

# モジュレーションアナライザを用いた 電力増幅器のメモリ効果に関する 測定とモデル化

---

東京工業大学 荒木研究室  
今井 寛和

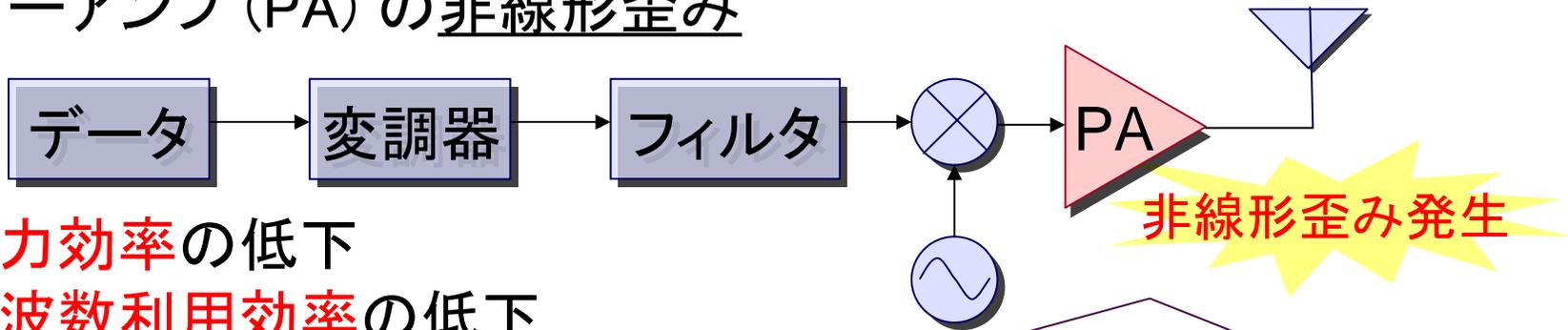
# 発表内容

---

- ✓ 背景・目的
- ✓ メモリ効果とその影響
- ✓ メモリ効果を含まないモデル化
- ✓ メモリ効果を含んだモデル化
  - ✓ メモリ効果に関する測定
  - ✓ 測定結果
  - ✓ モデル化に向けた解析
- ✓ まとめ・今後の課題

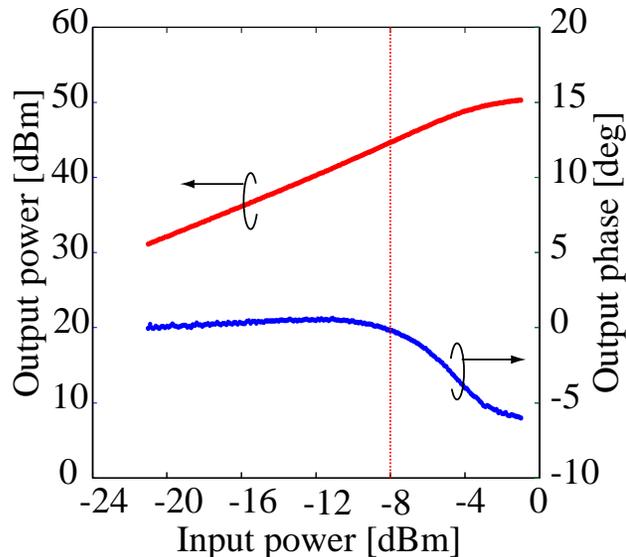
# 背景

## パワーアンプ (PA) の非線形歪み



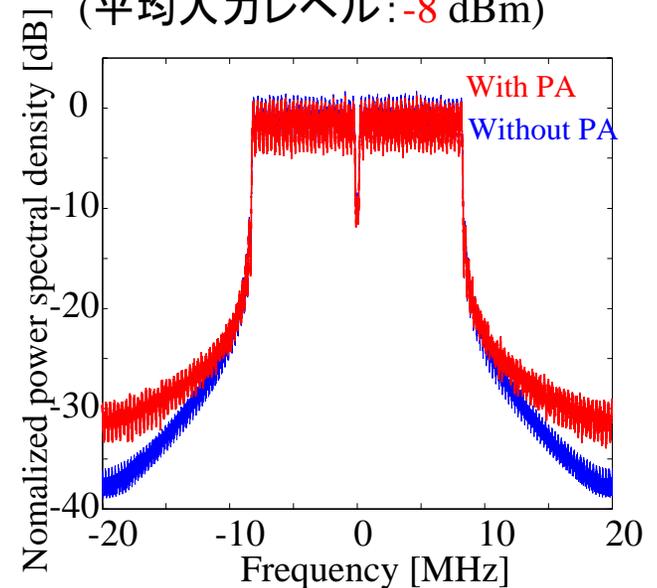
- 電力効率の低下
- 周波数利用効率の低下

1波CW波に対する入出力特性  
( $G = 53$  dB,  $f = 2140$  MHz)



→  
計算機シミュレーション

OFDM信号におけるスペクトル歪み  
(平均入力レベル: -8 dBm)



# 背景・目的

## デジタルプリディストーション (DPD)

- デジタル信号処理により, 事前に歪みの逆特性を加える

### 利点

- ✓ 電力効率が高い
- ✓ 小型化できる

### 欠点

- ✓ PAの非線形歪みを正確にモデル化する必要がある

## 近年の無線通信

- 高いピーク対平均電力比 (PAPR)

- ➡ 電力効率の低下
- ➡ 帯域外スペクトル放射
- ➡ 帯域内EVM劣化

- 信号の広帯域化

- ➡ メモリ効果の影響

PAの非線形歪みを解析し, DPDに向けた正確なモデル化を行う

# メモリ効果とその影響

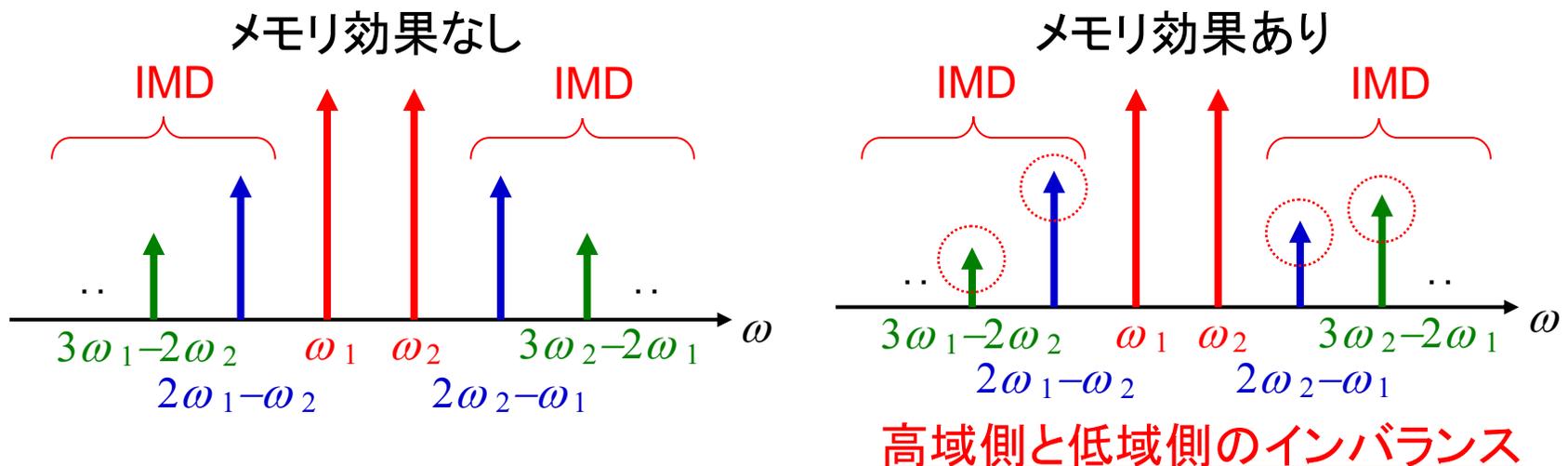
## メモリ効果

入力信号の経歴に依存した非線形性

(ある時間の入出力特性がそれ以前の入力信号の履歴によって変化)

例) 2波のCW波入力における相互変調歪み (IMD)

$$\text{入力信号 } v_{\text{in}} = A \cos \omega_1 t + A \cos \omega_2 t$$



# メモリ効果を含まないモデル化 (1)

1波の入出力特性(振幅・位相特性)を測定

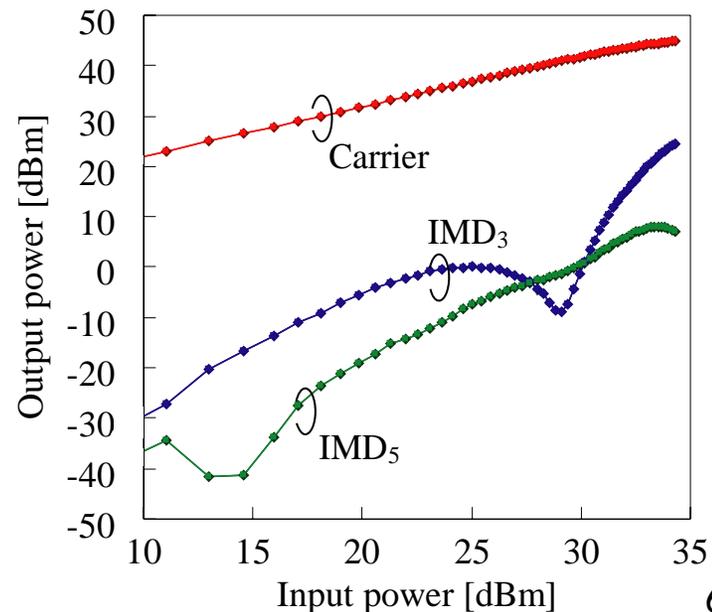
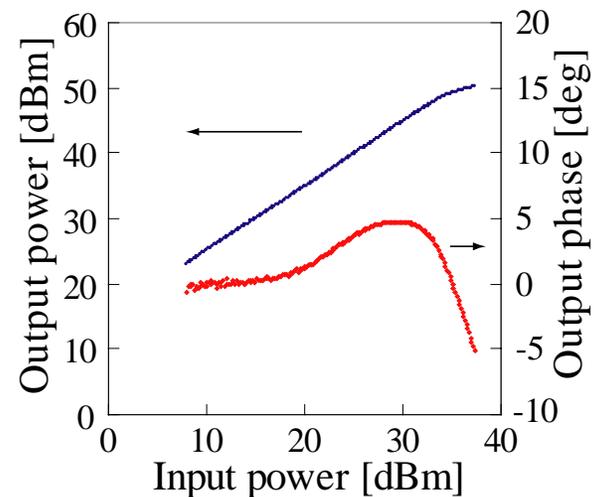


計算機シミュレーション

測定データを補間して2波の入出力特性を算出

$$\begin{aligned}v_{\text{in}} &= A \cos \omega_1 t + A \cos \omega_2 t \\&= 2A \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \\&= e(t) \cos \omega_c t\end{aligned}$$

$$v_{\text{out}} = F_{\text{AM/AM}}(e(t)) \cos(\omega_c t + F_{\text{AM/PM}}(e(t)))$$



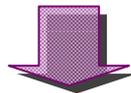
# メモリ効果を含まないモデル化 (2)

## ● 出力信号

$$\begin{aligned}v_{\text{out}} &= F_{\text{AM}}(e(t)) \cos(\omega_c t + F_{\text{PM}}(e(t))) \\ &= F_{\text{AM}}(e(t)) \cos(F_{\text{PM}}(e(t))) \cos \omega_c t - F_{\text{AM}}(e(t)) \sin(F_{\text{PM}}(e(t))) \sin \omega_c t \\ &= I(e(t)) \cos \omega_c t - Q(e(t)) \sin \omega_c t\end{aligned}$$

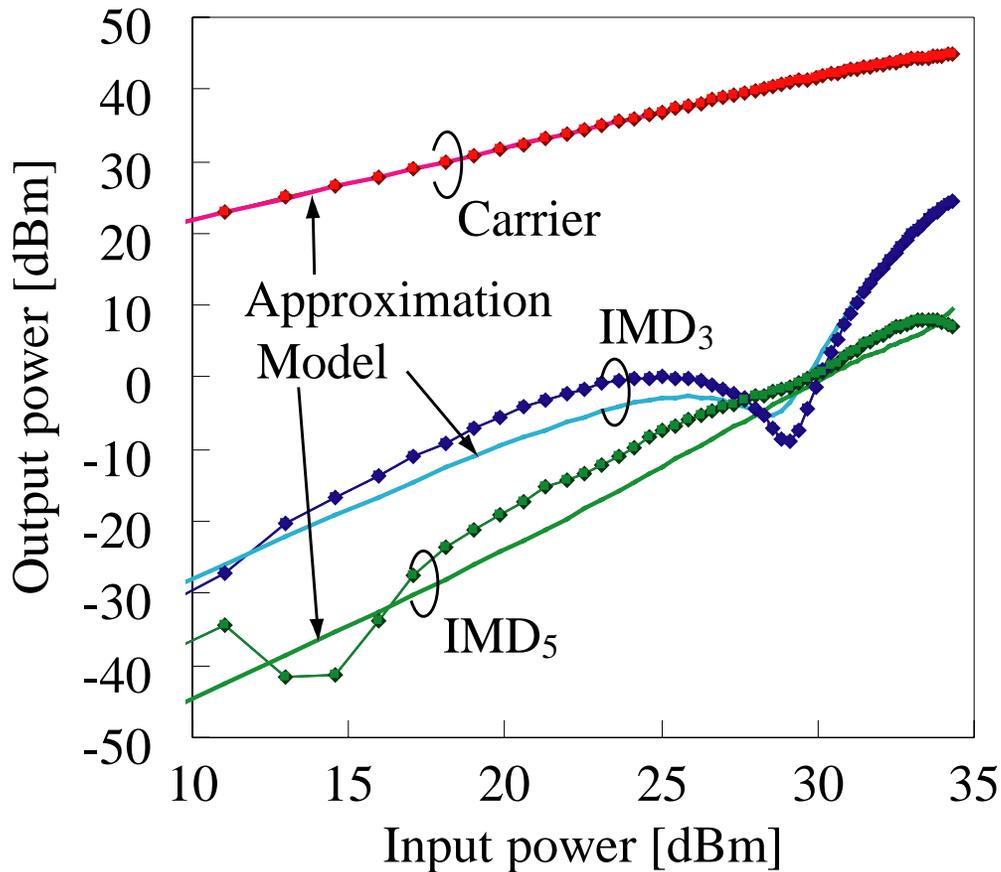
$$I(x) = i_1 x + i_3 x^3 + i_5 x^5$$

$$Q(x) = q_2 x^2 + q_4 x^4 + q_6 x^6$$



同相成分 (I) と直交成分 (Q) に分け, それぞれを多項式近似 (最小二乗法) し, その係数から各周波数成分の振幅を算出

# シミュレーション結果

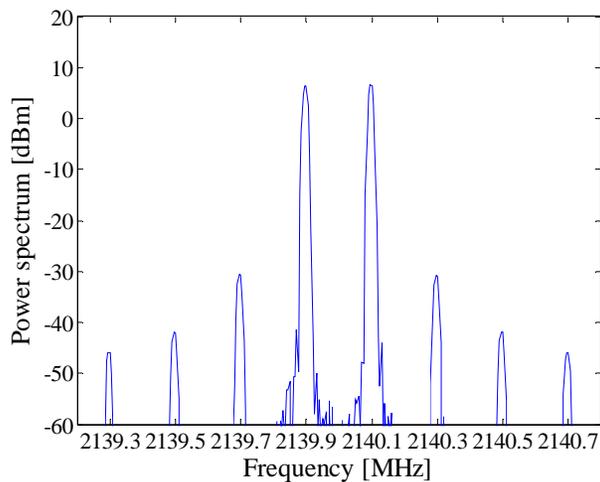


- 基本波の一致
- IMD<sub>3</sub>のディップの位置と傾きの一致
- IMD<sub>5</sub>の傾きの一致

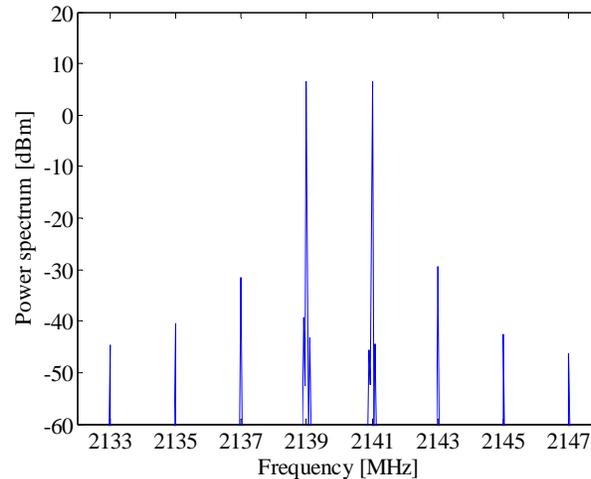
✓2波の離隔周波数に依存しない  
✓IMDそれぞれの高域側と低域側のインバランスは表現できない

# スペクトルのインバランス

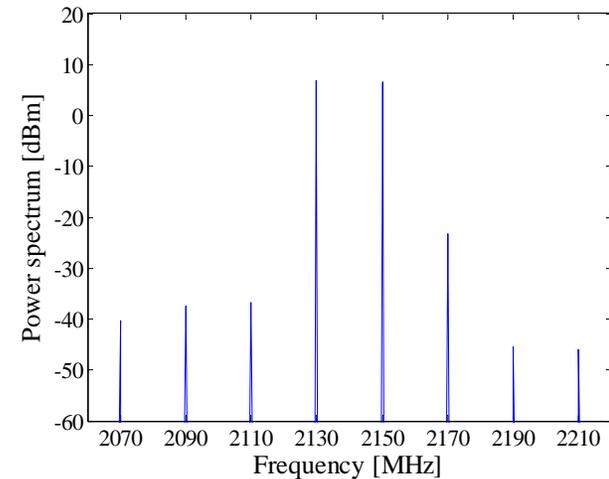
## スペクトルアナライザによる2波のCW波のスペクトル



離隔周波数 200 kHz



離隔周波数 2 MHz



離隔周波数 20 MHz



小

離隔周波数

大

信号の**広帯域化**に伴い、顕著に現れる

# メモリ効果を含んだモデル化

入力信号エンベロープの時間微分値の導入

➡ 離隔周波数に依存したモデル

$$\begin{aligned} e'(t) &= \frac{d}{dt} 2A \cos \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \\ &= -A(\omega_2 - \omega_1) \sin \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t \end{aligned}$$

振幅・位相特性ともに $e(t)$ と $e'(t)$ をパラメタに持つ関数と考える

● 出力信号

$$\begin{aligned} v_{\text{out}} &= F_{\text{AM}}(e(t), e'(t)) \cos(\omega_c t + F_{\text{PM}}(e(t), e'(t))) \\ &= F_{\text{AM}}(e(t), e'(t)) \cos(F_{\text{PM}}(e(t), e'(t))) \cos \omega_c t \\ &\quad - F_{\text{AM}}(e(t), e'(t)) \sin(F_{\text{PM}}(e(t), e'(t))) \sin \omega_c t \\ &= I(e(t), e'(t)) \cos \omega_c t - Q(e(t), e'(t)) \sin \omega_c t \end{aligned}$$

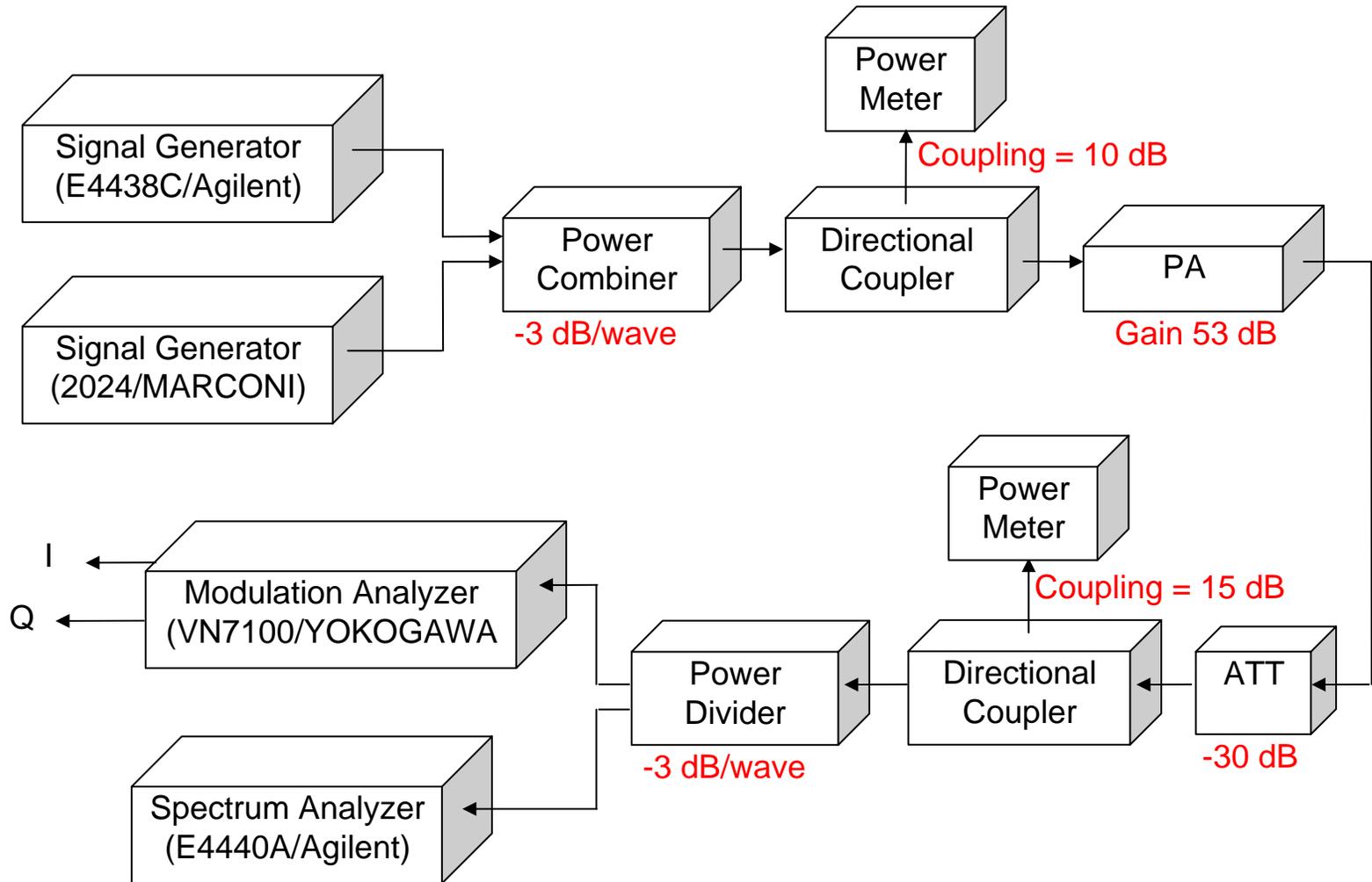
# メモリ効果に関する測定

- ✓2波の**振幅**と**離隔周波数**を変えて測定
- ✓モジュレーションアナライザを用いて出力信号を**IとQに分けて**測定
- ✓測定結果から**振幅・位相特性**を算出し、モデル化する

## 測定条件

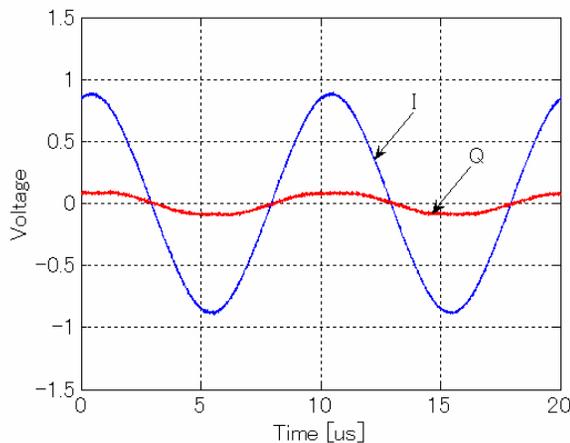
- ✓中心周波数：2140 MHz
- ✓離隔周波数：8 通り  
(200 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz)
- ✓PA平均入力電力：5 通り  
(-18 dBm, -15 dBm, -12 dBm, -10 dBm, -9 dBm)
- ✓MAサンプリング周波数：210 MHz

# 測定系

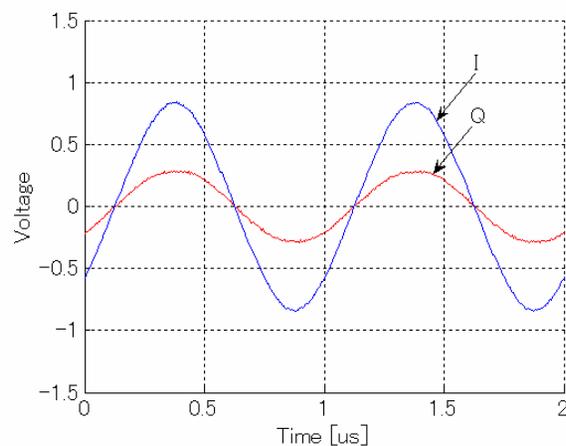


# 測定結果 -I, Q 時間波形-

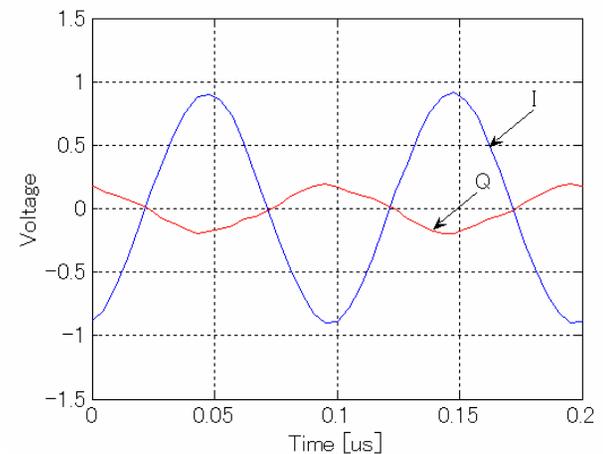
$$I(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \cos(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$
$$Q(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \sin(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$



離隔周波数 200 kHz  
平均入力電力 -10 dBm



離隔周波数 2 MHz  
平均入力電力 -10 dBm



離隔周波数 20 MHz  
平均入力電力 -10 dBm

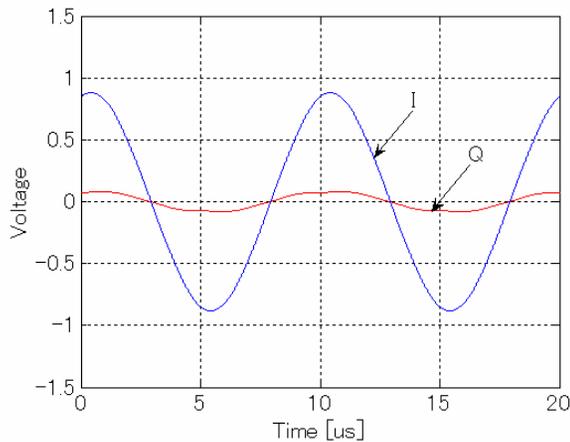
# 測定雑音と同期誤差を除去した I, Q 時間波形

信号処理

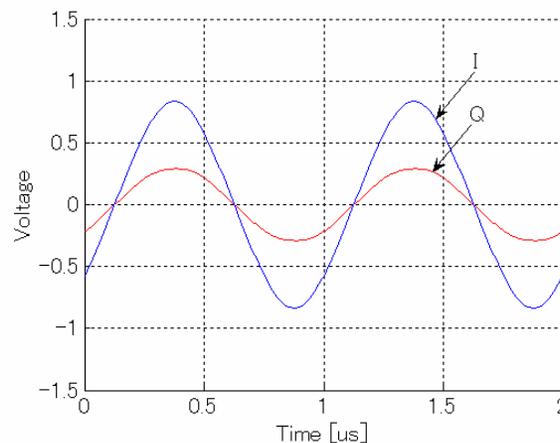
$I(e(t), e'(t))$   
 $Q(e(t), e'(t))$

測定雑音や  
同期誤差の除去

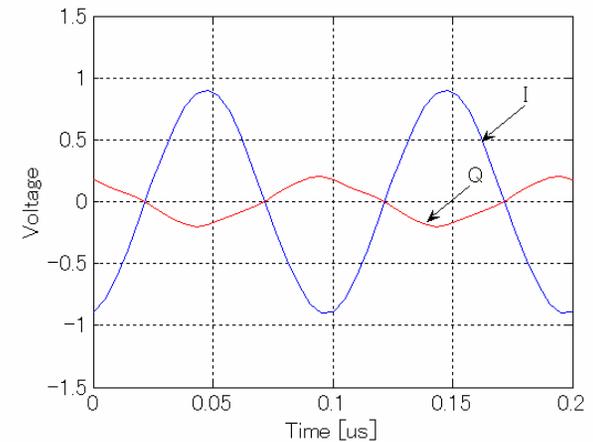
$I'(e(t), e'(t))$   
 $Q'(e(t), e'(t))$



離隔周波数 200 kHz  
平均入力電力 -10 dBm



離隔周波数 2 MHz  
平均入力電力 -10 dBm



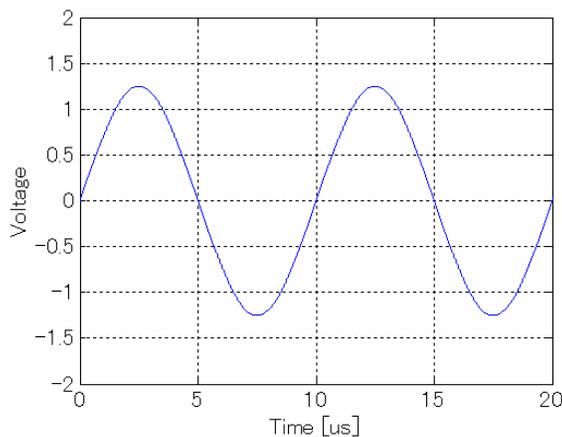
離隔周波数 20 MHz  
平均入力電力 -10 dBm

# 振幅特性の算出

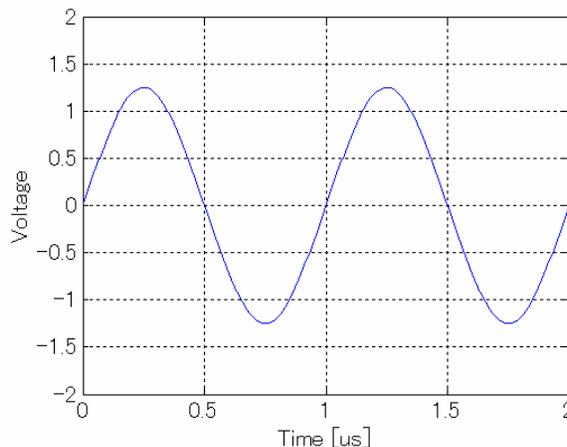
$$I(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \cos(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$
$$Q(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \sin(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$



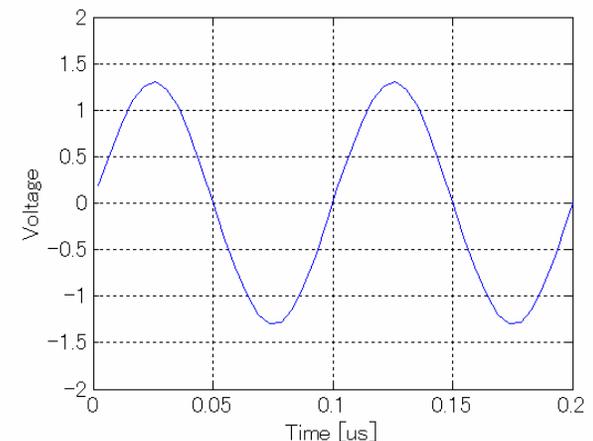
$$|F_{AM}(e(t), e'(t))| = 2\sqrt{[I'(e(t), e'(t))]^2 + [Q'(e(t), e'(t))]^2}$$



離隔周波数 200 kHz  
平均入力電力 -10 dBm



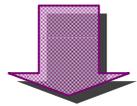
離隔周波数 2 MHz  
平均入力電力 -10 dBm



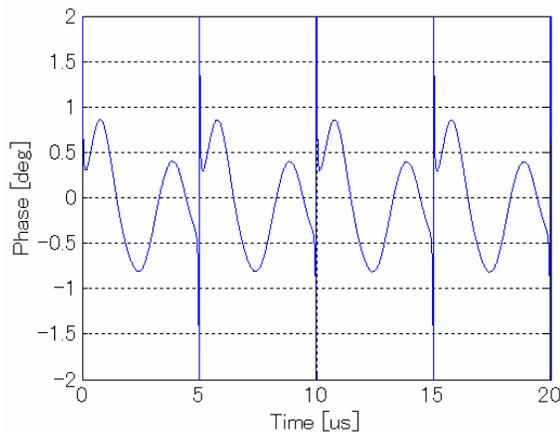
離隔周波数 20 MHz  
平均入力電力 -10 dBm

# 位相特性の算出

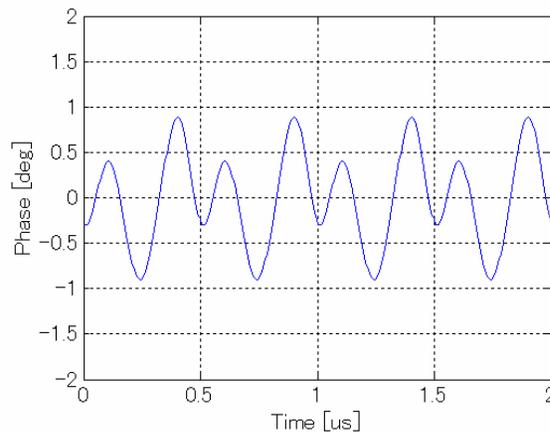
$$I(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \cos(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$
$$Q(e(t), e'(t)) = F_{AM}(e(t), e'(t)) \sin(F_{PM}(e(t), e'(t)))$$



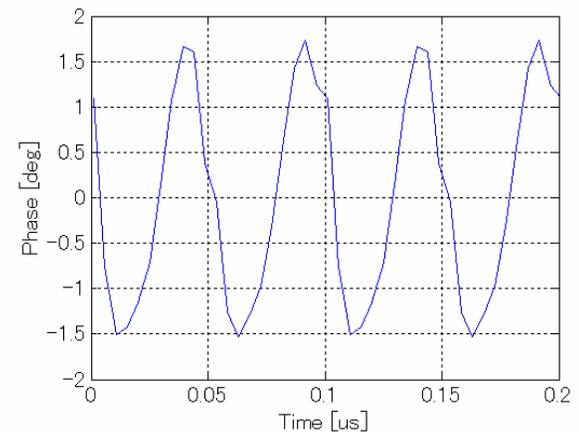
$$F_{PM}(e(t), e'(t)) = \tan^{-1}[Q'(e(t), e'(t))/I'(e(t), e'(t))]$$



離隔周波数 200 kHz  
平均入力電力 -10 dBm



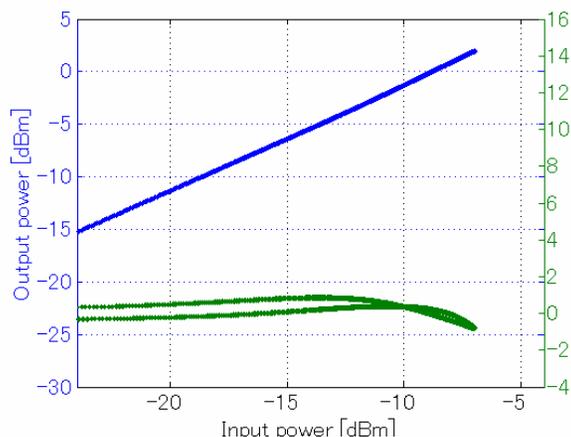
離隔周波数 2 MHz  
平均入力電力 -10 dBm



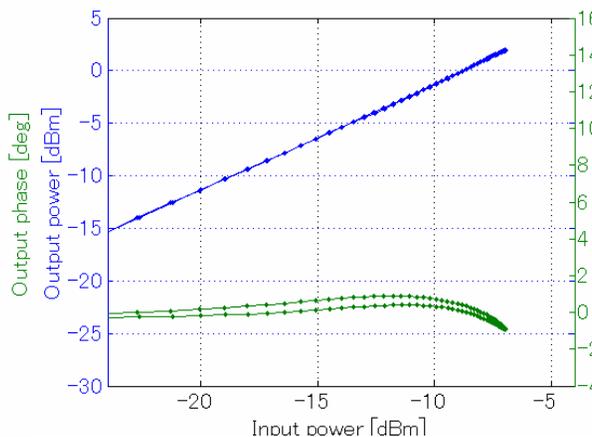
離隔周波数 20 MHz  
平均入力電力 -10 dBm

# 算出した振幅・位相特性に基づく入出力特性

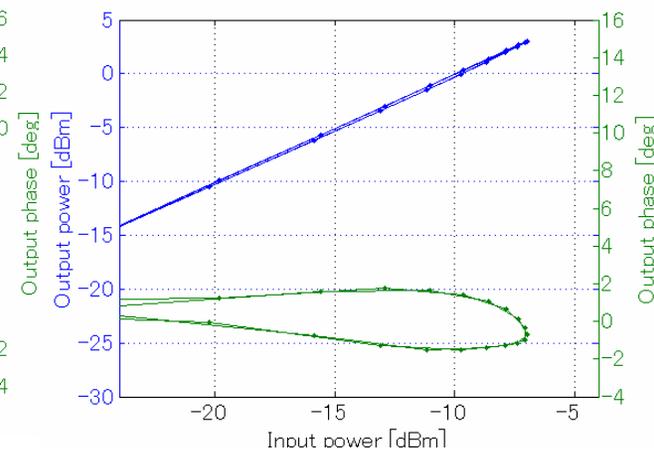
- 算出した振幅特性と位相特性から，入出力特性(ヒステリシス特性)を算出



離隔周波数 200 kHz  
平均入力電力 -10 dBm



離隔周波数 2 MHz  
平均入力電力 -10 dBm



離隔周波数 20 MHz  
平均入力電力 -10 dBm

離隔周波数が大きくなると，ヒステリシス曲線に開きが見られる



メモリ効果

# まとめと今後の予定

- メモリ効果を考慮した入出力特性の検討とモデル化に向けた測定を行った
  - 信号の広帯域化に伴い、メモリ効果が顕著に現れることを確認した
  - 入力信号エンベロープの時間微分値を導入したモデル化を提案した
  - モジュレーションアナライザを用いて出力信号をIとQに分けて測定した
  - 測定結果から、振幅特性と位相特性を算出した
  - 算出した振幅・位相特性から、入出力特性を算出し、メモリ効果を確認した
- 今後の予定
  - 測定結果をもとに算出した振幅・位相特性から、その関数系を推定し、メモリ効果を含んだ入出力特性モデルを確立する
  - そのモデルをもとに、DPDへ応用する