

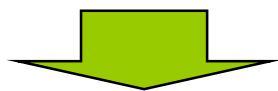
64QAM全4チャンネル対応 60GHz帯CMOS無線送信回路

○佐藤 慎司, 瀬尾 有輝, 津久井 裕基,
岡田 健一, 松澤 昭
東京工業大学大学院理工学研究科

研究背景

60GHz帯の特徴

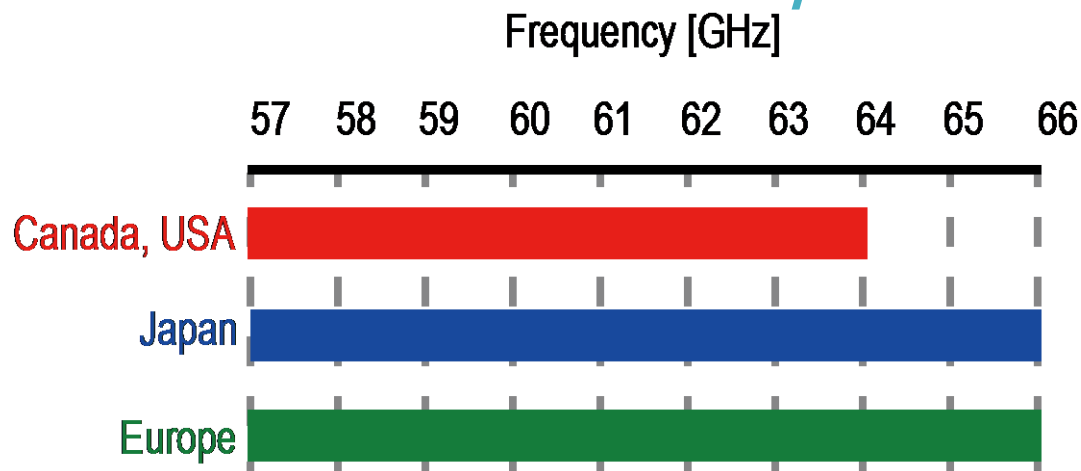
- ☹ 伝搬中の減衰が大きい
- 😊 幅広い帯域が無免許で開放されている



近距離高速無線通信への
利用が期待される

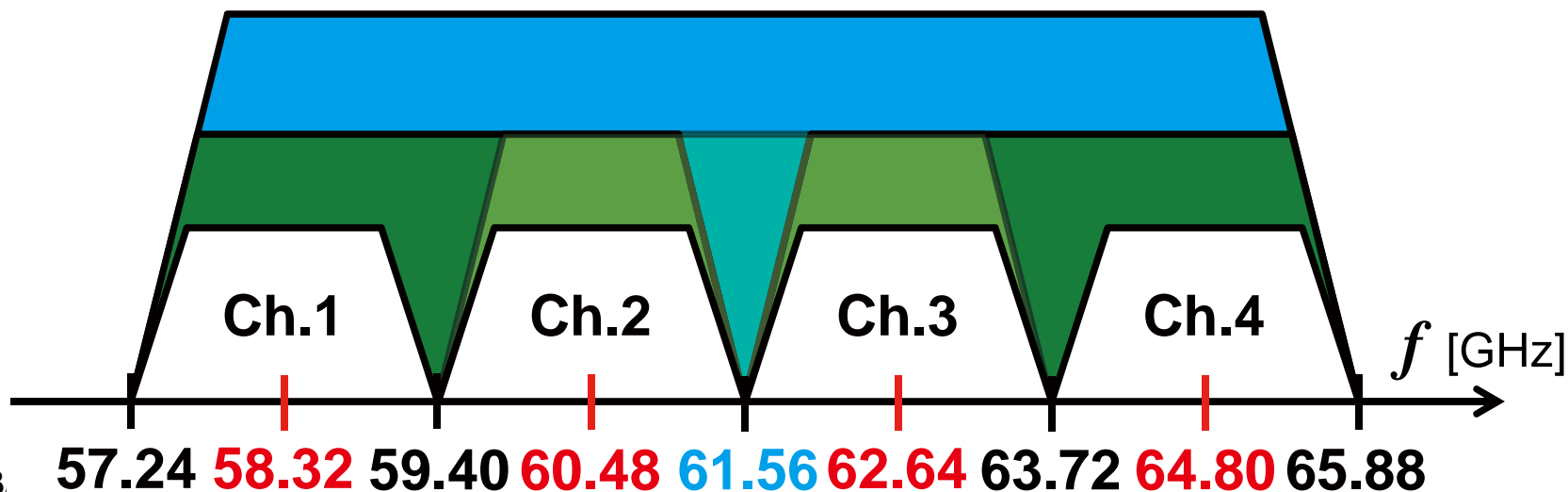
• IEEE 802.11ad

- 57.24GHz – 65.88GHz
- 2.16GHz/ch x 4ch
- QPSK ⇒ 3.5Gbps/ch
- 16QAM ⇒ 7.0Gbps/ch
- **64QAM ⇒ 10.6Gbps/ch**

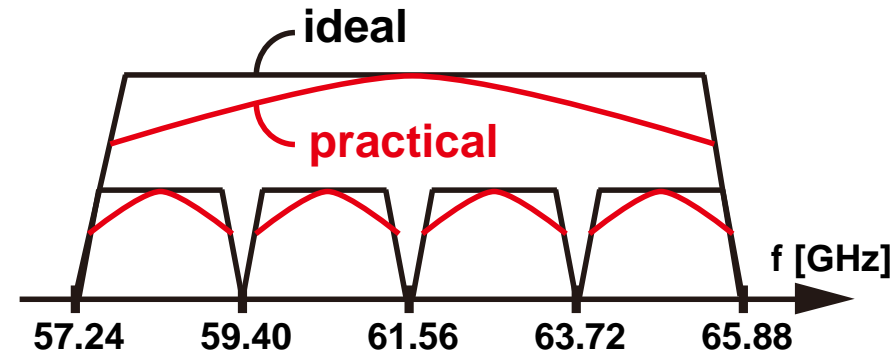


研究目的

- 64QAM通信の実現、通信速度28Gbpsを実現する無線送信回路の開発
- IEEEで定められた4つのチャンネルを束ねて使う
 - 2 channels : 14.08Gbps (16QAM)
 - 3 channels : 21.12Gbps (16QAM)
 - 4 channels : **28.16Gbps** (16QAM)



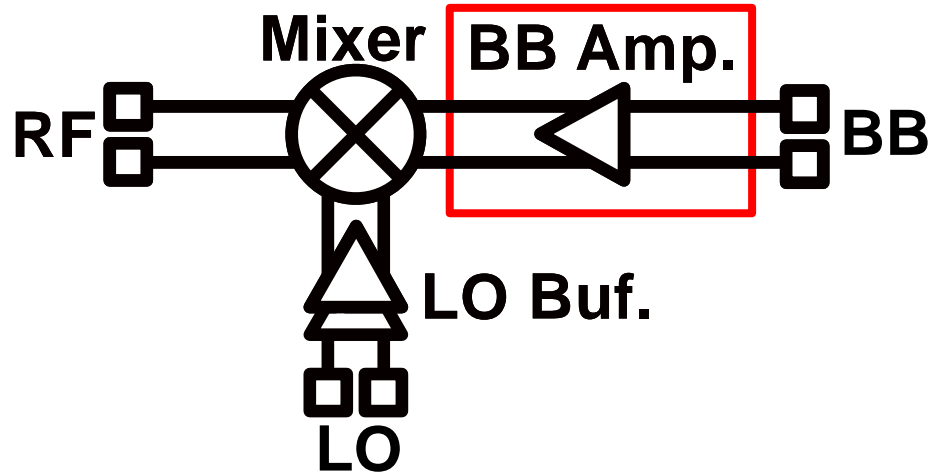
- 60GHz帯では
広帯域の変調信号を用いる



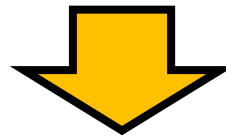
- ベースバンド(BB)帯域に
おける**利得の平坦性**を
広帯域で取ることが必要

Gain Flatness	0dB	1dB	2dB
EVM	-	-22dB	-18dB
Constellation			

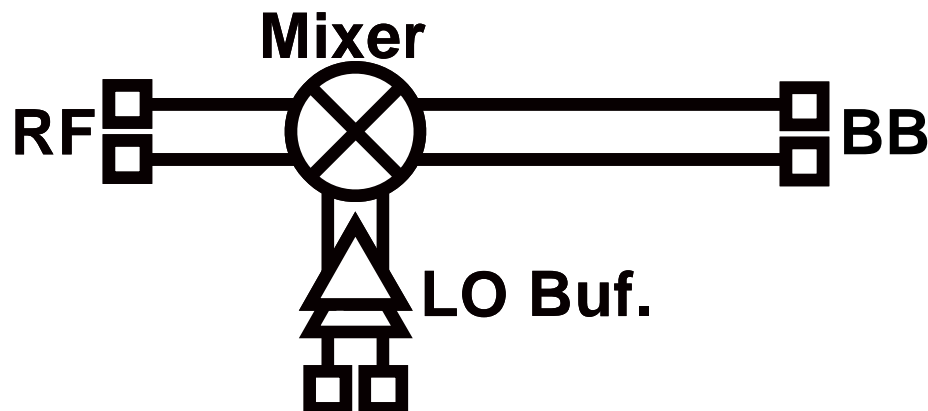
利得の平坦性が悪いと
EVMが劣化



- BB端で50Ωマッチングを取るために50ΩバッファとしてBB Amp.が必要



- BB Amp.のトランジスタの特性により、BB側の利得の平坦性が劣化する

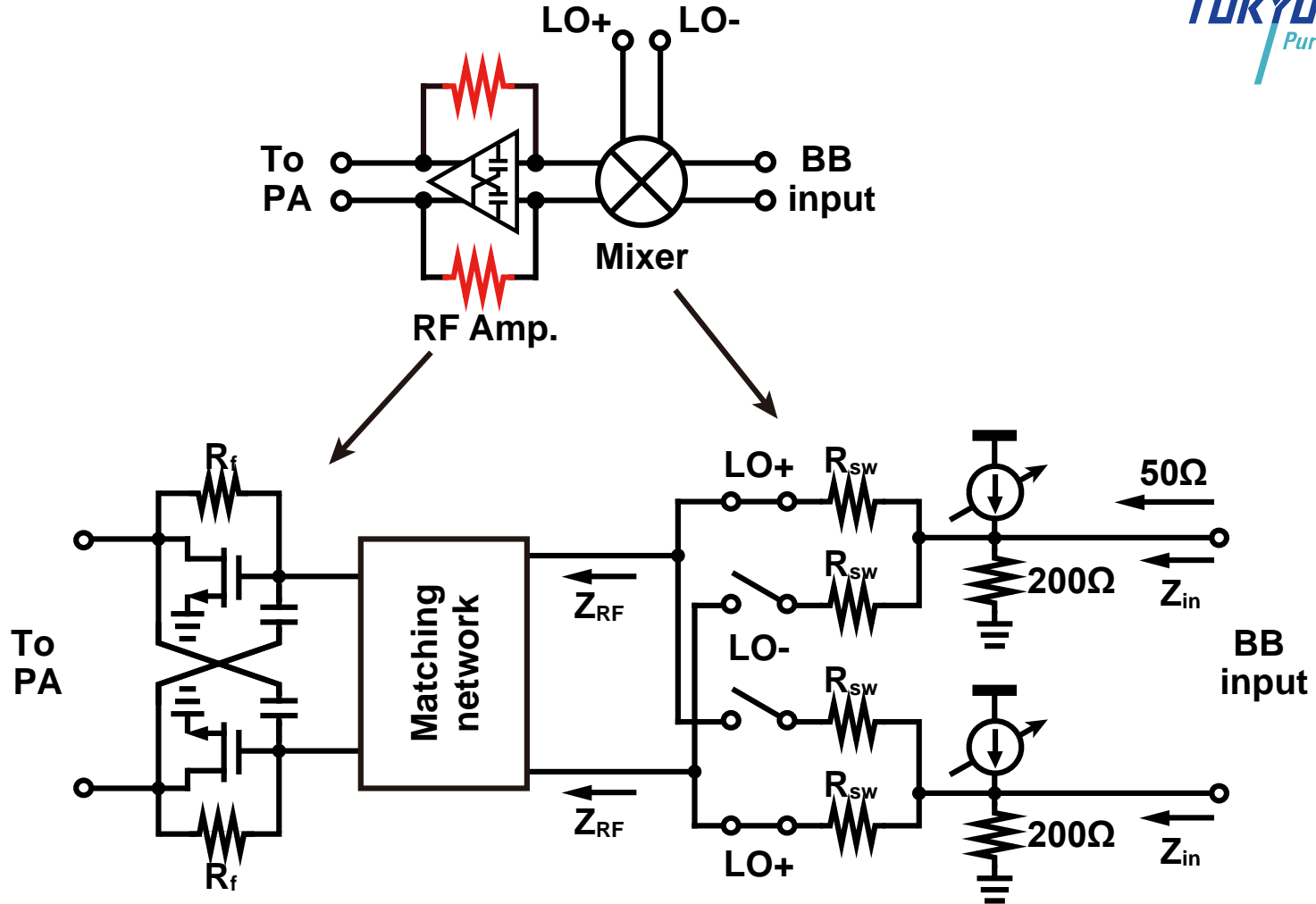


- BB Amp.を除去し、Mixer-first送信回路を採用
- RF帯のインピーダンスを入カインピーダンスへダウンコンバートし広帯域で50Ωマッチングを取る

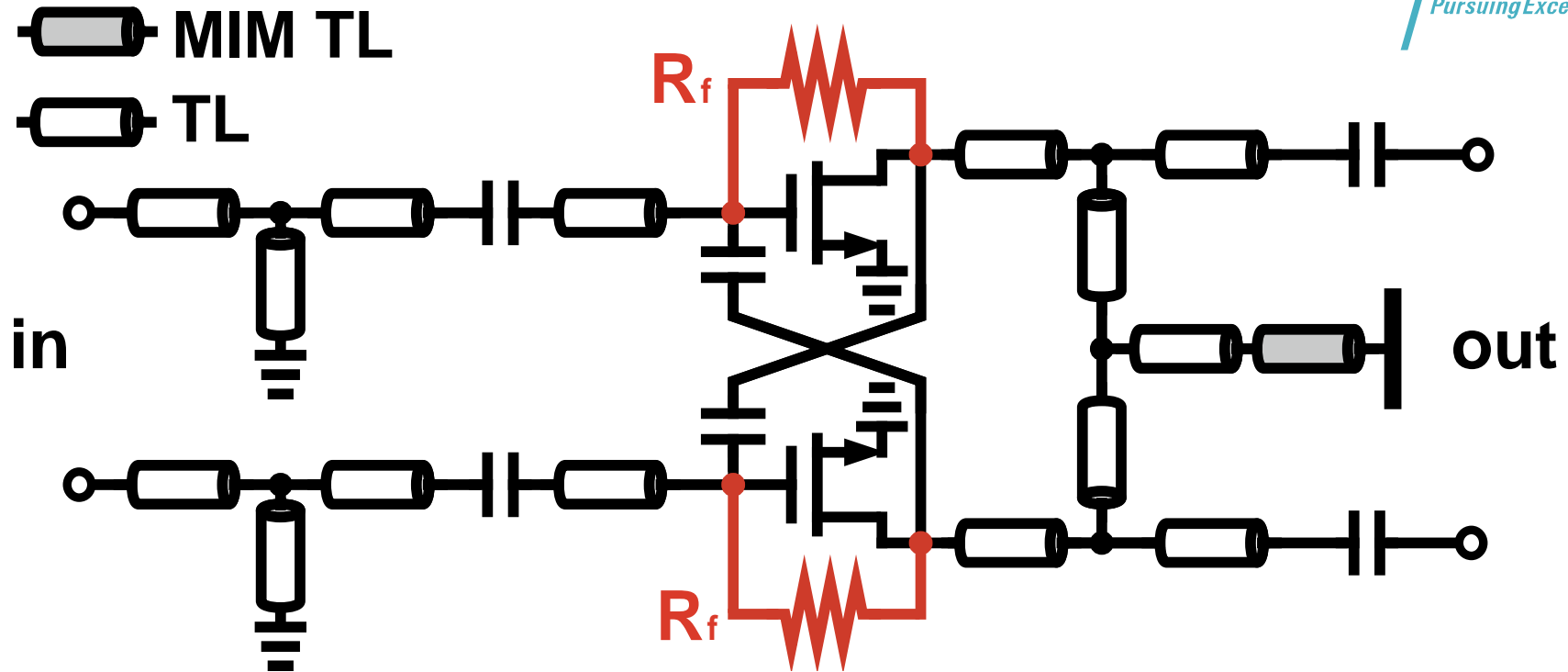


- 広帯域で利得の平坦性と50Ωマッチングを実現可能

BB端入力インピーダンス



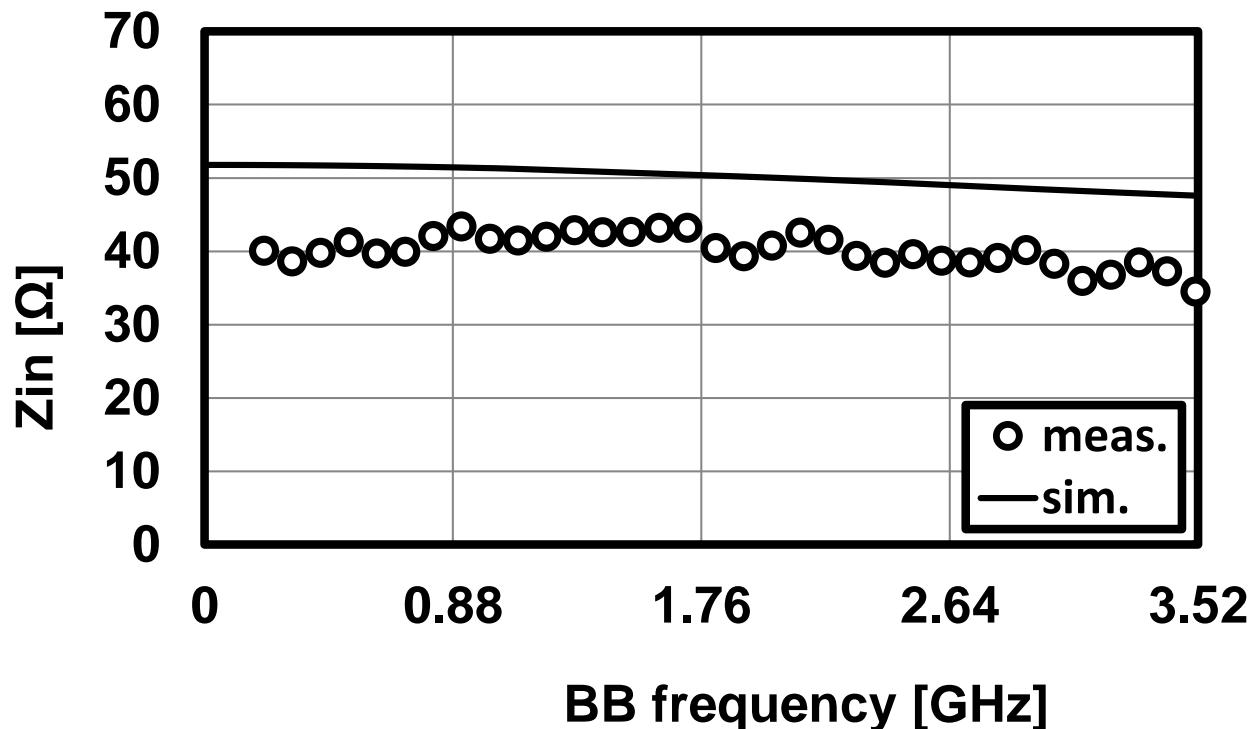
$$Z_{in}(\omega) \approx 200\Omega // \left\{ R_{sw} + \frac{8}{\pi^2} \text{Re}[Z_{RF}(\omega_{LO})] \right\}$$



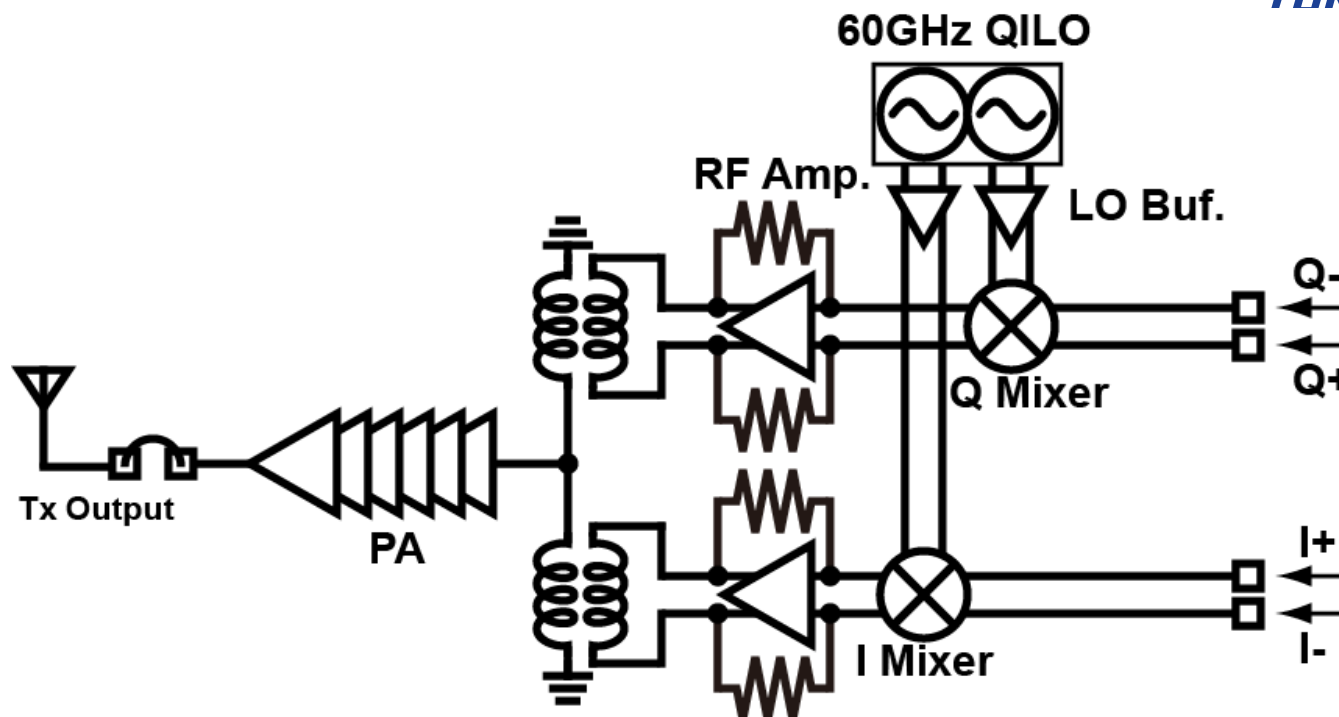
- 抵抗帰還型を使用

- 伝送線路により入力サセプタンスを整合
- 帰還抵抗により入力コンダクタンスを整合

➡ 帰還抵抗を用いることで周波数依存性を小さくできる。

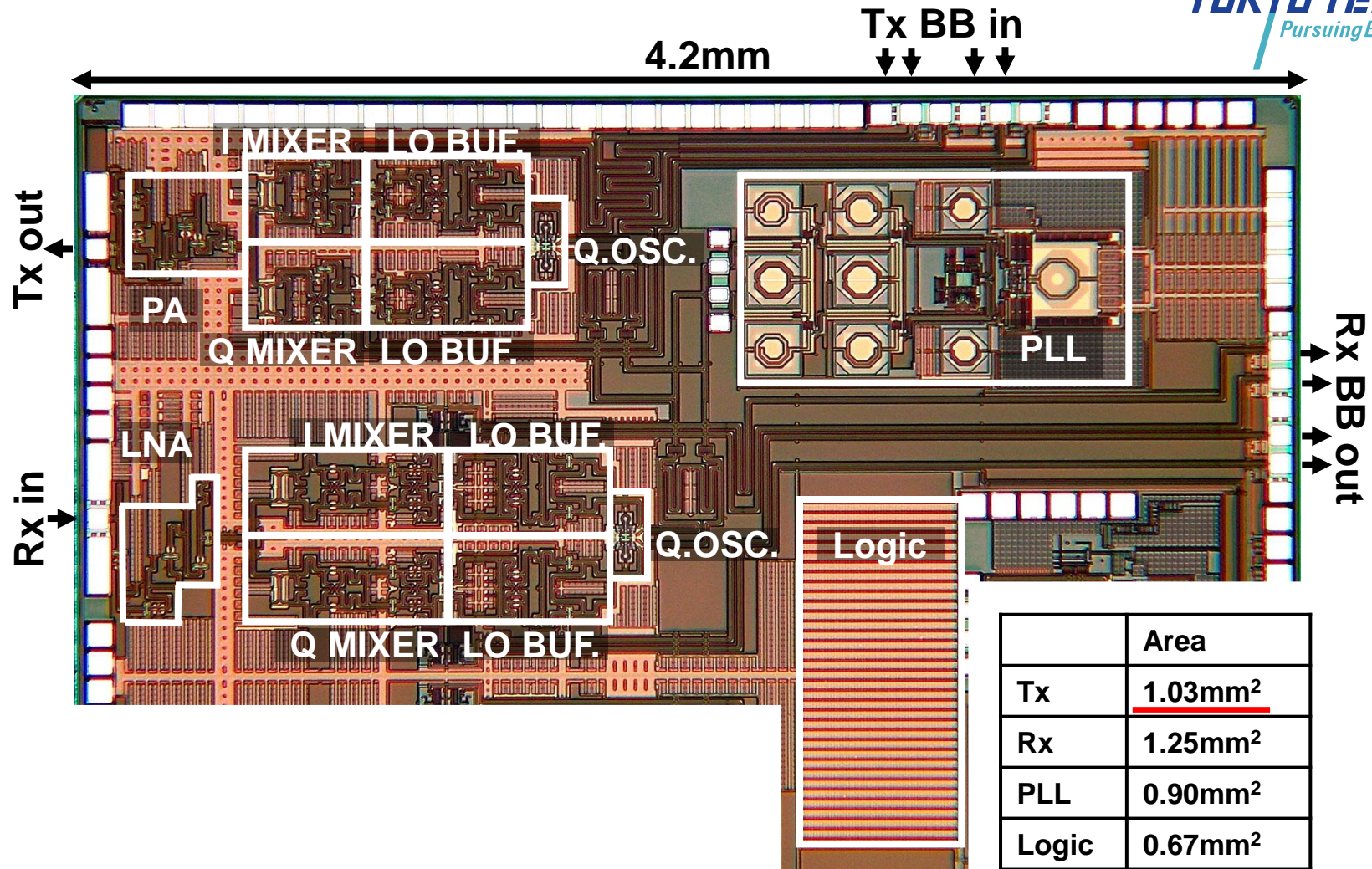


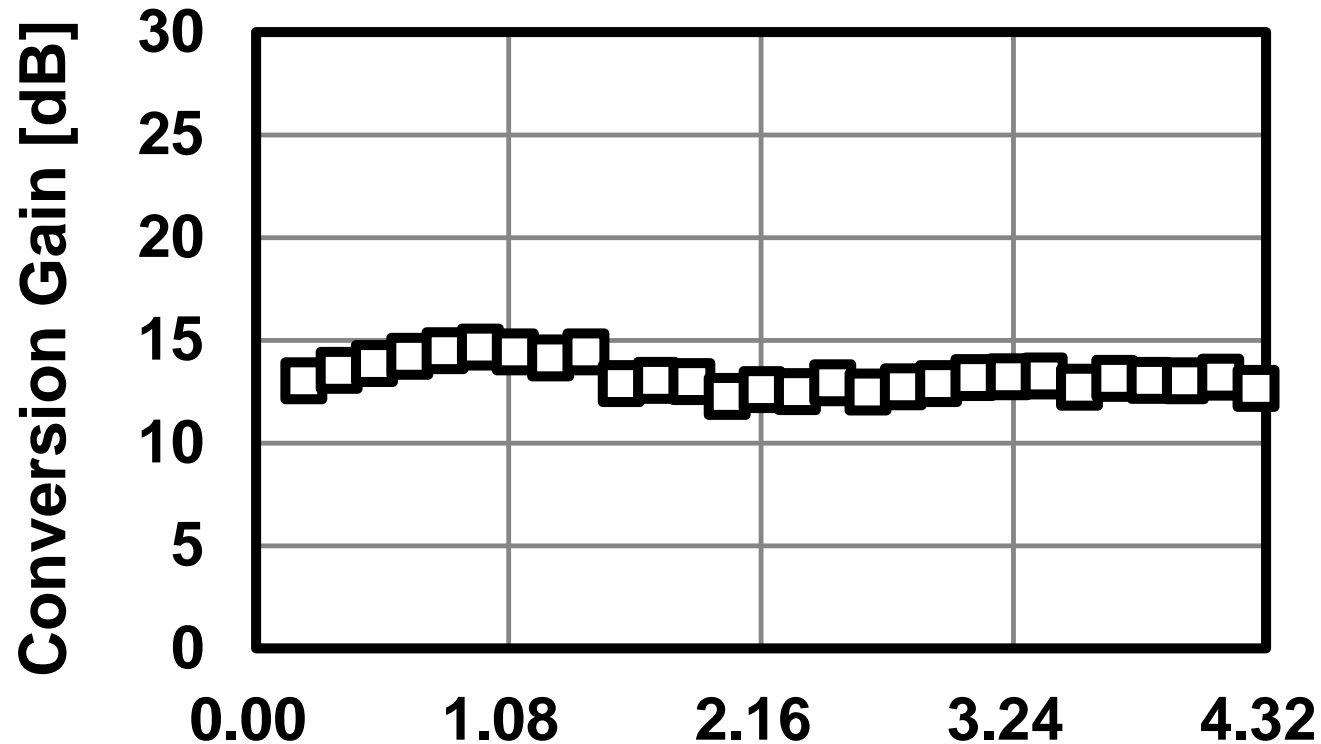
- 広帯域で抵抗値が一定にできた
- 50Ωより少し小さくなった
 - 測定時にMixerに入るLOパワーが大きかった
 - RF Ampの抵抗値が小さい



• Mixer-first 送信回路

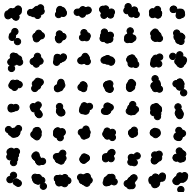
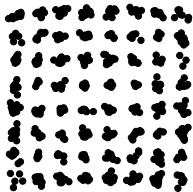
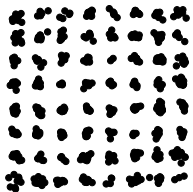
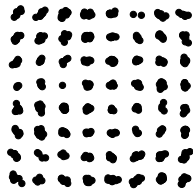
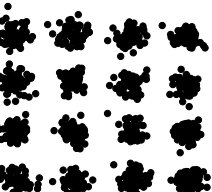
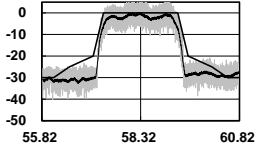
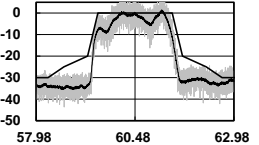
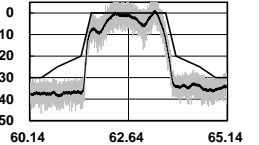
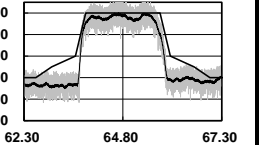
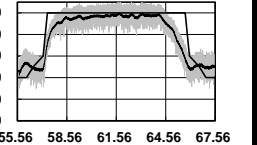
- パッシブミキサ
- 2段 LO電力増幅器
- 差動電力増幅器
- 6段電力増幅器





- Lower側の変換利得
- LO=61.56GHz、BB=10 MHz~4.32 GHz

- 全チャンネルで**64QAM**通信を確認
- 16QAM、4チャンネルボンディングを用いて**28.16Gb/s**の通信速度を達成

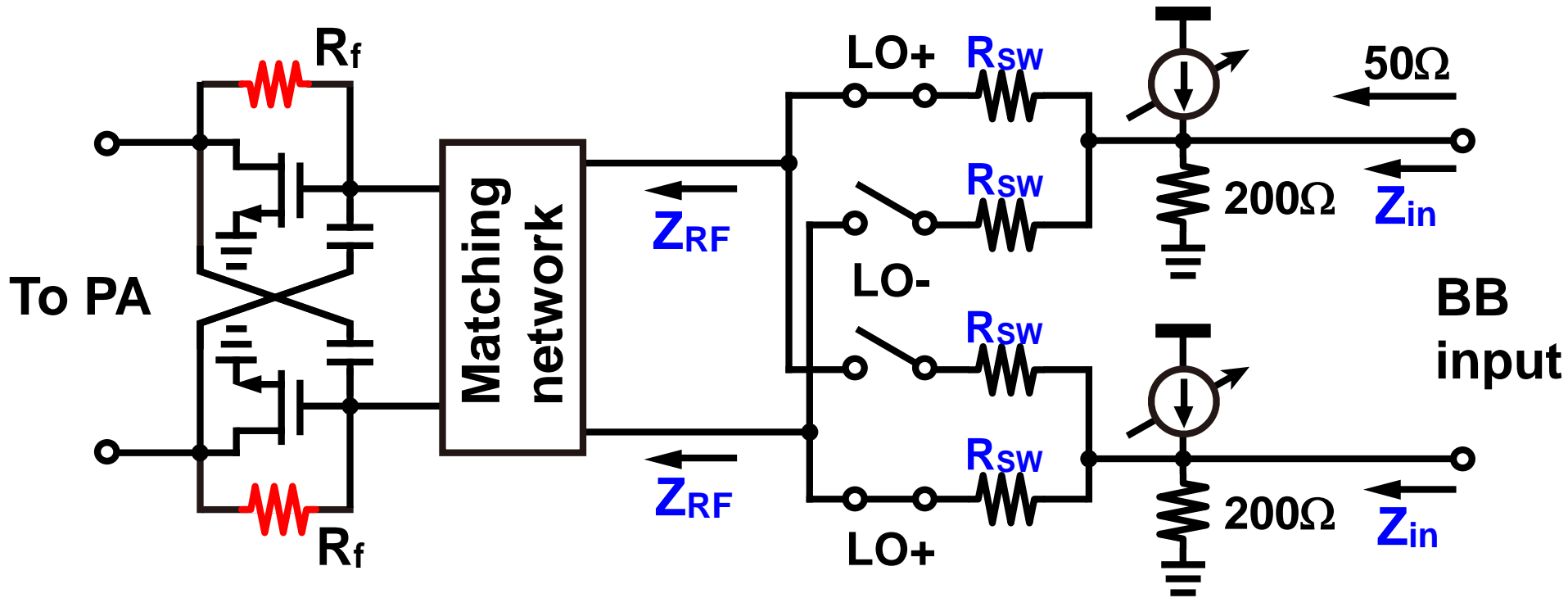
Channel/ Carrier freq.	ch.1 58.32GHz	ch.2 60.48GHz	ch.3 62.64GHz	ch.4 64.80GHz	ch.1-ch.4 Channel bond
Modulation	64QAM				16QAM
Data rate	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s	28.16Gb/s
Constellation					
Spectrum					
TX EVM	-27.1dB	-27.5dB	-28.0dB	-28.8dB	-20.0dB
TX-to-RX EVM	-24.6dB	-23.9dB	-24.4dB	-26.3dB	-17.2dB

• まとめ

- 送信回路をMixer-firstの構成にすることで広帯域で平坦な利得特性とインピーダンス特性を実現した。
- 通信測定では世界初全4チャンネルに対応した**64QAM変調**の貫通を実現した。
- 16QAM変調において4チャンネルボンディングを用いて世界最高の通信速度**28.16Gb/s**を実現した。

Thank you for your attention.

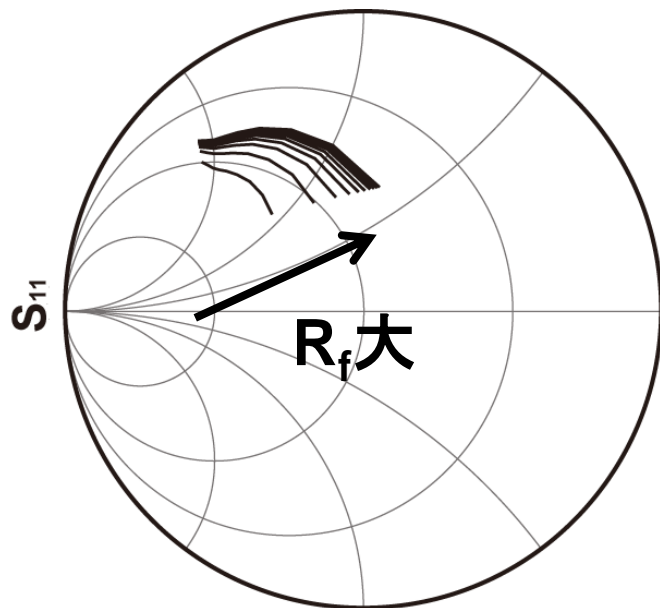
- 研究背景
- 研究目的
- 課題
- **Mixer-first 送信回路**
 - 入力インピーダンスマッチング
 - 抵抗帰還型RF Amp.
- 測定結果
- 結論



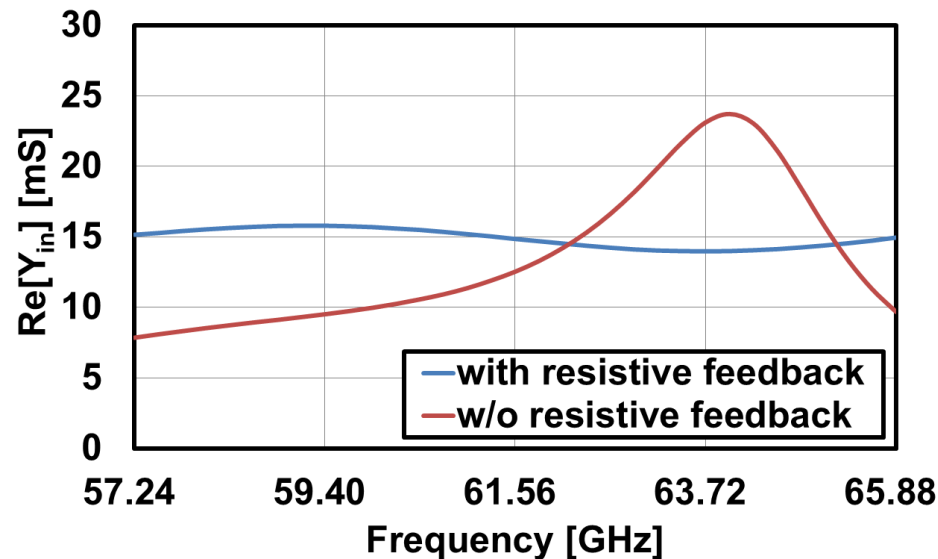
$$Z_{in}(\omega_{BB}) = 200\Omega // \left[R_{sw} + \frac{4}{\pi^2} \{ Z_{RF}(\omega_{BB} + \omega_{LO}) + Z_{RF}(\omega_{BB} - \omega_{LO}) \} \right]$$

Wideband Z_{RF} is realized by R_f -feedback.

*C. Andrews, et al., ISSCC 2010

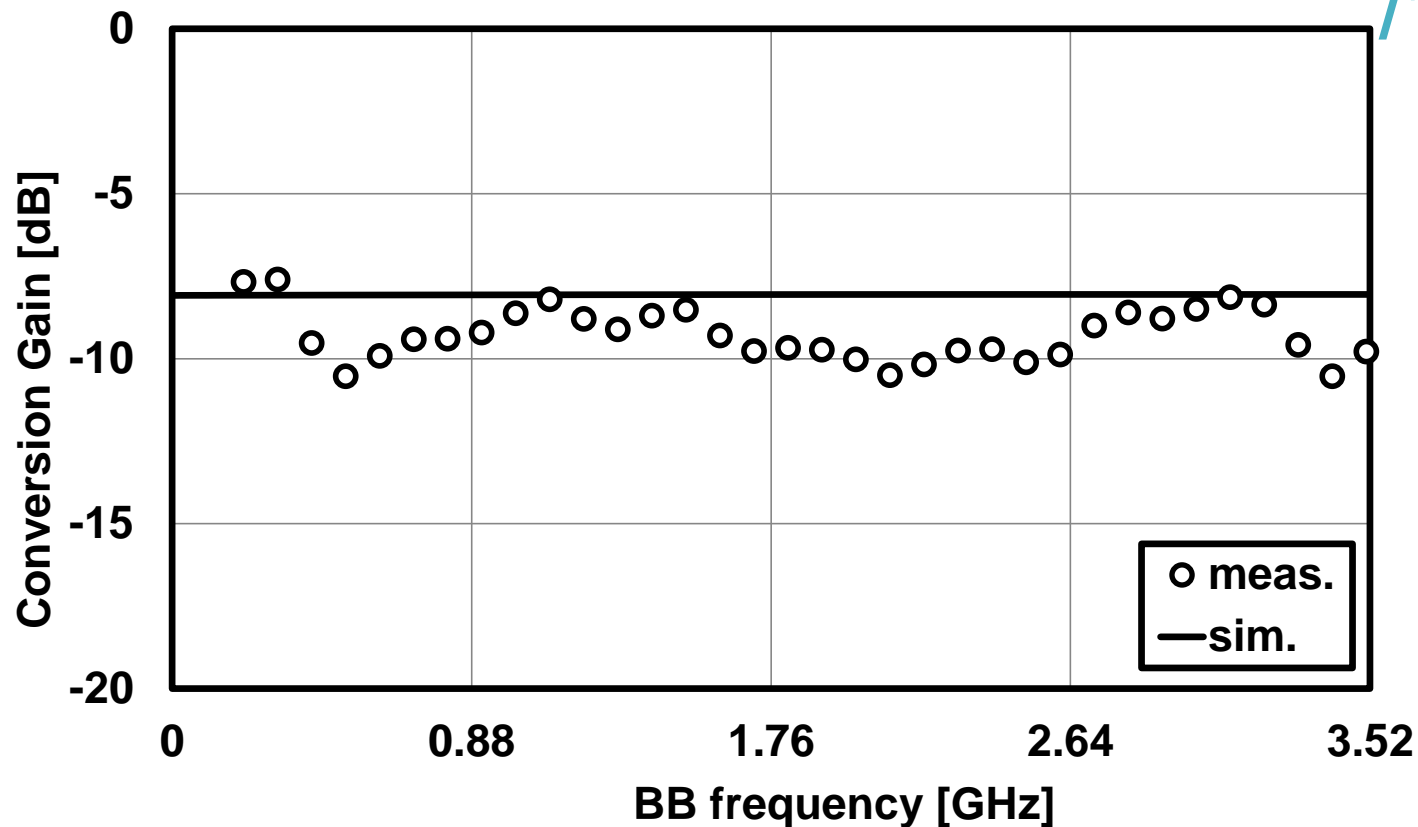


From 57.24 GHz to 65.88 GHz

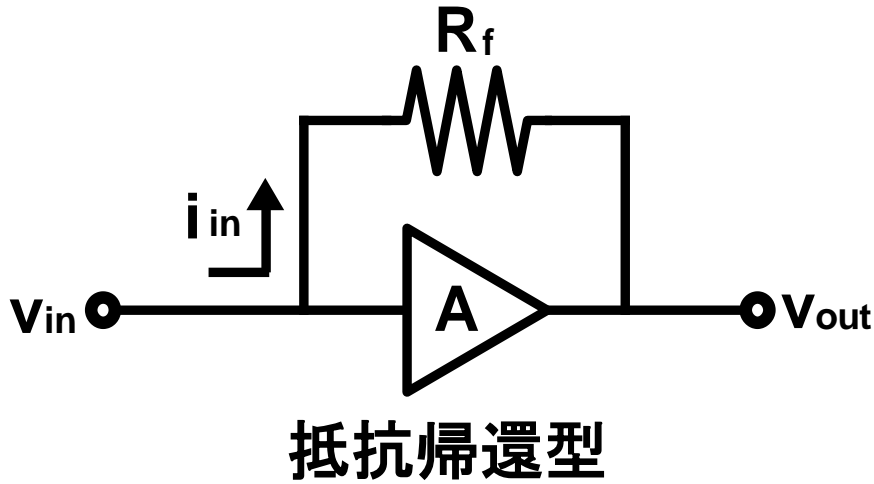


- R_f の値を変えることで入力コンダクタンスを調整可能
- 抵抗帰還型を用いることで入力コンダクタンスの**周波数依存性を小さく**できている。

➡ **広帯域**で入力インピーダンスを**50Ω**にできる

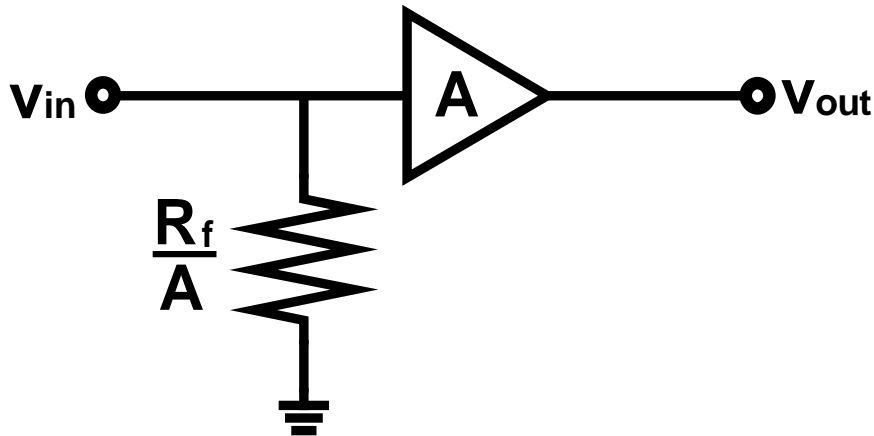


- 変換利得 vs BB周波数
- 良好な利得の平坦性



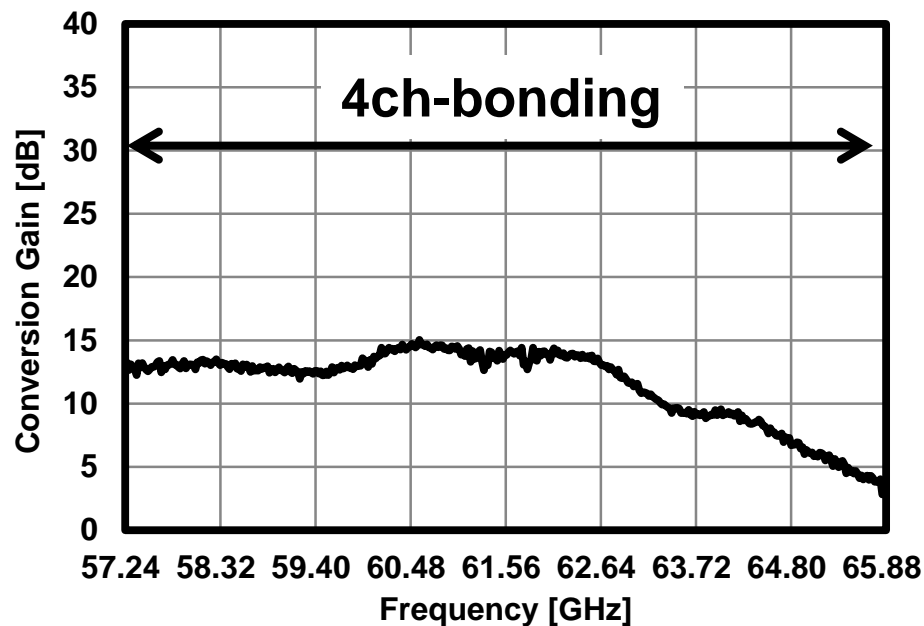
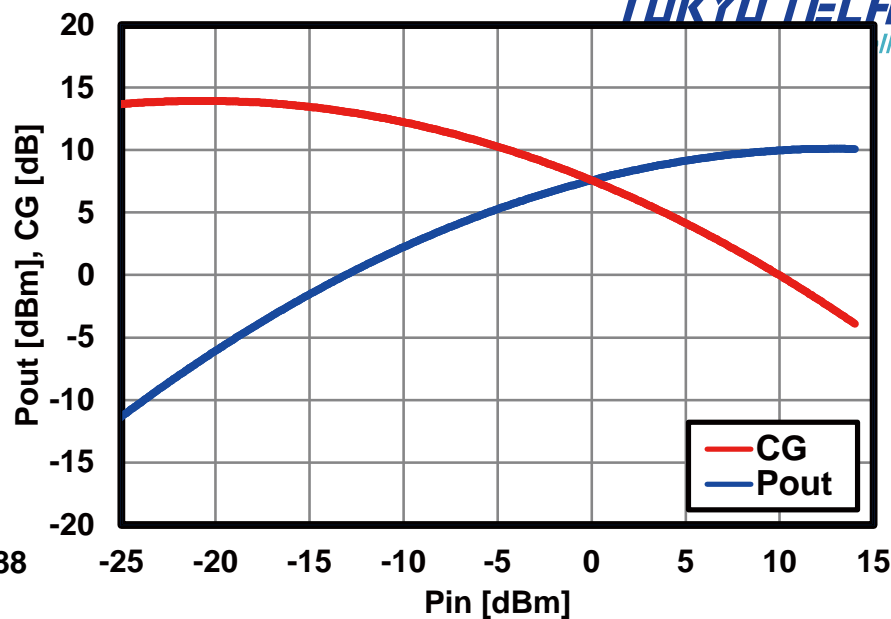
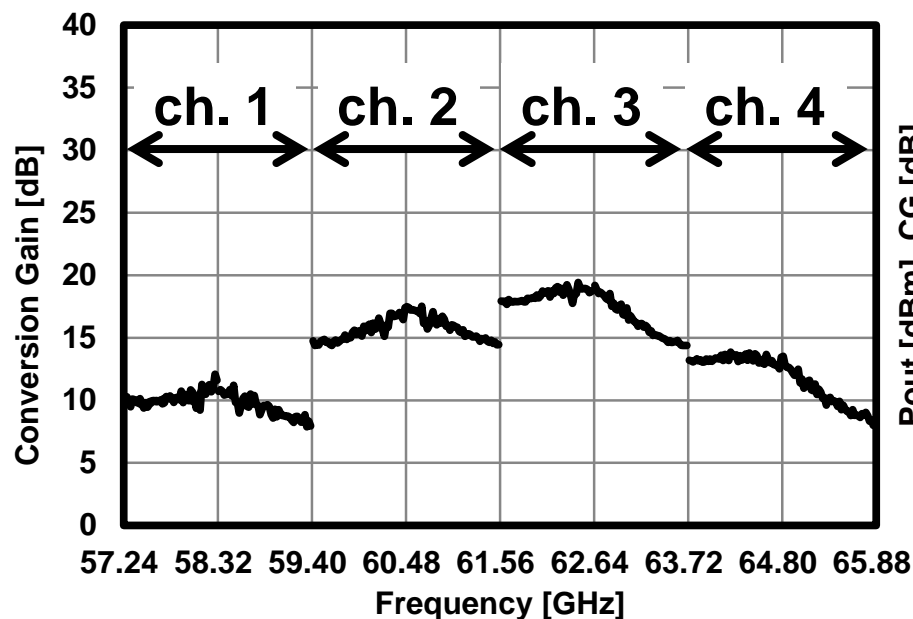
$$i_{in} = \frac{v_{out} - Av_{in}}{R_f}$$

$$G = \frac{i_{in}}{v_{in}} = \frac{1 - A}{R_f} \approx \frac{|A|}{R_f}$$

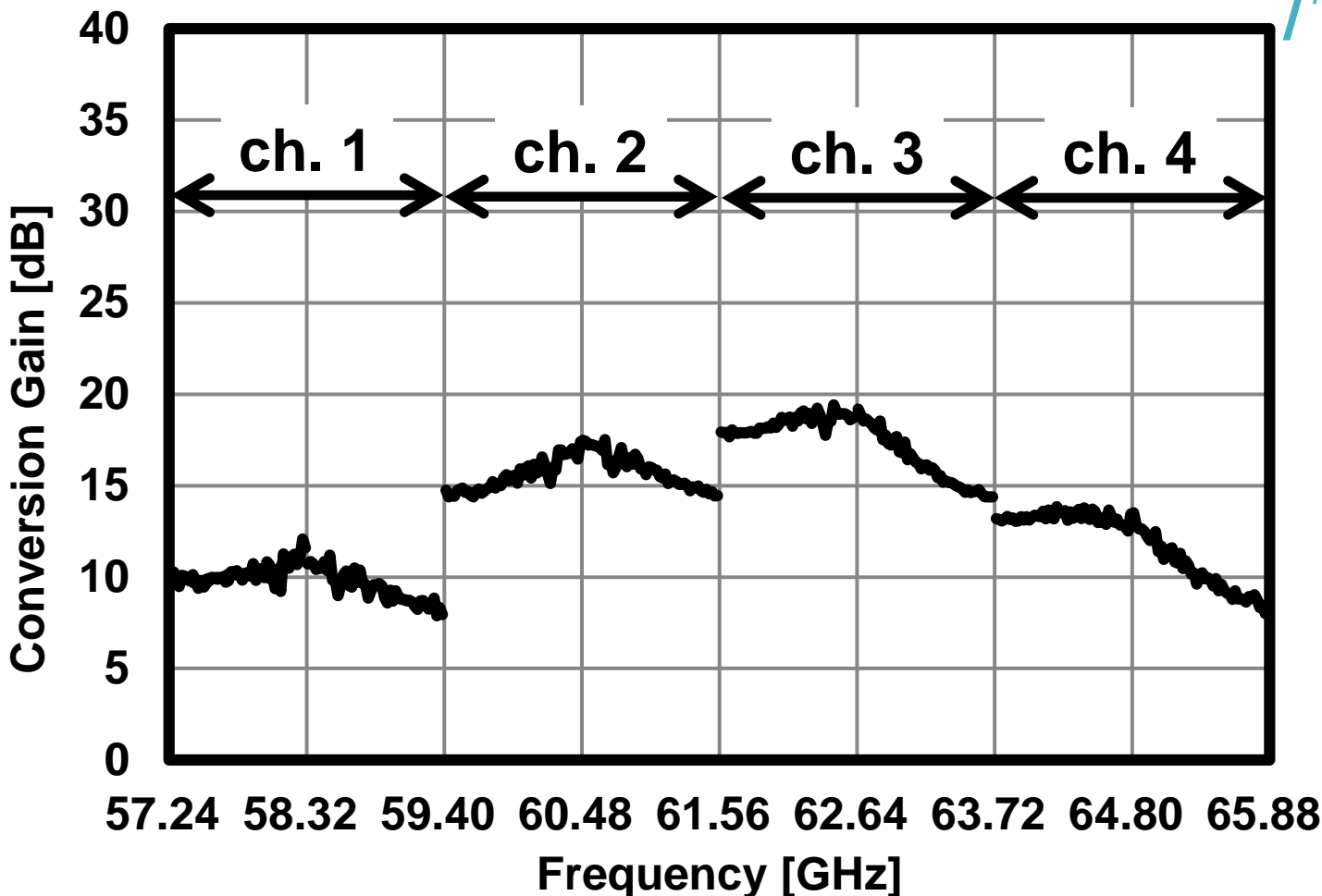


入力コンダクタンスGを
 R_f により調整可能

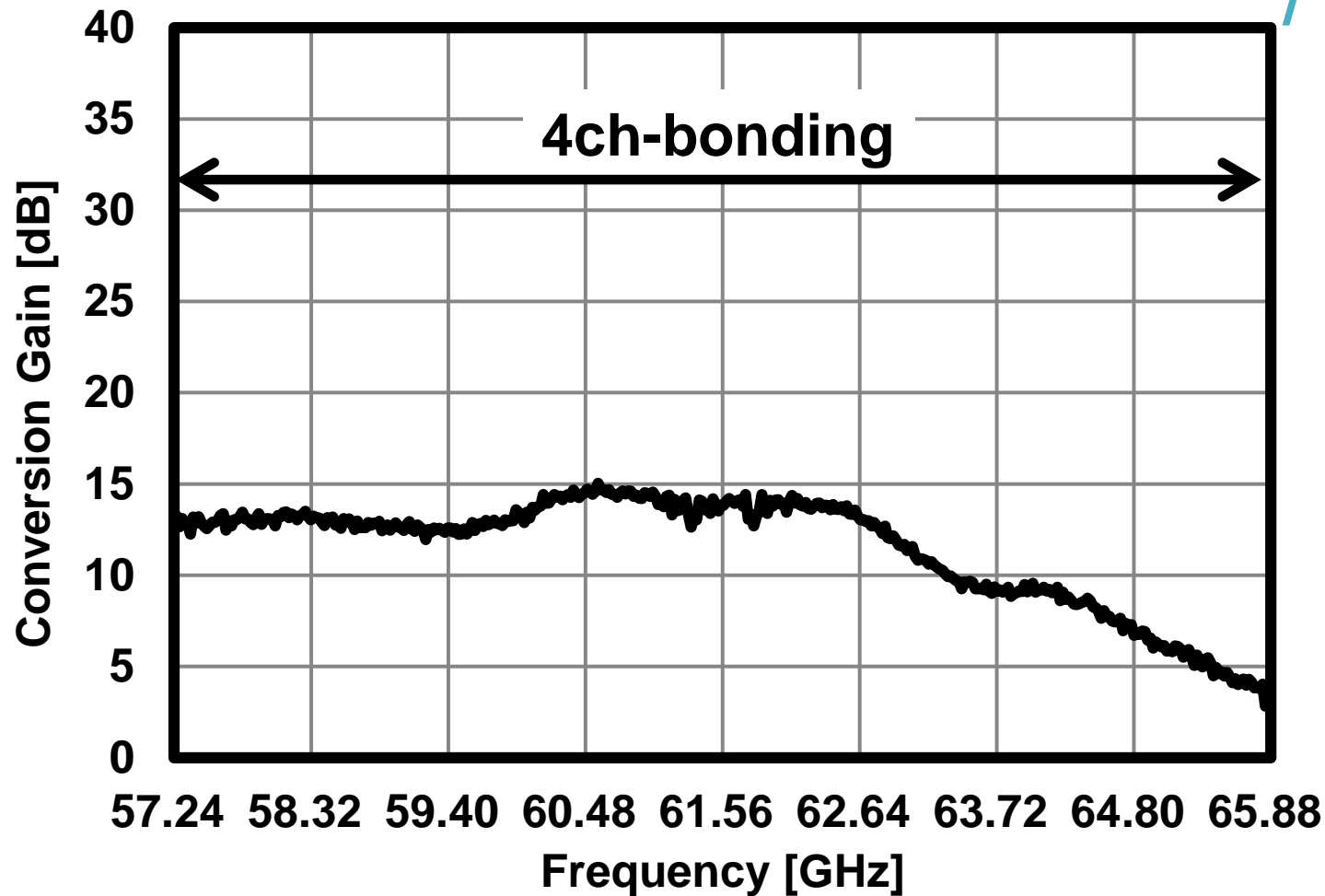
送信回路の測定結果



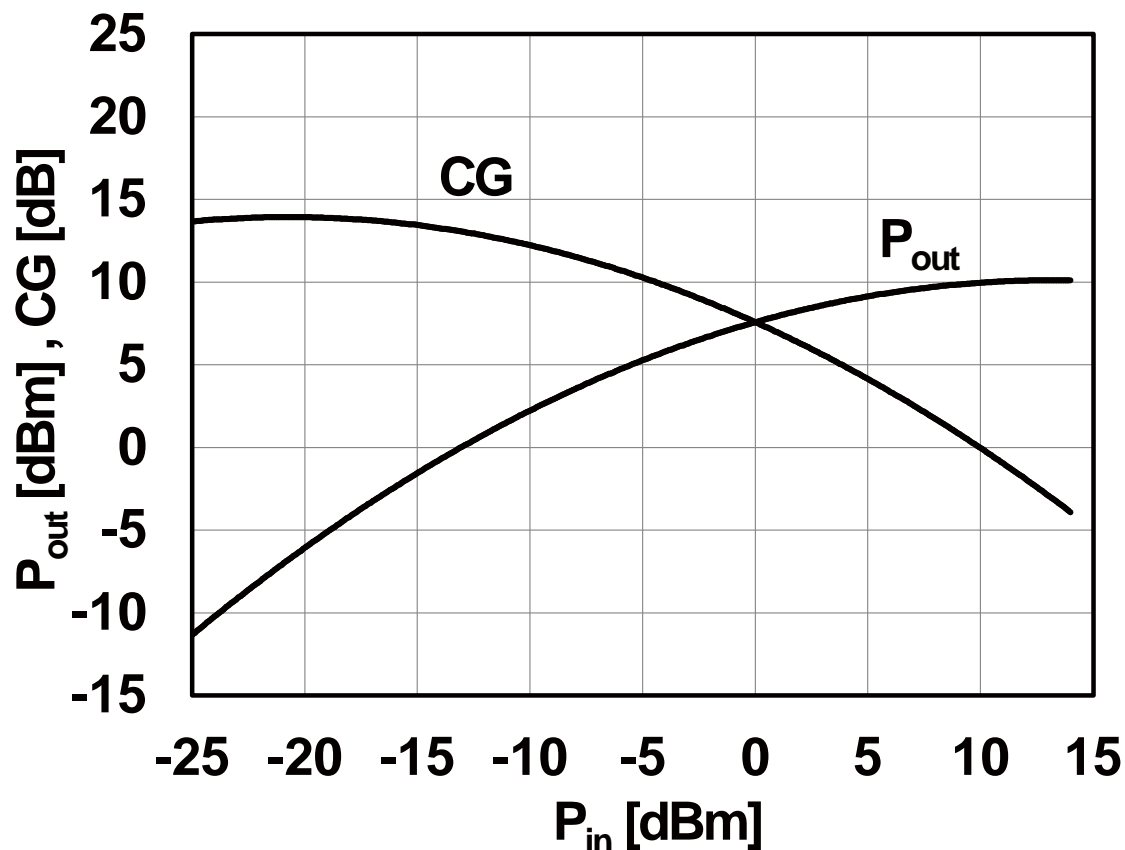
送信回路	測定結果
変換利得	13.5dB
OP _{1dB}	1.4dBm(Ch.2.5)
P _{sat}	10.3dBm(Ch.2.5)



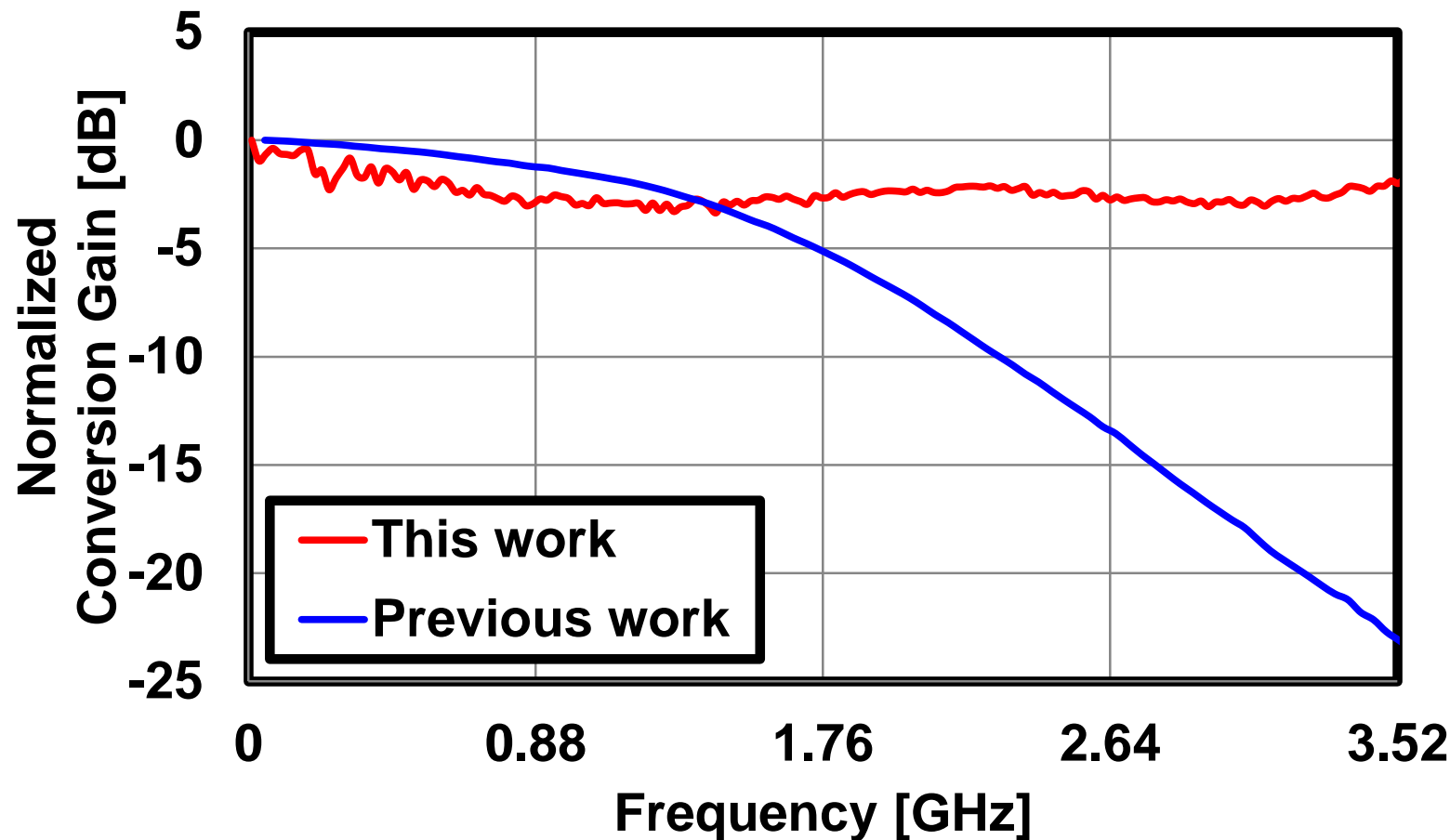
- LO周波数: 58.32 GHz、60.48 GHz、62.64 GHz、64.8 GHz
- BB周波数: 10 MHz~1.08 GHz



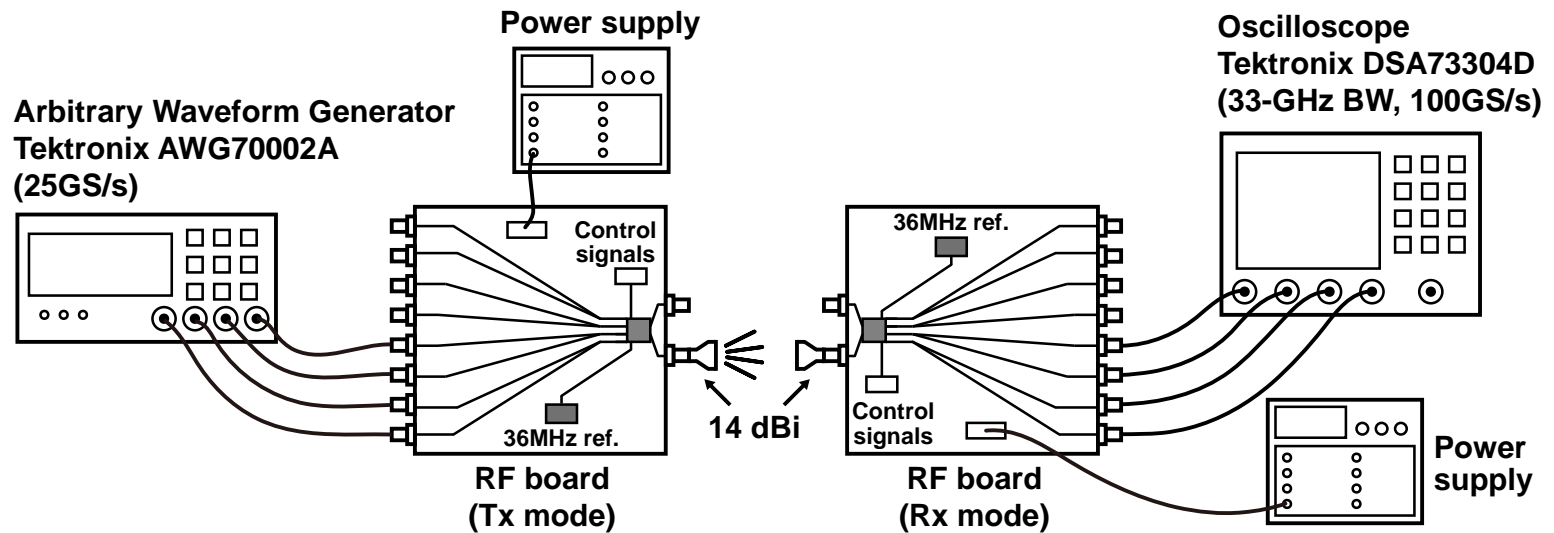
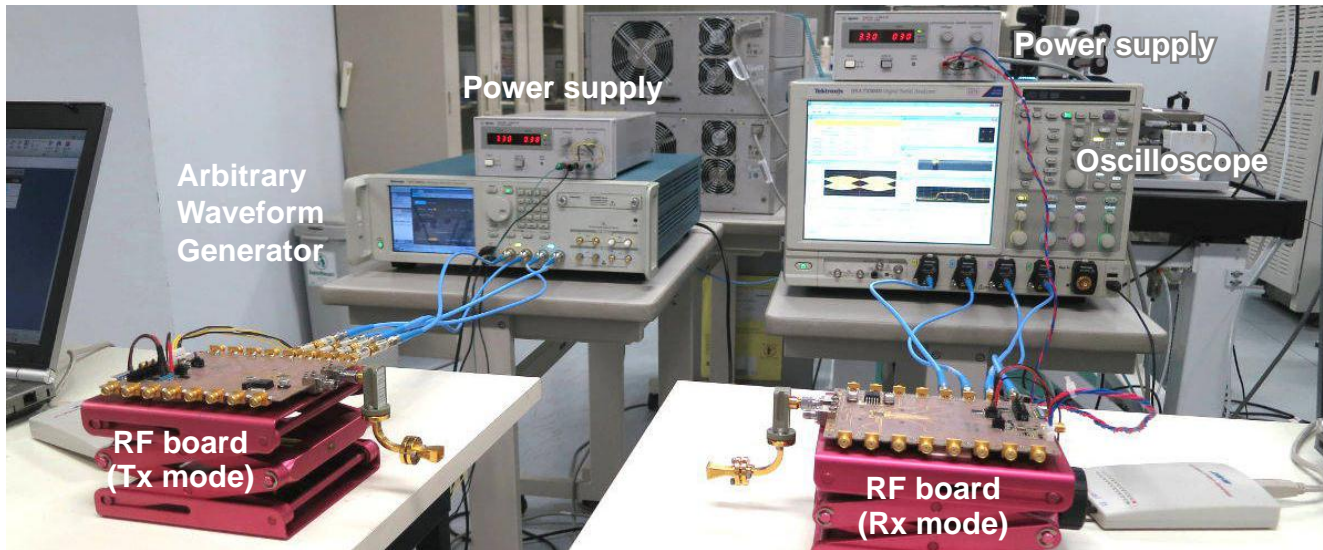
- LO周波数: 61.56 GHz、4chボンディング
- BB周波数: 10 MHz~4.32 GHz



- LO周波数: 61.56 GHz、BB周波数:100 MHz
- 変換利得: 13.5 dB
- OP_{1dB} : 1.4 dBm、 P_{sat} : 10.3 dBm



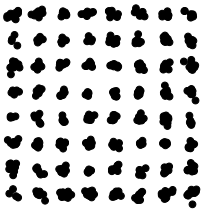
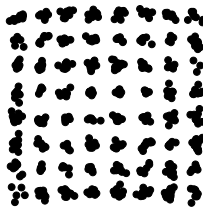
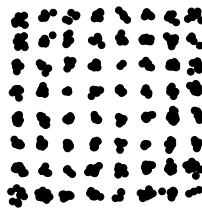
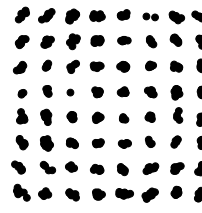
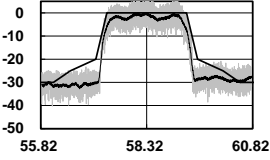
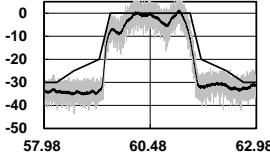
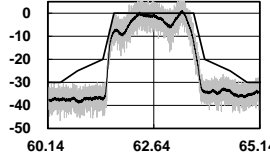
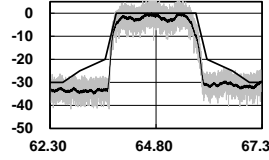
- Lower側変換利得
- LO周波数: 60.48 GHz



Measurement setup for Tx-to-Rx performance
S. Sato, Tokyo Tech

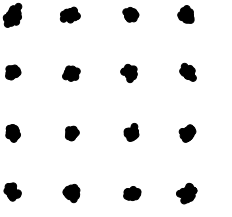
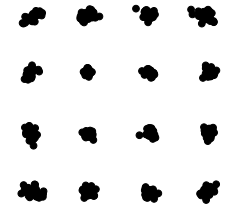
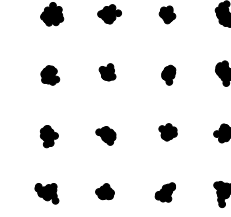
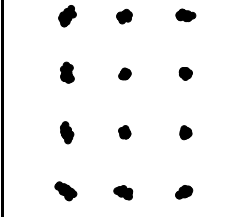
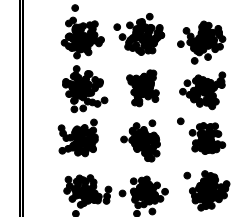
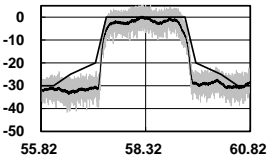
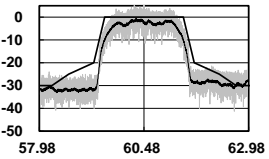
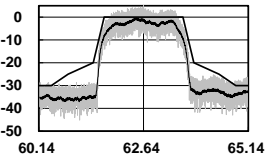
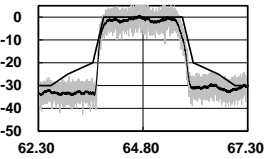
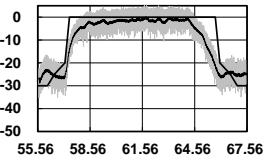
通信測定結果 (64QAM)

- 全チャンネルで**64QAM**通信を確認

Channel/ Carrier freq.	ch.1 58.32GHz	ch.2 60.48GHz	ch.3 62.64GHz	ch.4 64.80GHz
Modula- tion	64QAM			
Data rate*	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s
Constella- tion**				
Spec- trum**				
Back-off	12.3dB	12.0dB	10.3dB	12.0dB
Tx EVM**	-27.1dB	-27.5dB	-28.0dB	-28.8dB
Tx-to-Rx EVM***	-24.6dB	-23.9dB	-24.4dB	-26.3dB

通信測定結果 (16QAM)

- 全チャンネルで通信を確認
- 4チャンネルボンディングを用いて**28.16Gb/s**の通信速度を達成

Channel/ Carrier freq.	ch.1 58.32GHz	ch.2 60.48GHz	ch.3 62.64GHz	ch.4 64.80GHz	ch.1-ch.4 Channel bond
Modulation	16QAM				
Data rate*	7.04Gb/s	7.04Gb/s	7.04Gb/s	7.04Gb/s	28.16Gb/s
Constellation**					
Spectrum**					
Back-off	5.8dB	5.6dB	6.7dB	6.3dB	8.9dB
Tx EVM**	-27.8dB	-27.6dB	-28.4dB	-28.8dB	-20.0dB
Tx-to-Rx EVM***	-24.6dB	-24.1dB	-24.6dB	-27.0dB	-17.2dB
Distance	0.7m	0.6m	0.8m	0.4m	0.07m

- Tx単体のConstellationおよびspectrum
- 全chボンディングでも良好なEVM

Channel/ Carrier freq.	ch.1 58.32GHz	ch.2 60.48GHz	ch.3 62.64GHz	ch.4 64.80GHz	ch.1-ch.4 Channel bond
Modulation	QPSK				
Data rate*	3.52Gb/s	3.52Gb/s	3.52Gb/s	3.52Gb/s	14.08Gb/s
Constellation**					
Spectrum**					
Back-off	5.8dB	4.8dB	3.4dB	5.2dB	8.9dB
Tx EVM**	-28.1dB	-27.7dB	-29.0dB	-29.7dB	-20.1dB
Tx-to-Rx EVM***	-25.3dB	-24.5 dB	-24.5dB	-26.6dB	-17.9dB
Distance	2.4m	2.0m	2.6m	0.9m	0.3m

	Data rate / Modulation	Tx-to-Rx EVM	Integration	Power consumption
Tokyo Tech	11Gb/s(16QAM)	-17dB	65nm, direct-conversion, Tx, Rx, LO, antenna	Tx: 186mW Rx: 106mW PLL: 66mW
SiBeam	7.14Gb/s(16QAM)	-19dB	65nm, 32x32-array heterodyne, Tx, Rx, LO	Tx: 1,820mW Rx: 1,250mW
Tokyo Tech	16Gb/s(16QAM) 20Gb/s(16QAM)	-21dB	65nm, direct-conversion, Tx, Rx, LO, antenna, analog & digital BB	Tx: 319mW Rx: 223mW
IMEC	7Gb/s(16QAM)	-18dB	40nm, direct-conversion, Tx, RX, w/o PLL	Tx: 167mW Rx: 112mW
Panasonic	2.5Gb/s(QPSK)	-22dB	90nm, direct-conversion, Tx, Rx, LO, antenna, analog & digital BB	Tx: 347mW Rx: 274mW
This work	10.56Gb/s(64QAM) 28.16Gb/s(16QAM)	-26dB	65nm, direct-conversion, Tx, Rx, LO	Tx: 251mW Rx: 220mW

世界初の**全4チャンネル対応64QAM**通信を達成

世界最高の通信速度**28.16Gb/s**を達成

Power consumption

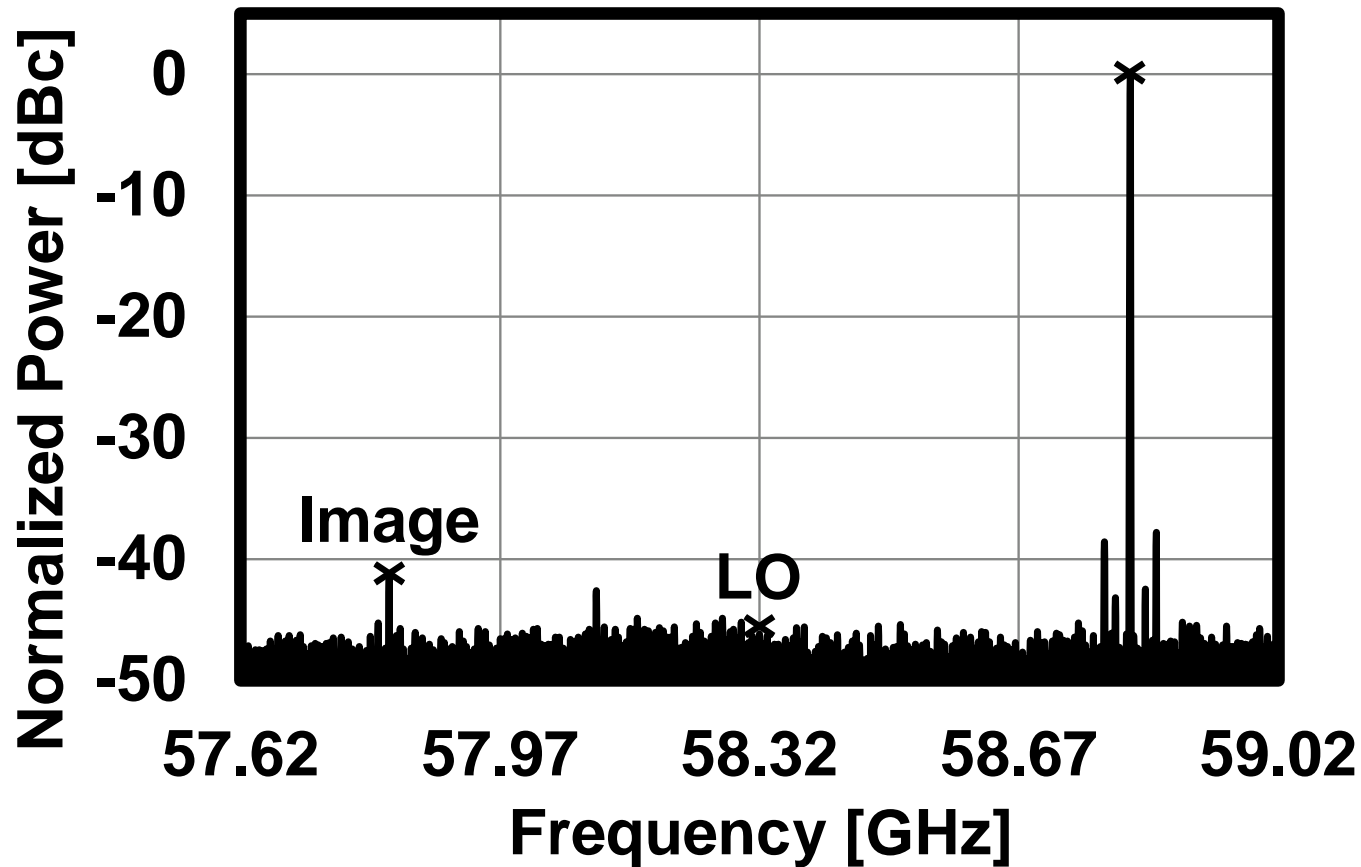
30

	201212 Tx [mW]
ILO	17.88
LO BUF	37.20
BB BUF	-
Mixer	3.24
RF BUF	13.08
PA	115.32
Tx sum	186.72
Tx + PLL	247.92

Power consumption

31

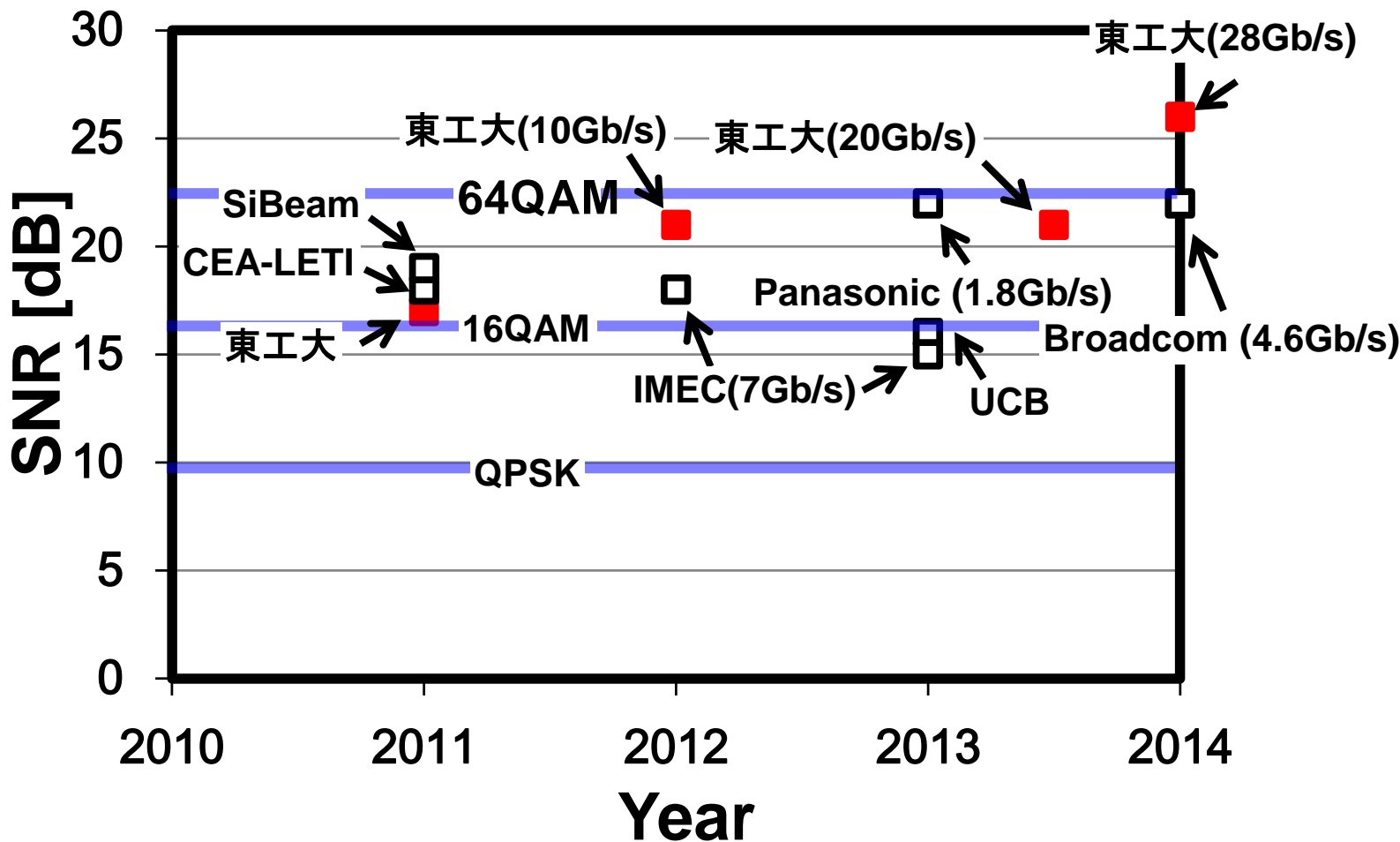
	201108 Tx [mW]	201212 Tx [mW]
ILO	40.36	17.88
LO BUF	49.32	37.20
BB BUF	21.96	-
Mixer	8.88	3.24
RF BUF	35.52	13.08
PA	130.68	115.32
Tx sum	286.72	186.72
Tx + PLL	351.01	247.92

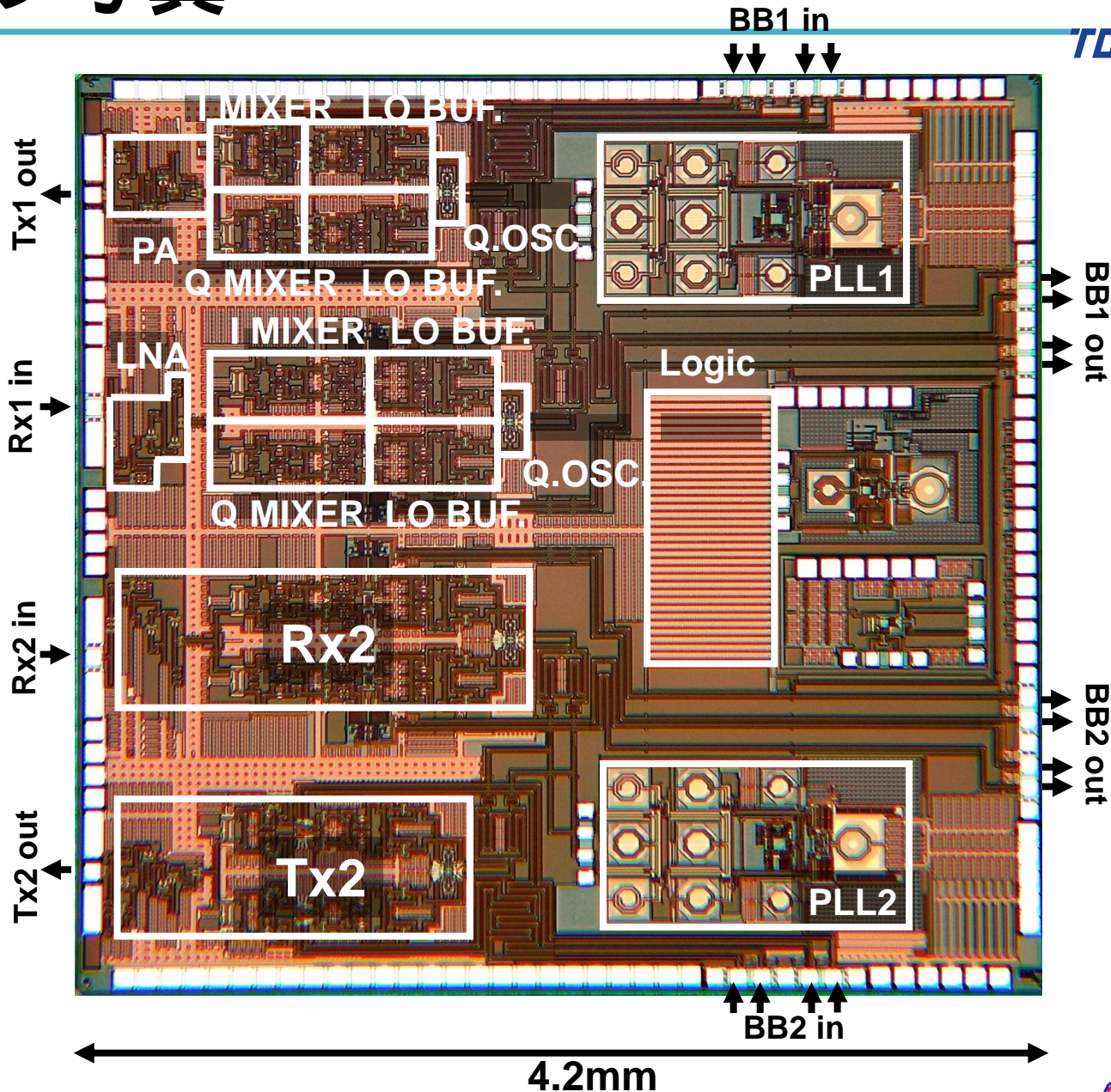


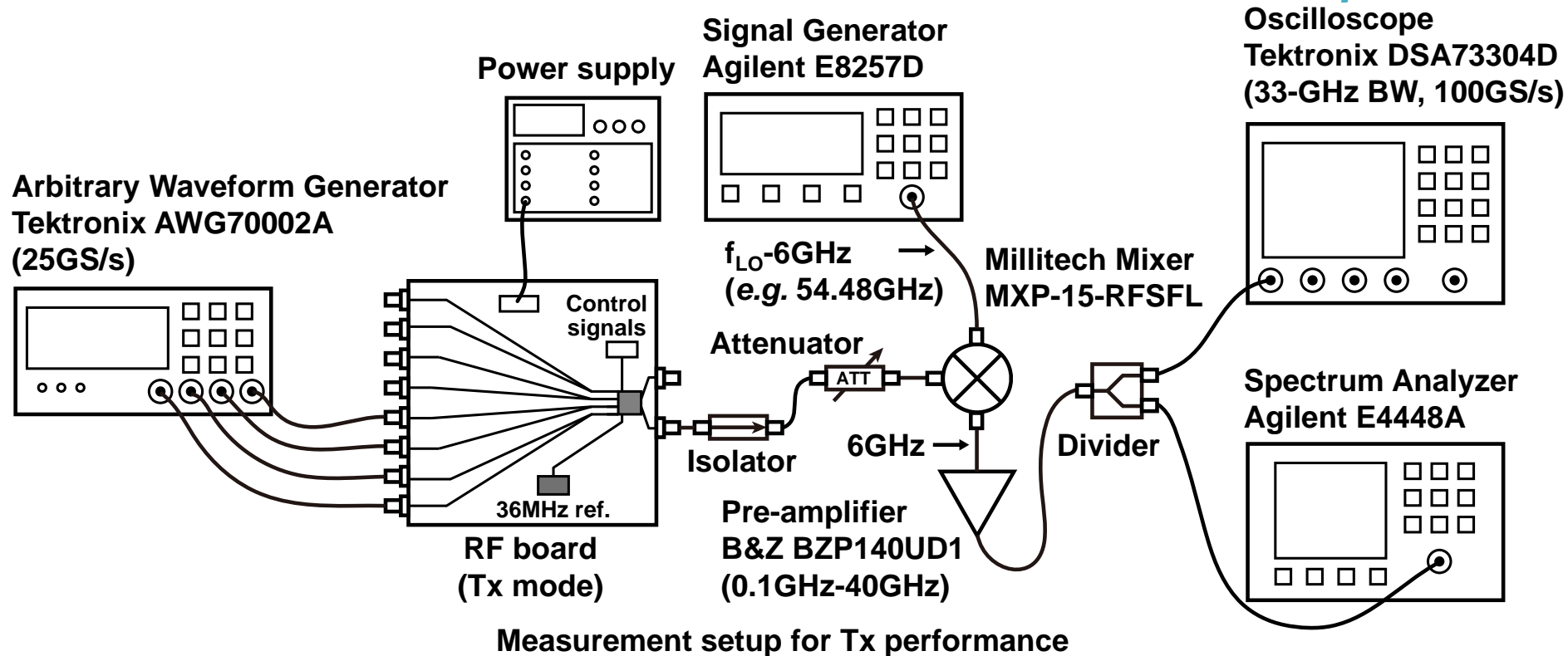
- LO周波数: 58.32 GHz、BB周波数: 500 MHz
- SRR、LO leakageともに-40 dBcを達成

幅広い周波数帯域を使うことで高いデータレートを実現できる

→ **良好なEVM**が必要

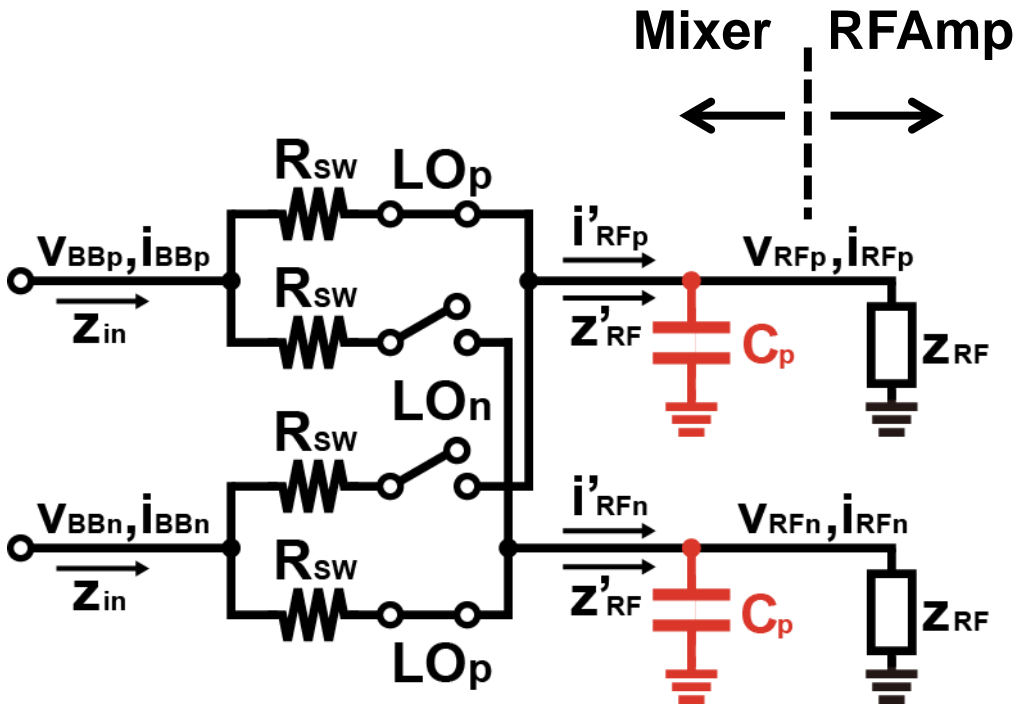






- 入力: AWG (変調波、single tone)
- 出力: オシロ (EVM等)、スペアナ (SRR等)

- Mixer-RFAmp間のマッチングを取る
- 入カインピーダンスを50Ωにする



$$Y_{RF}(\omega) = \frac{1}{Z_{RF}(\omega)} = G + jB$$

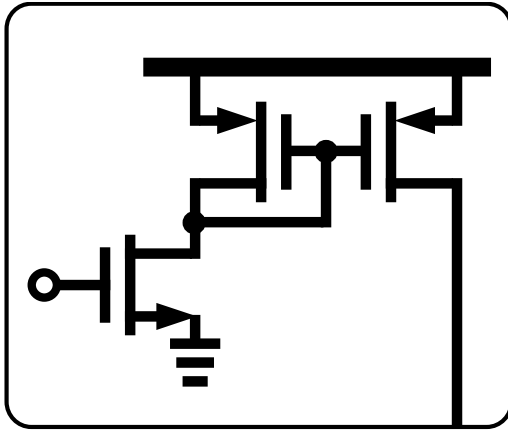
と定義すると

$B = -\omega_{RF}C_p$ のとき出力電力最大

$$\begin{aligned} Z_{in}(\omega) &\approx R_{SW} + \frac{8}{\pi^2} \operatorname{Re}[Z_{RF}(\omega_{LO})] \\ &= R_{SW} + \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{G} \end{aligned}$$

負荷コンダクタンスを調整
することで Z_{in} を50Ωにできる

Up-conversion mixer



DCオフセット調整

