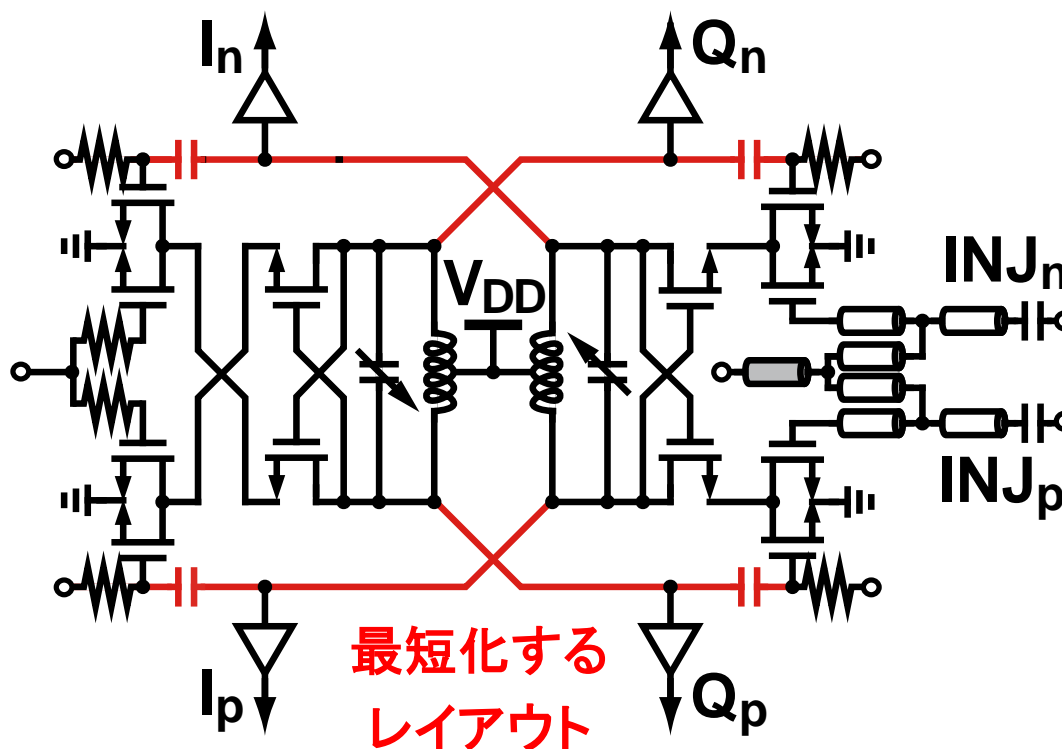


逓倍器の広帯域化も考慮したLOの設計

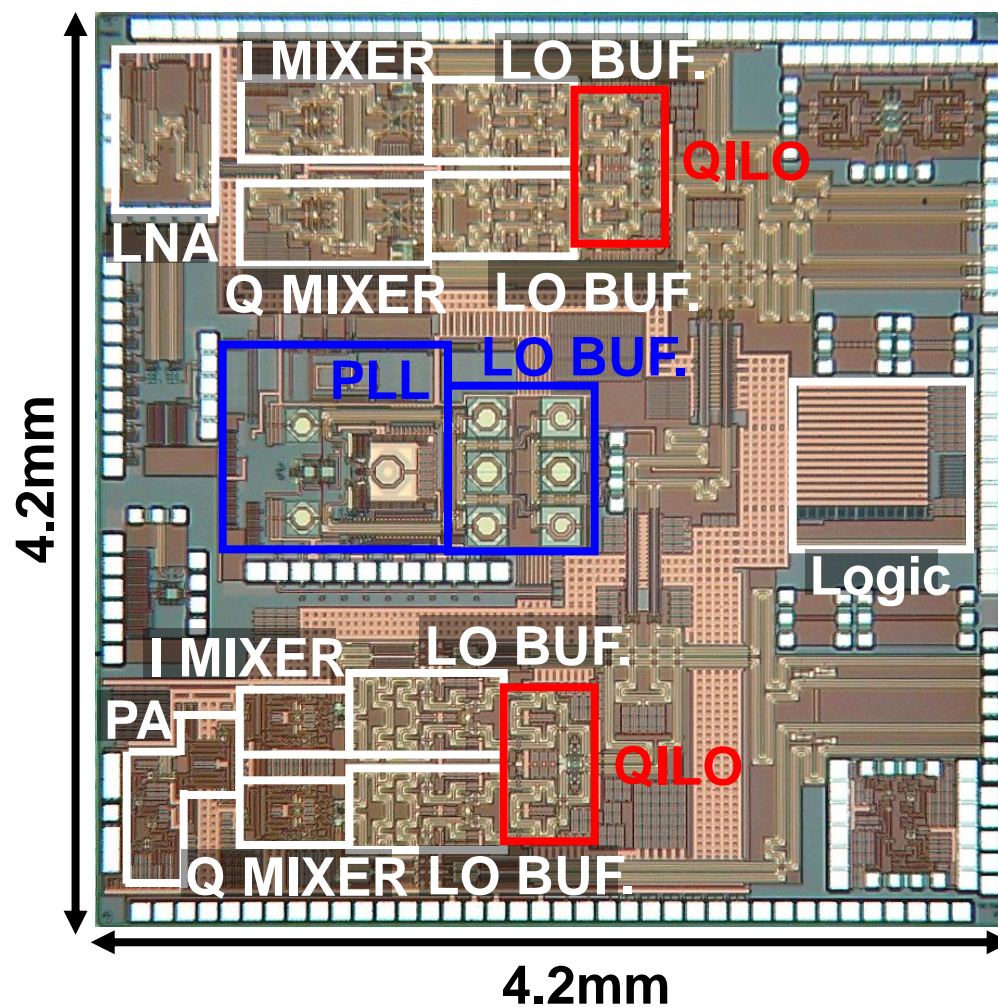


[2] K. Okada, ISSCC 2011 [4] A. Musa, JSSC 2011

- テールTr.によるI/Qカップリングと注入同期(片側)
- **I/Q間のパスを短くするレイアウト**
 - 寄生容量とI/Qミスマッチの低減
- 逓倍器の周波数は可変容量とDACによって制御

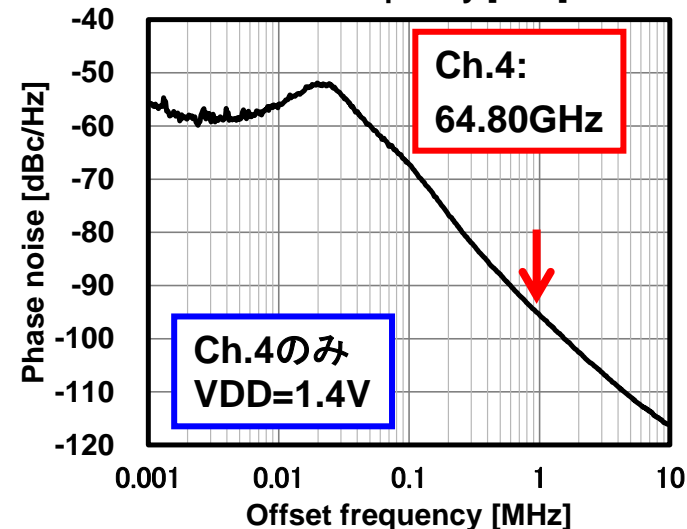
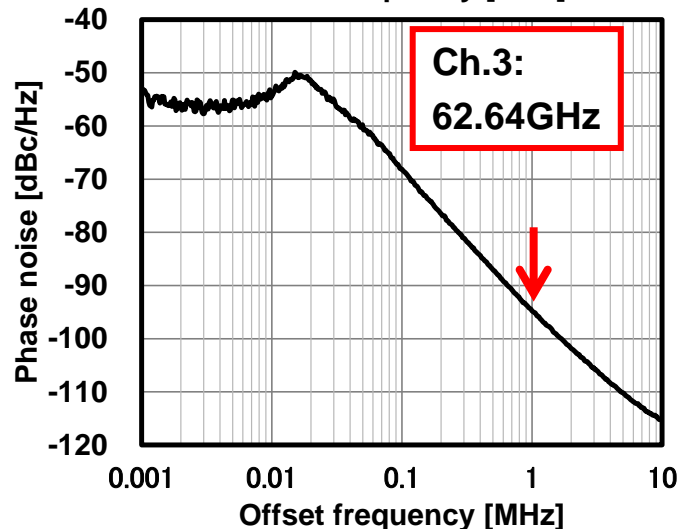
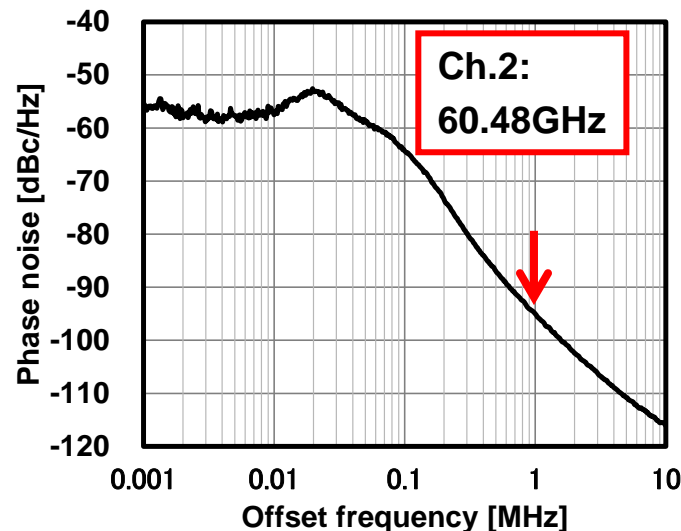
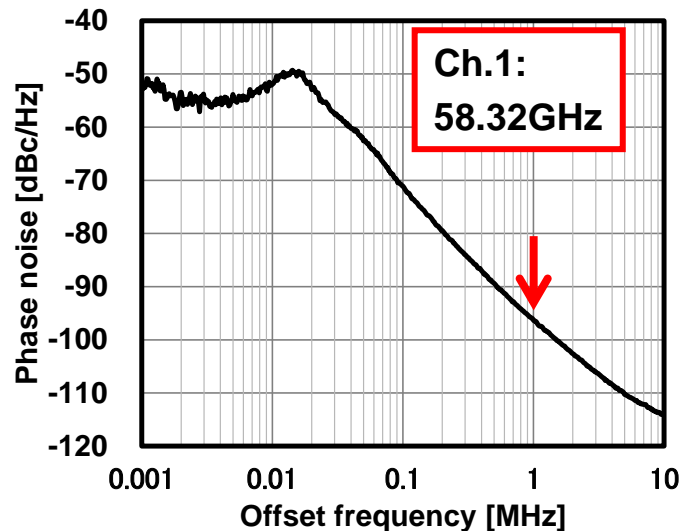


- CMOS 65nmプロセス
- 電源電圧: 1.2 V
- 回路面積
 - PLL: 1.37 mm²
 - QILO: 0.53 mm²



測定結果（位相雑音）

- 全チャンネルで $<-95\text{dBc/Hz}@1\text{MHz-offset}$ を達成



- 全チャネルで
サイドバンド抑圧比(SRR) <-40dB を達成
 - 振幅誤差 $\Delta A \doteq 0\text{dB}$ 、位相誤差 $\Delta\Phi < 1.0\text{degree}$

| | SRR ₉₀ [dB] | SRR ₋₉₀ [dB] | Amplitude Error ΔA [dB] | Phase Error $\Delta\Phi$ [degree] |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Ch.1 (58.32GHz) | -41.5 | -60.7 | 0.01 | 0.53 |
| Ch.2 (60.48GHz) | -44.5 | -44.7 | 0.00 | 0.67 |
| Ch.3 (62.64GHz) | -47.9 | -45.7 | 0.00 | 0.53 |
| Ch.4 (64.80GHz) | -44.5 | -48.9 | 0.02 | 0.49 |

性能比較 (60GHz PLL)

| | Target | This Work | [4] | [2] | [3] |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|---------|-----------|
| f_{ref} [MHz] | (36.0) | 36.0 | 36.0 | 36.0 | 100.0 |
| VCO range [GHz] | 58.32, 60.48, 62.64, 64.80 | 58.32, 60.48, 62.64, 64.80 | 57.0(60.2) ~ 66.0 | 54 ~ 61 | 57.0~66.0 |
| Phase noise @1MHz-offset [dBc/Hz] | <90.0 | <-95 (All 4-ch.) | -96.0 | -94.2 | -75.0 |
| Power [mW] | - | 106.3 | 79.9 | 90.4 | 78.0 |
| Output type | Quad. | Quad. | Quad. | Quad. | Quad. |

[4] A. Musa, JSSC 2011 [2] K. Okada, ISSCC 2011 [3] K. Scheir ISSCC 2009

- 60GHz帯直交局部発振器の全目標性能を実現
- 全チャネルで16QAMの通信を実現(送受信回路)

- 60GHz帯ダイレクトコンバージョン型CMOS無線送受信機の局部発振器として20GHz PLLと60GHz QILOを組み合わせた構成を提案
- 60GHz帯局部発振器で**トレードオフを実現**
 - **広帯域**: 規格で定められた全4チャンネルを出力
 - **低位相雑音**: $<-95\text{dBc/Hz}$ @ 1MHz-offset (全4チャンネル)
 - **低I/Qミスマッチ(直交位相)**: SRR $<-40\text{dB}$ (全4チャンネル)
- これを用いた送受信回路を試作し、**全チャンネルで規格に基づく16QAMの通信を実現**
 - 最大通信速度は8.0Gb/s(QPSK)、10.0Gb/s(16QAM)