

複素アナログフィルタの ヒルベルトフィルタ近似性と IQインバランス測定法の検討

群馬大学 田村善郎

アドバンテスト 浅見幸司

群馬大学 小林春夫

1. 研究背景
2. 複素アナログバンドパスフィルタとヒルベルト変換特性
3. IQインバランス測定法
4. まとめ

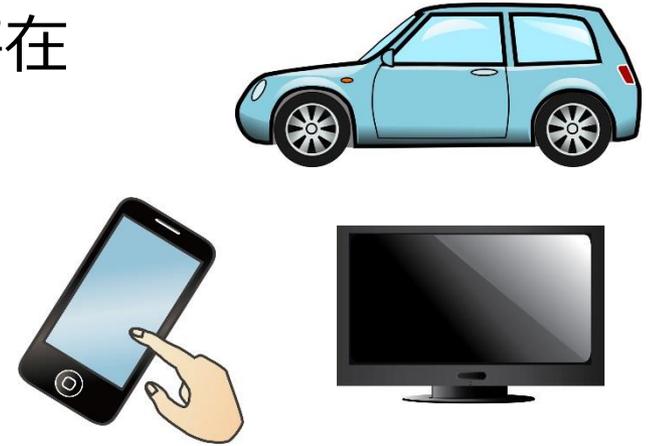
1. 研究背景
2. 複素アナログバンドパスフィルタとヒルベルト変換特性
3. IQインバランス測定法
4. まとめ

無線通信分野でフィルタは欠かせない存在

半導体

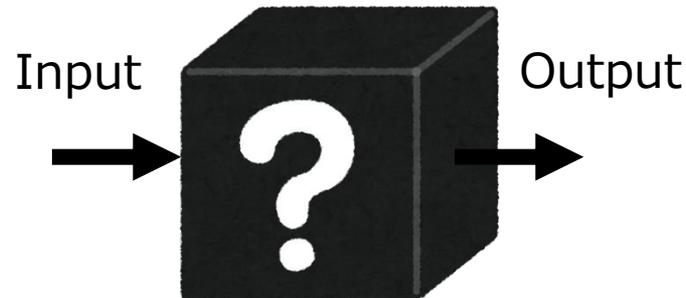


→
フィルタ

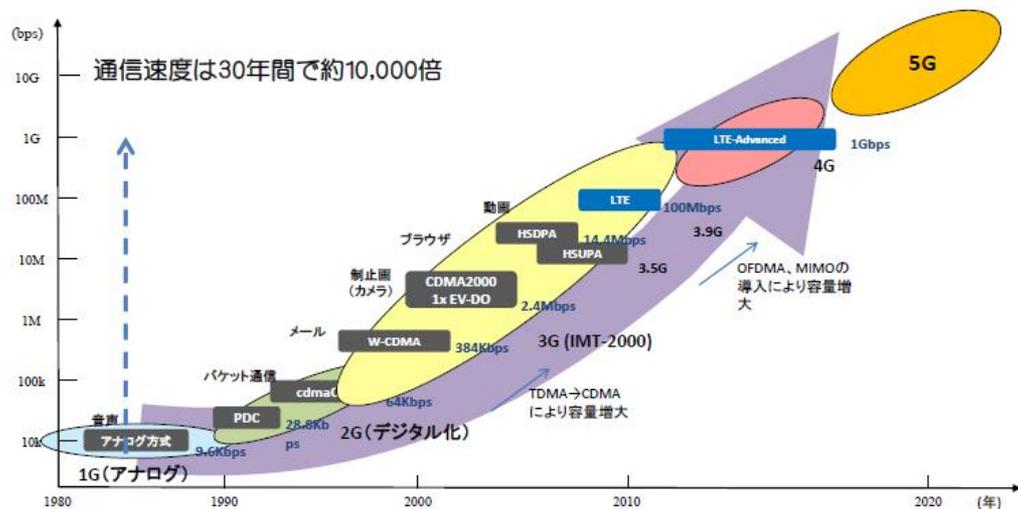


しかし…

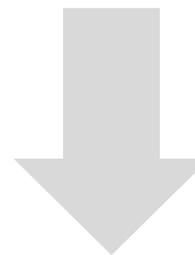
動作が理解しづらい



将来的に
高周波の電波利用が加速



高周波数領域での技術推進



開発だけでなく
高精度, 高品質な測定技術
も重要

移動通信ネットワークの高速化・大容量化の進展

出典：総務省 総合通信基盤局 電波政策課

2020年代に向けたワイヤレスブロードバンド戦略

1. フィルタのふるまいを明らかにする
2. 高周波領域で使用できるものを対象



報告の少ない複素アナログフィルタ（特に受動フィルタ）

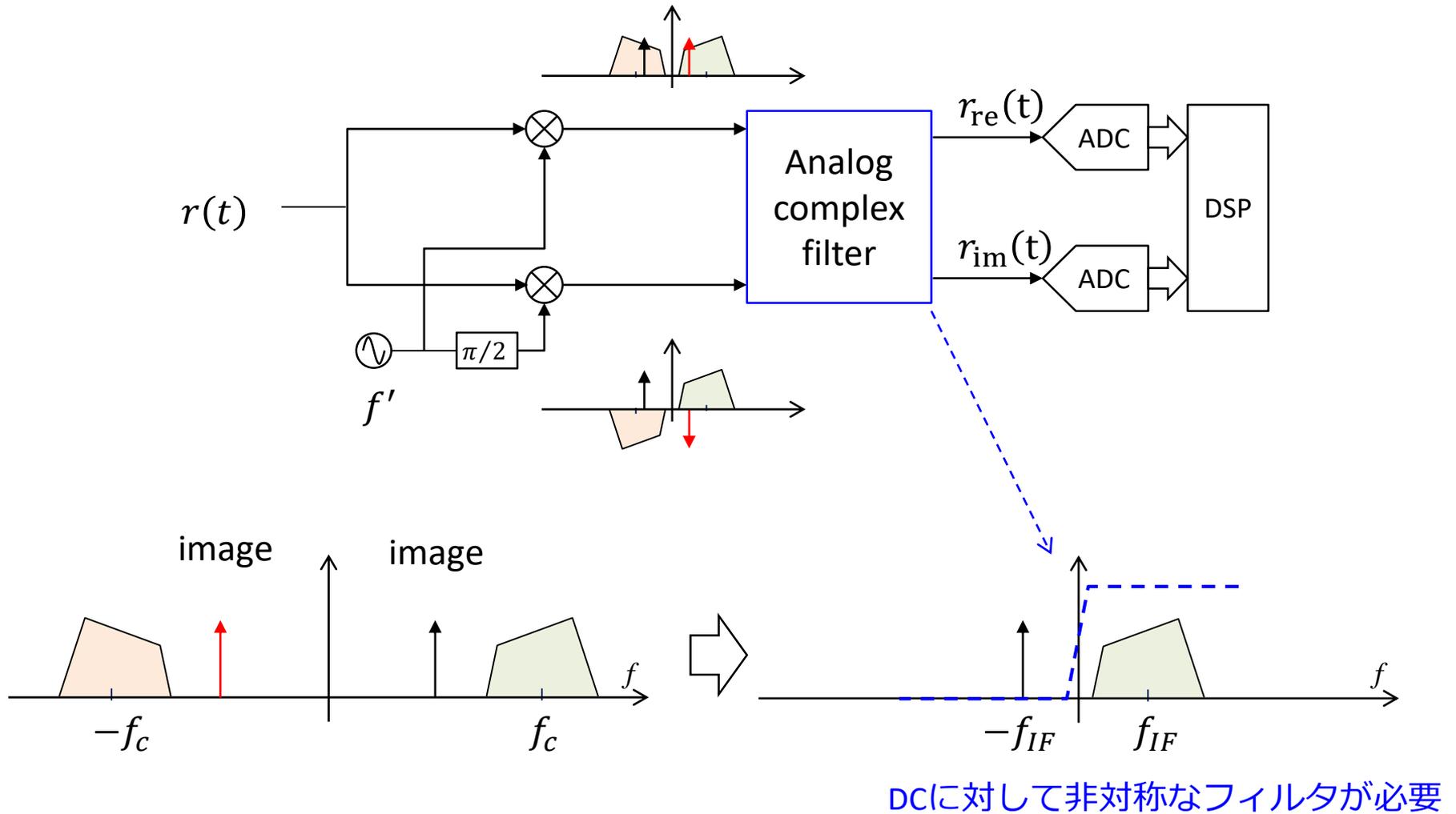
→解析の余地あり

広帯域化により影響があるIQインバランスに着目

→測定法の検討

1. 研究背景
2. 複素アナログバンドパスフィルタとヒルベルト変換特性
3. IQインバランス測定法
4. まとめ

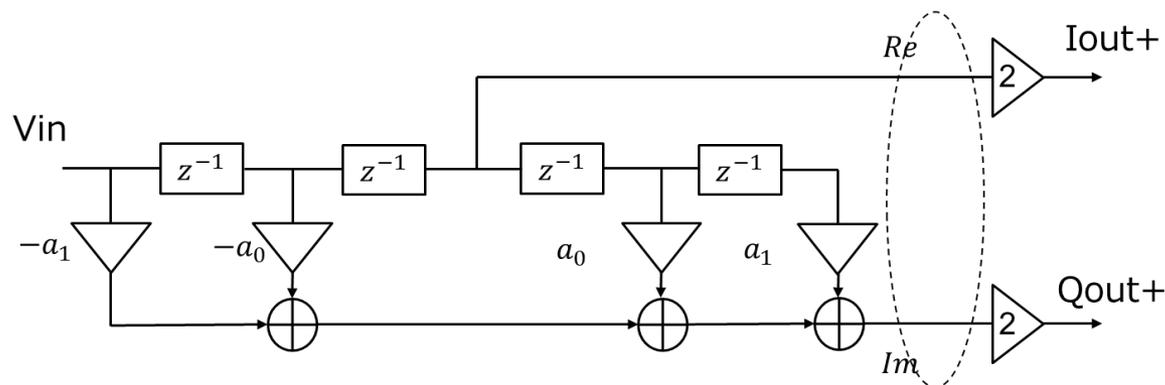
低中間周波数(Low-IF)復調方式



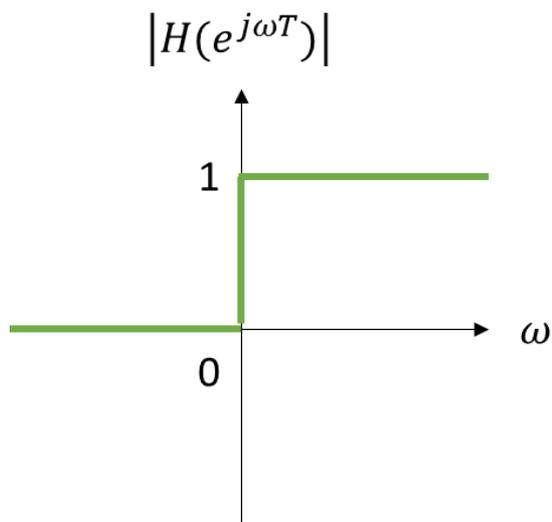
ヒルベルトフィルタ

ヒルベルト変換の
フーリエ変換

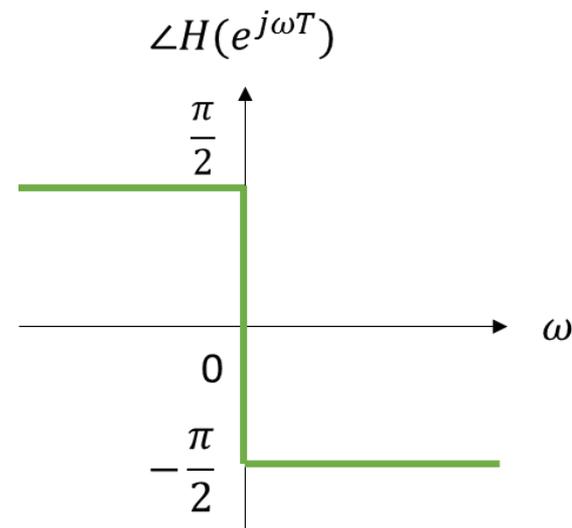
$$H(\omega) = \begin{cases} -j & (\omega \geq 0) \\ j & (\omega < 0) \end{cases}$$



構成例



ゲイン特性



位相特性 (虚部 - 実部)

RCポリフェーズフィルタ

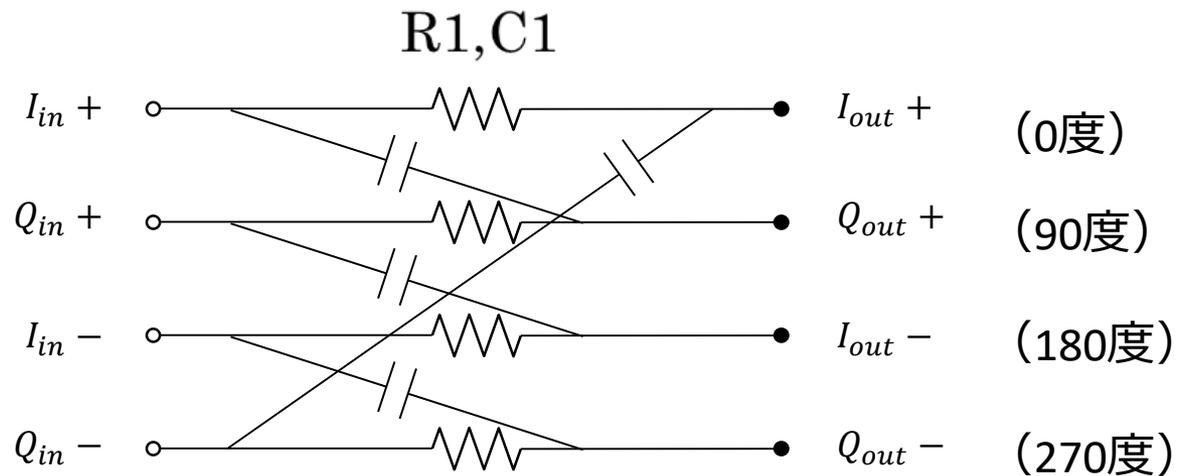
抵抗Rと容量Cで構成する受動回路

複素入出力を扱える複素アナログ・バンドパスフィルタ

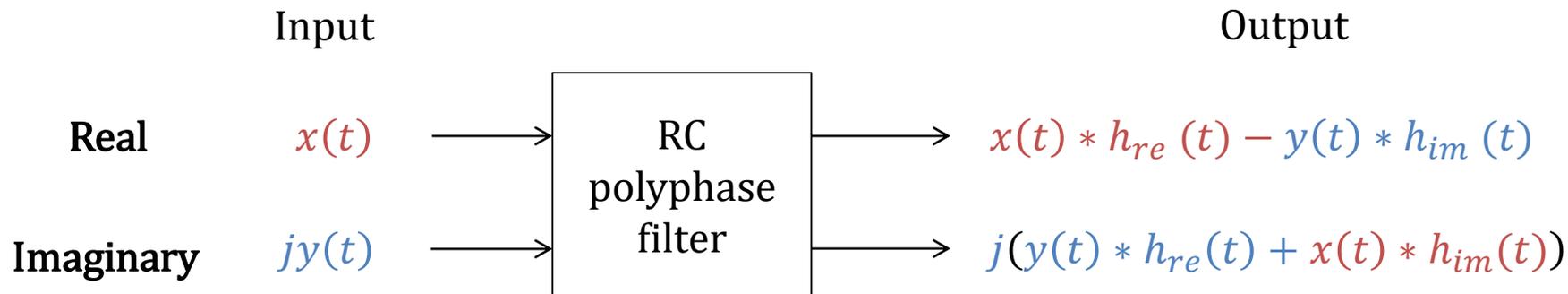
→ イメージ成分抑圧

所望の周波数のヒルベルト変換

→ 直交波形生成



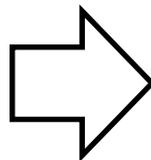
↑直交差動信号



$$h(t) = h_{re}(t) + jh_{im}(t)$$

Impulse response

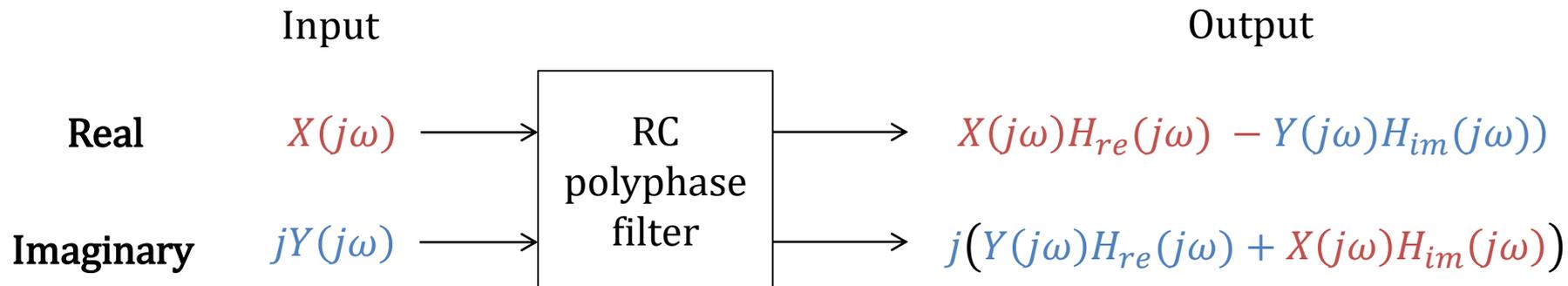
周波数特性をみたい



フーリエ変換

$$x(t) \leftrightarrow X(\omega)$$

$$x^*(t) \leftrightarrow X^*(-\omega)$$



$$H(j\omega) = H_{re}(j\omega) + jH_{im}(j\omega)$$

Fourier transform

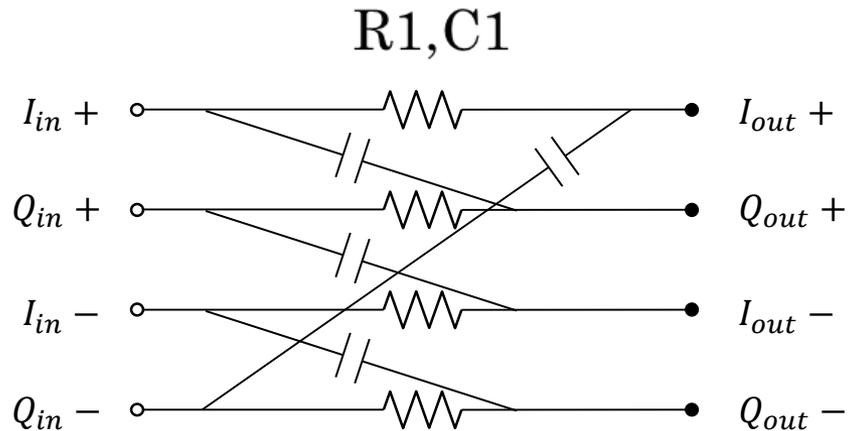
実部

$$H_{re}(j\omega) = \frac{H(j\omega) + H^*(-j\omega)}{2}$$

虚部

$$jH_{im}(j\omega) = \frac{H(j\omega) - H^*(-j\omega)}{2}$$

1次RCポリフェーズフィルタ



伝達関数

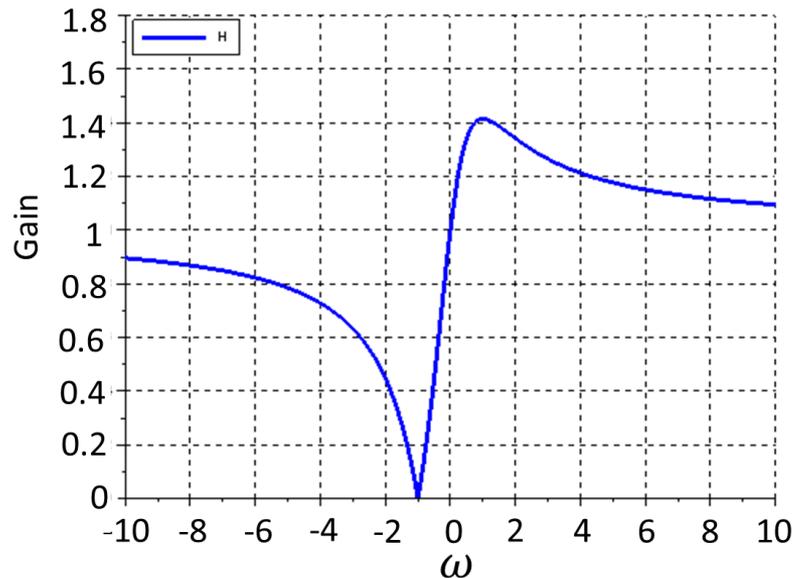
$$H_{(1)}(s) = \frac{1 - jsR_1C_1}{1 + sR_1C_1}$$

実部と虚部に分解

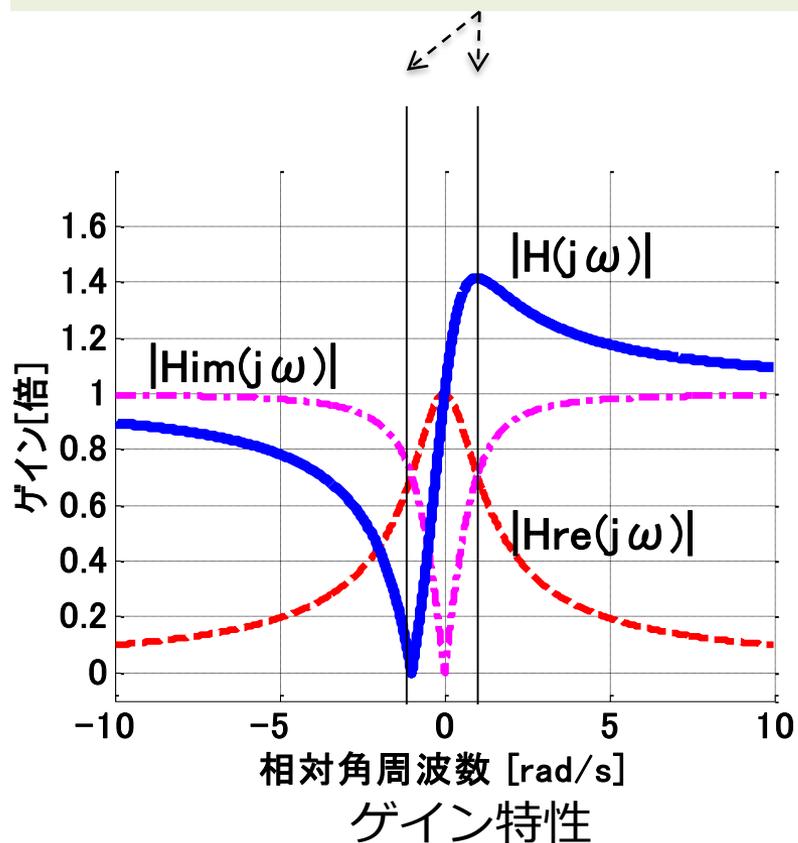
$$H_{(1)}(s) = H_{(1)re}(s) + jH_{(1)im}(s)$$

$$H_{(1)re}(s) = \frac{1}{1 + sR_1C_1}$$

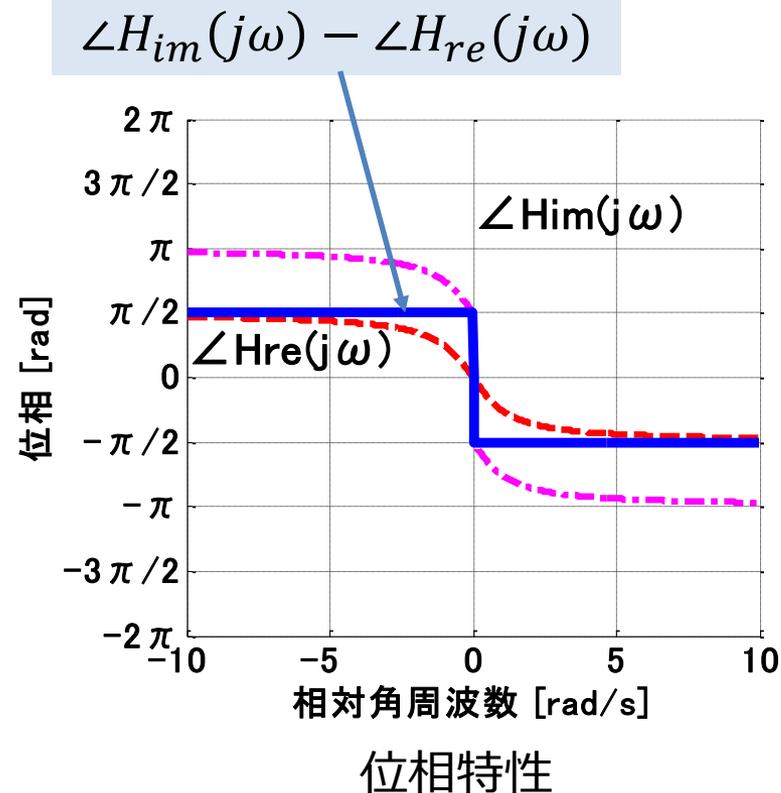
$$jH_{(1)im}(s) = -j \frac{sR_1C_1}{1 + sR_1C_1}$$



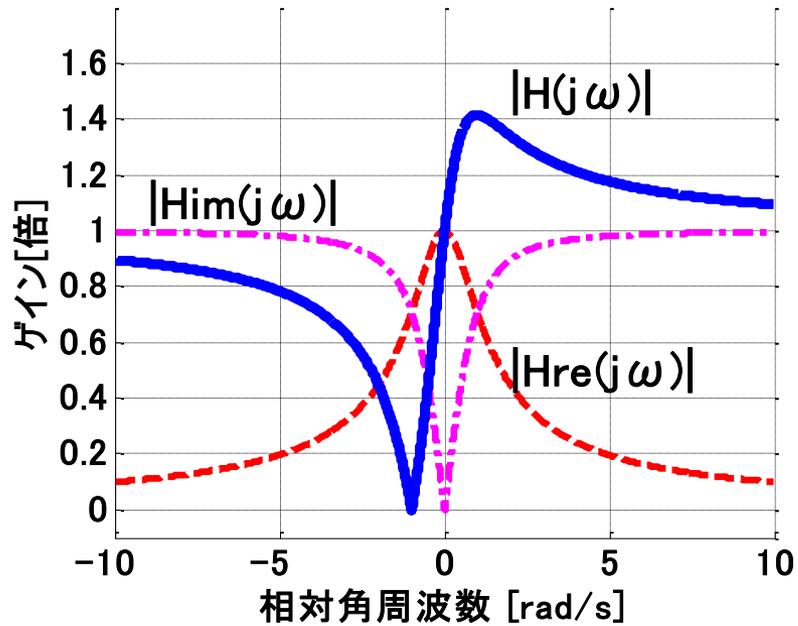
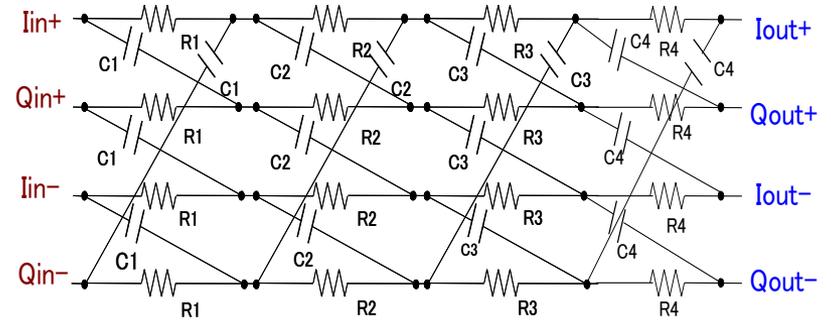
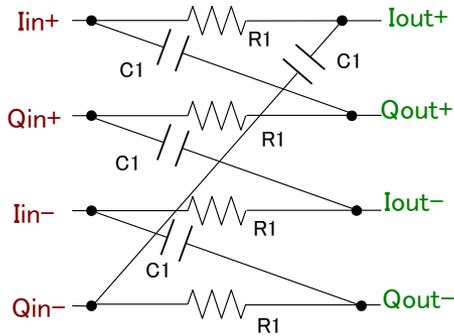
$|H_{re}(\omega)|$ と $|H_{im}(\omega)|$ のゲインが等しい
→ヒルベルト変換がうまくいく



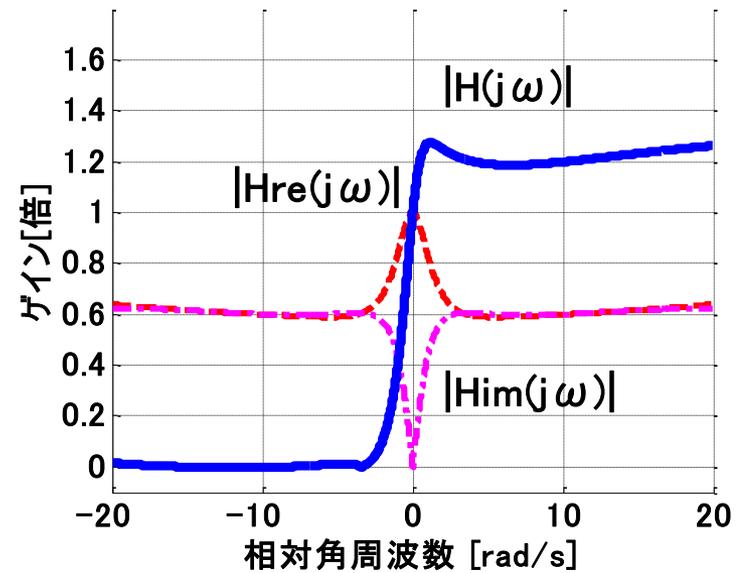
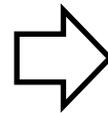
全周波数帯域で、90度移相



ゲイン特性 1次 → 4次



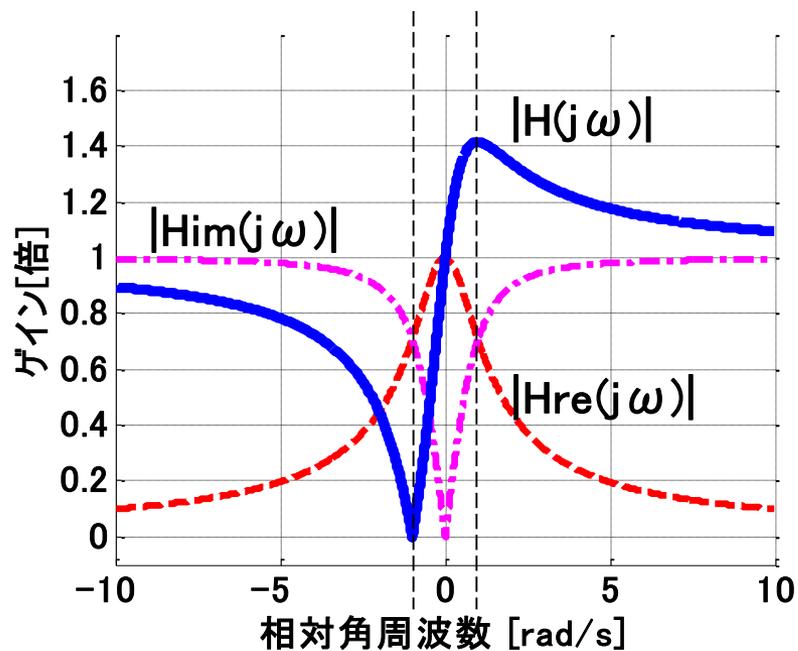
1次



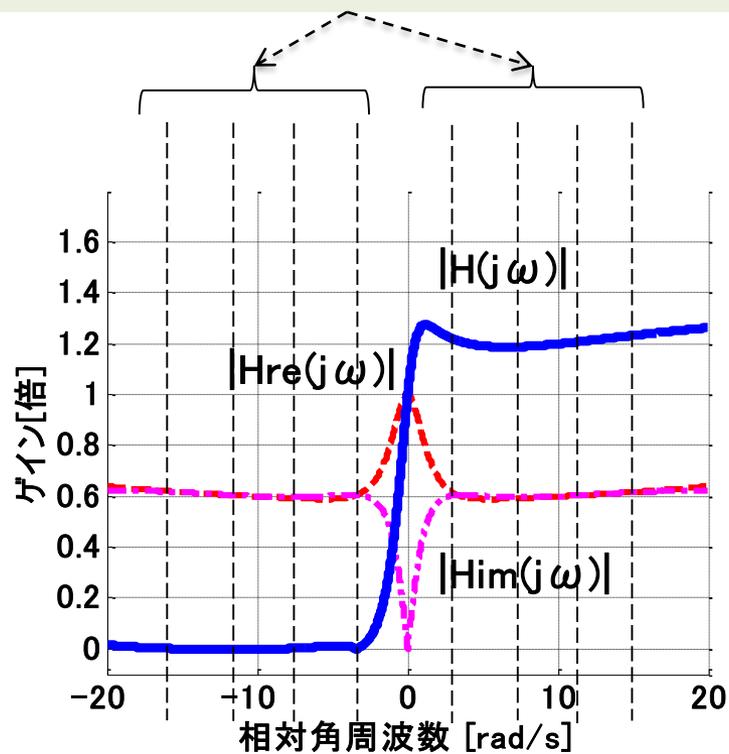
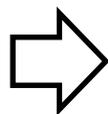
4次

ゲイン特性 1次 → 4次

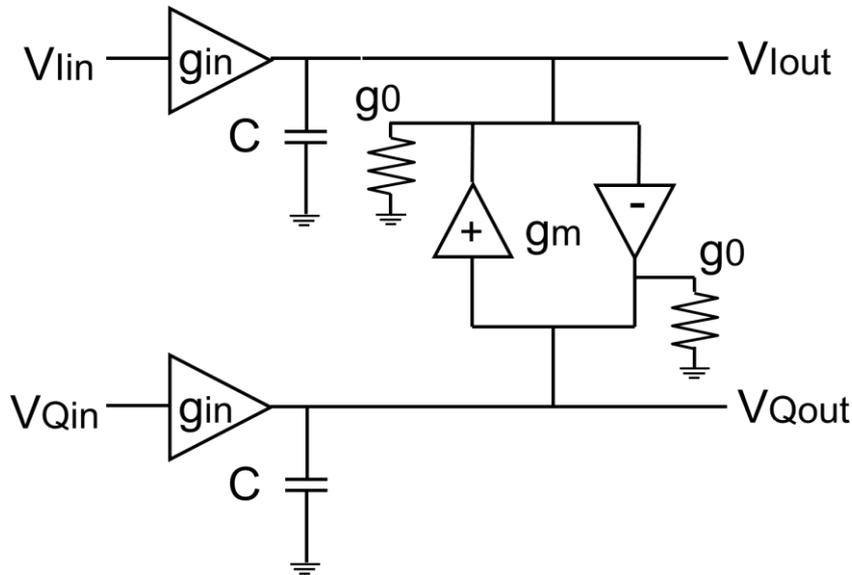
$|H_{re}(\omega)|$ と $|H_{im}(\omega)|$ のゲインが等しい
帯域が広くなる



1次



4次



伝達関数

$$G(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot \frac{1}{s - j\omega_c + \omega_0}$$

実数成分と虚数成分に分解

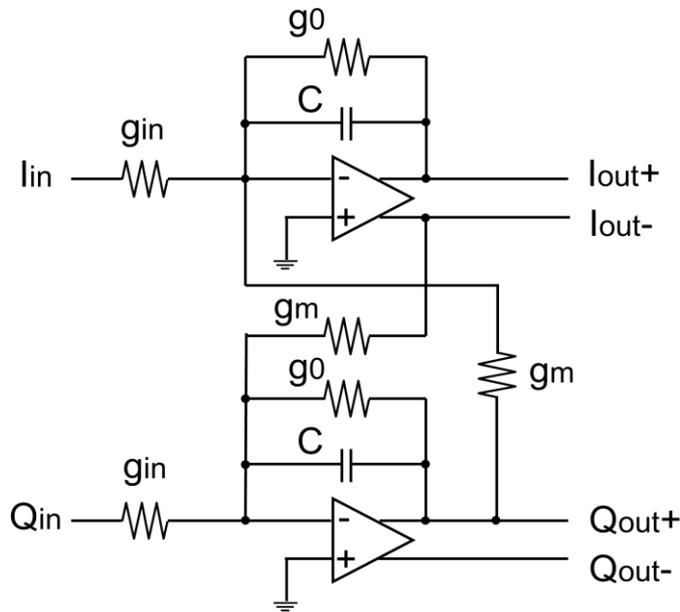
$$G_{re}(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot \frac{s + \omega_0}{(s + \omega_0)^2 - \omega_c^2}$$

$$jG_{im}(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot j \frac{\omega_c}{(s + \omega_0)^2 - \omega_c^2}$$

$$\omega_c = 2\pi$$

$$\omega_0 = \pi$$

$$s = j\omega$$



$$\omega_c = 2\pi$$

$$\omega_0 = \pi$$

$$s = j\omega$$

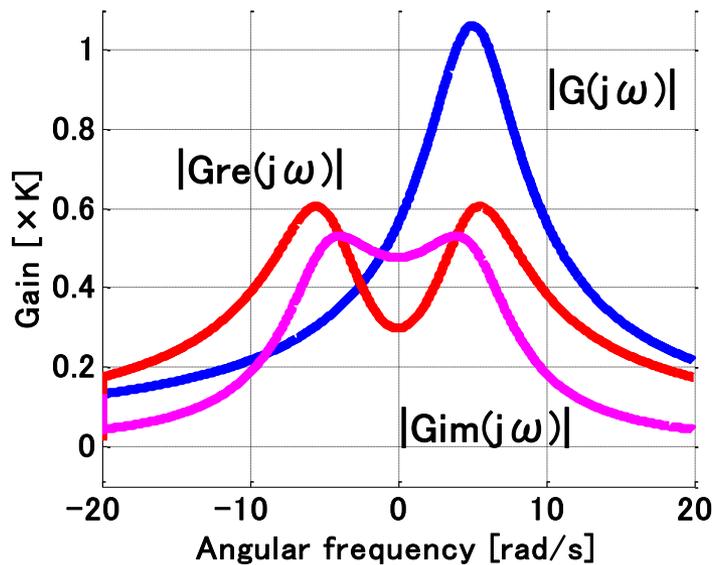
伝達関数

$$G(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot \frac{1}{s - j\omega_c + \omega_0}$$

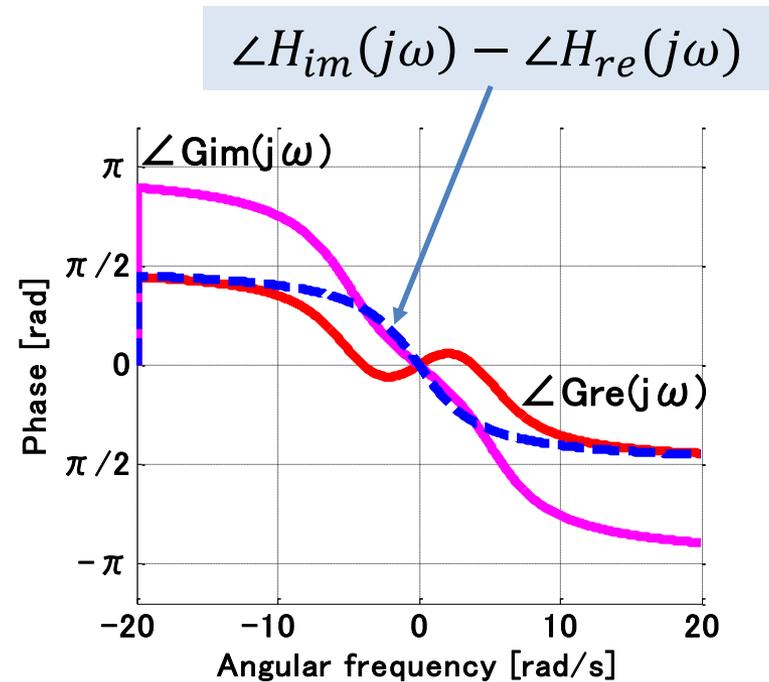
実数成分と虚数成分に分解

$$G_{re}(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot \frac{s + \omega_0}{(s + \omega_0)^2 - \omega_c^2}$$

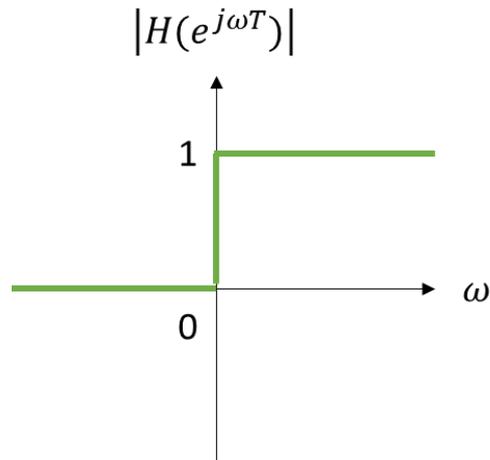
$$jG_{im}(s) = \frac{g_{in}}{C} \cdot j \frac{\omega_c}{(s + \omega_0)^2 - \omega_c^2}$$



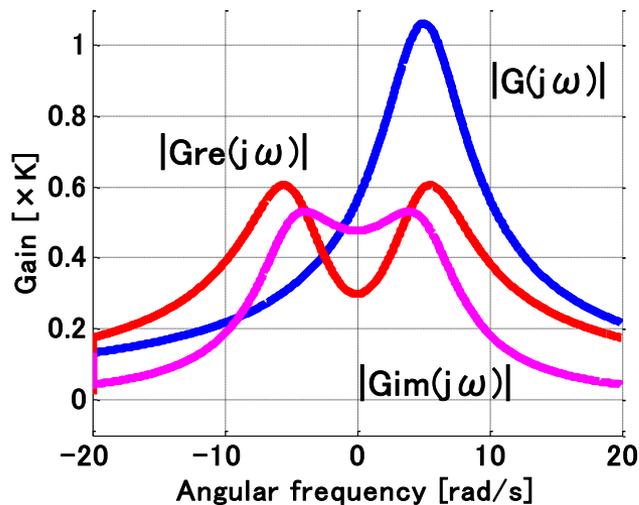
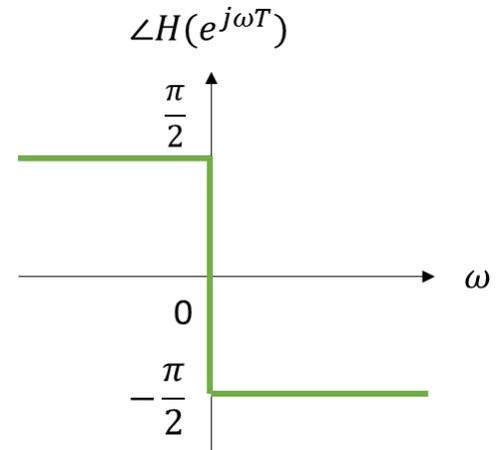
ゲイン特性



位相特性

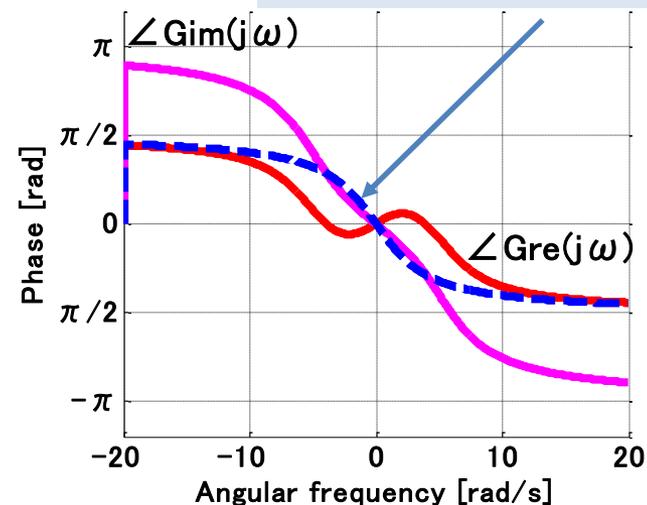


ヒルベルト変換の
関係はない



ゲイン特性

$\angle H_{im}(j\omega) - \angle H_{re}(j\omega)$



位相特性

RCポリフェーズフィルタ → 特性がヒルベルト変換に近似

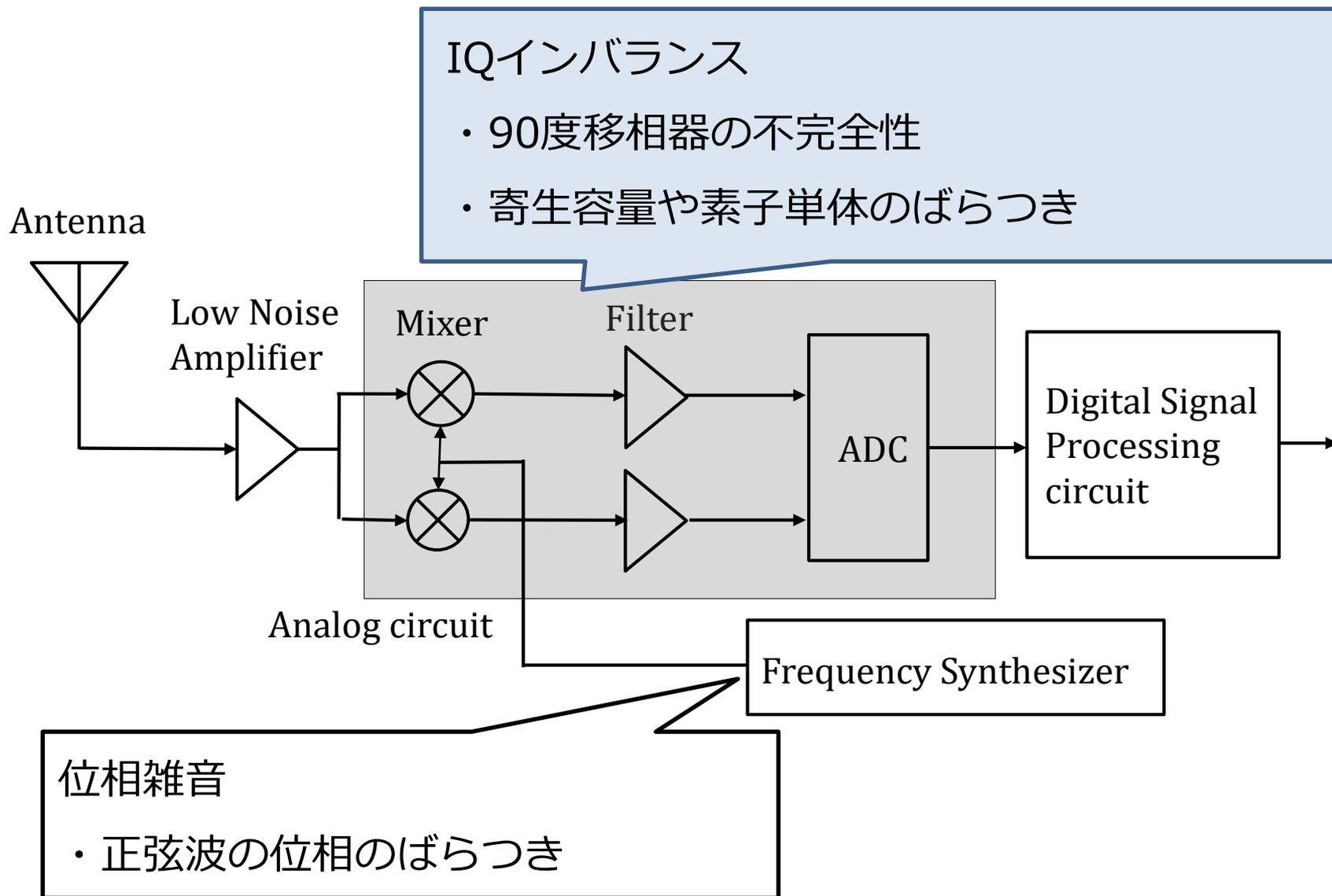
ゲイン → 次数を上げて広帯域に近似

位相 → 理想的ヒルベルトフィルタ特性

複素Gm-Cバンドパス、複素能動RCバンドパス

→ 関係性は低い

1. 研究背景
2. 複素アナログバンドパスフィルタとヒルベルト変換特性
3. IQインバランス測定法
4. まとめ

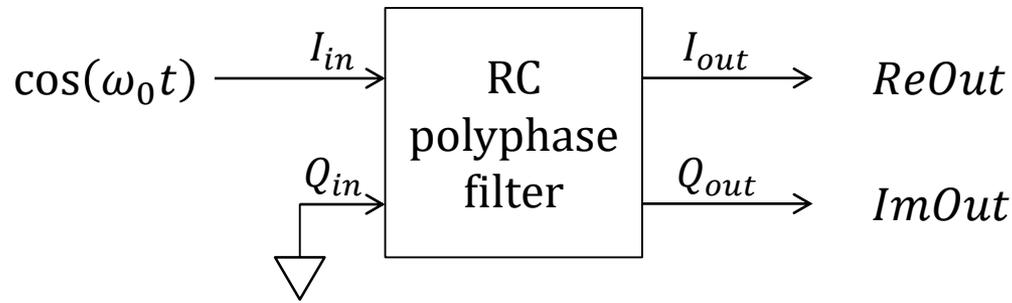




$A \neq B$ ゲインインバランス

$\theta \neq \phi$ 位相インバランス

- どんな影響？ IQ間の位相差が90度でなくなる、振幅が同一でなくなる
- どんなとき？ ダイレクトコンバージョン方式で特に劣化が顕著
- どのくらい？ 数dBの振幅差、数度の位相誤差を発生する可能性



$$ReOut(\omega) = \frac{1}{2} (H_{re}(\omega_0)e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} + H_{re}(-\omega_0)e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$

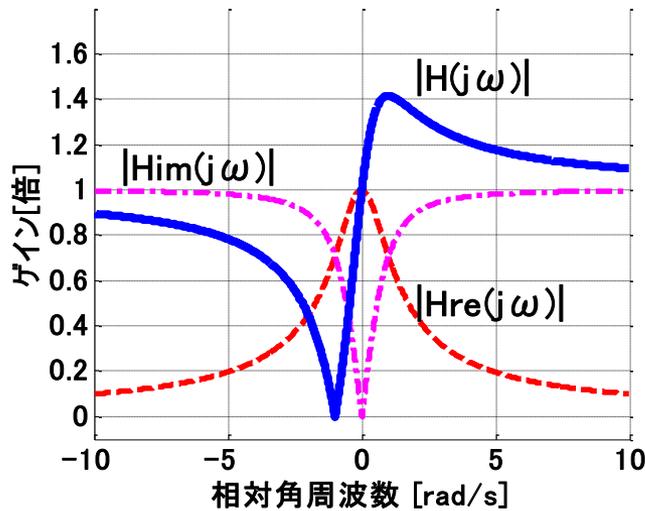
$$ImOut(\omega) = \frac{j}{2} (H_{im}(\omega_0)e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} + H_{im}(-\omega_0)e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$



$$Imbalance = \frac{ImOut(\omega_0)}{ReOut(\omega_0)} = \frac{jH_{im}(\omega_0)}{H_{re}(\omega_0)}$$

振幅1, 位相 $\pi/2$, (複素数表記 j) のとき
 IQインバランスがない, 直交性が保たれている

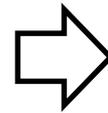
インバランス式導出



伝達関数はDC非対称だが
実部と虚部はDC対称

$$ReOut(\omega) = \frac{1}{2} (H_{re}(\omega_0)e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} + H_{re}(-\omega_0)e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$

$$ImOut(\omega) = \frac{j}{2} (H_{im}(\omega_0)e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} + H_{im}(-\omega_0)e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$



$$H_{re}(\omega_0) = H_{re}(-\omega_0)$$

$$H_{im}(\omega_0) = H_{im}(-\omega_0)$$

$$Imbalance = \frac{ImOut(\omega_0)}{ReOut(\omega_0)} = \frac{jH_{im}(\omega_0)}{H_{re}(\omega_0)}$$

$$Imbalance = \frac{ImOut(\omega_0)}{ReOut(\omega_0)} = \frac{jH_{im}(\omega_0)}{H_{re}(\omega_0)}$$

伝達関数

$$H_{(1)}(s) = \frac{1 - jsR_1C_1}{1 + sR_1C_1}$$

$$H_{(1)}(s) = H_{(1)re}(s) + jH_{(1)im}(s)$$

$$H_{(1)re}(s) = \frac{1}{1 + sR_1C_1}$$

$$jH_{(1)im}(s) = -j \frac{sR_1C_1}{1 + sR_1C_1}$$

$$\frac{jH_{(1)im}(s)}{H_{(1)re}(s)} = -jsR_1C_1$$

$$s = j\omega$$

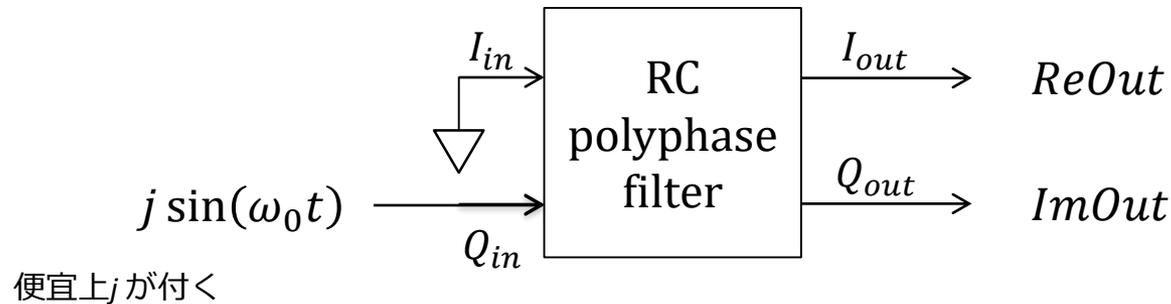
$$\frac{jH_{(1)im}(j\omega)}{H_{(1)re}(j\omega)} = \omega R_1C_1$$

$$\frac{jH_{(1)im}(j\omega)}{H_{(1)re}(j\omega)} = \omega R_1 C_1$$

$$\frac{jH_{(2)im}(j\omega)}{H_{(2)re}(j\omega)} = \frac{\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2)}{1 + \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2}$$

$$\frac{jH_{(3)im}(j\omega)}{H_{(3)re}(j\omega)} = \frac{\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_3 C_3) + \omega^3(R_1 C_1 R_2 C_2 R_3 C_3)}{1 + \omega^2(R_1 C_1 R_2 C_2 + R_2 C_2 R_3 C_3 + R_3 C_3 R_1 C_1)}$$

$$\left| \frac{jH_{(1)im}(j\omega)}{H_{(1)re}(j\omega)} \right| = 1, \quad \angle \frac{jH_{(1)im}(j\omega)}{H_{(1)re}(j\omega)} = \frac{\pi}{2}$$



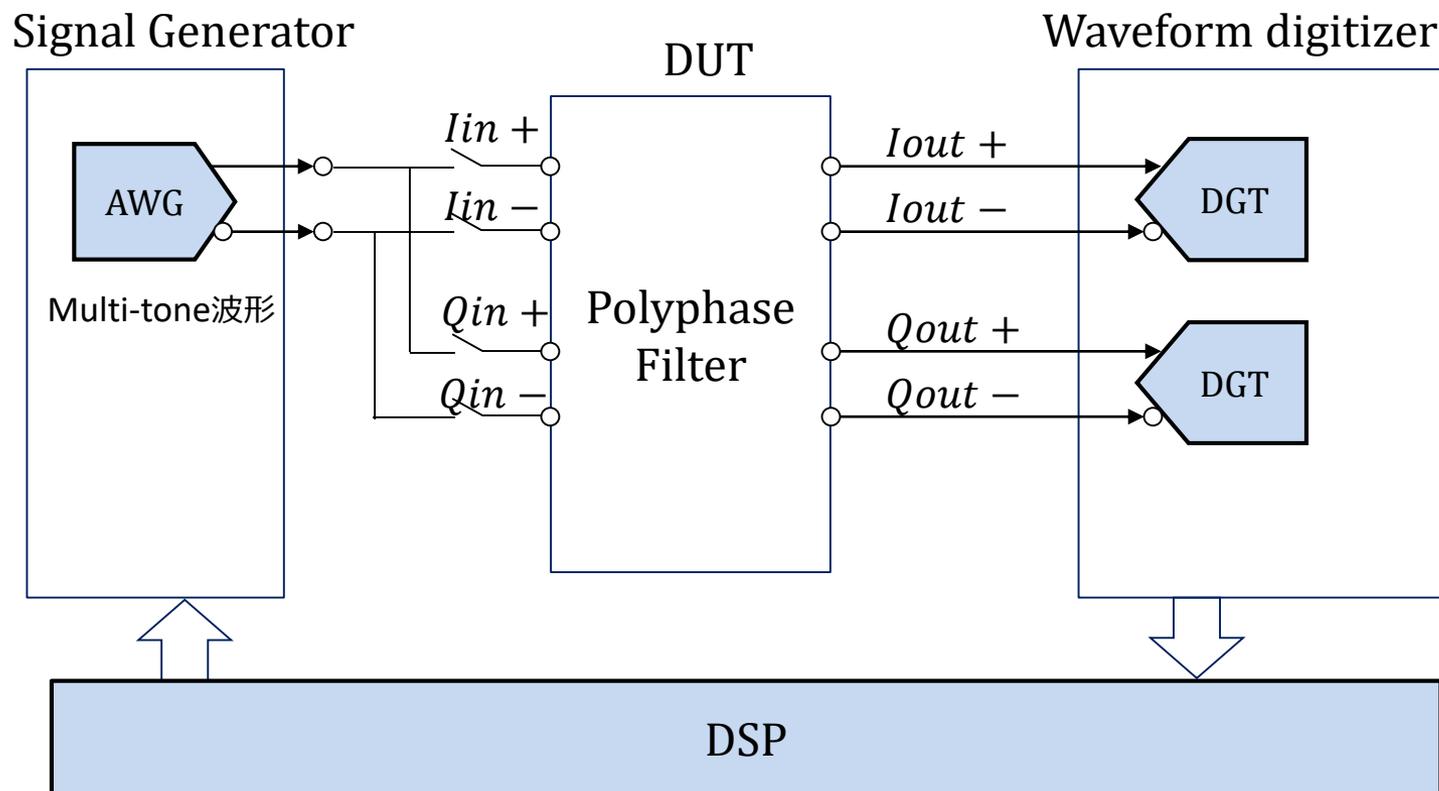
$$ReOut(\omega) = \frac{j}{2} (H_{im}(\omega_0) e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} - H_{im}(-\omega_0) e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$

$$ImOut(\omega) = \frac{1}{2} (H_{re}(\omega_0) e^{j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))} - H_{re}(-\omega_0) e^{-j(\omega_0 t - \theta(\omega_0))})$$



$$Imbalance = \frac{ReOut(\omega_0)}{ImOut(\omega_0)} = \frac{jH_{im}(\omega_0)}{H_{re}(\omega_0)}$$

振幅1, 位相 $\pi/2$, (複素数表記 j) のとき
 IQインバランスがない, 直交性が保たれている



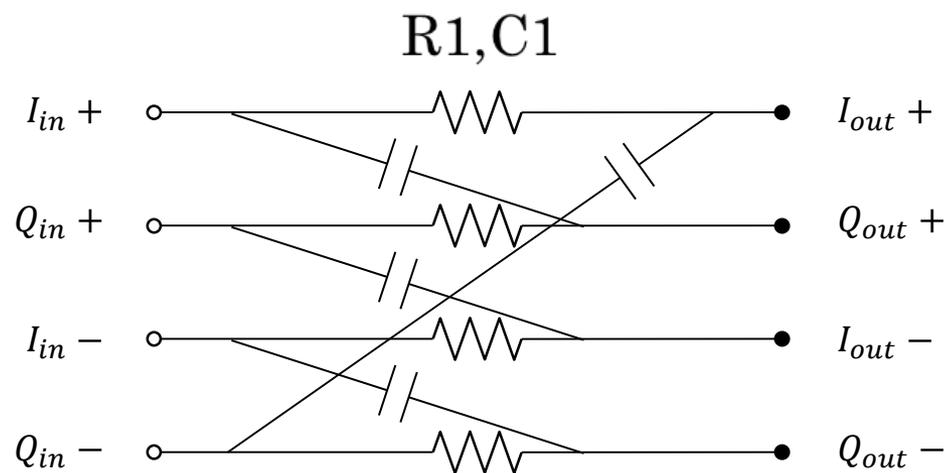
1ch AWG +SW / DGT とDSPアルゴリズムの組合せ

AWGとDGTは差動で使用

パラメータ

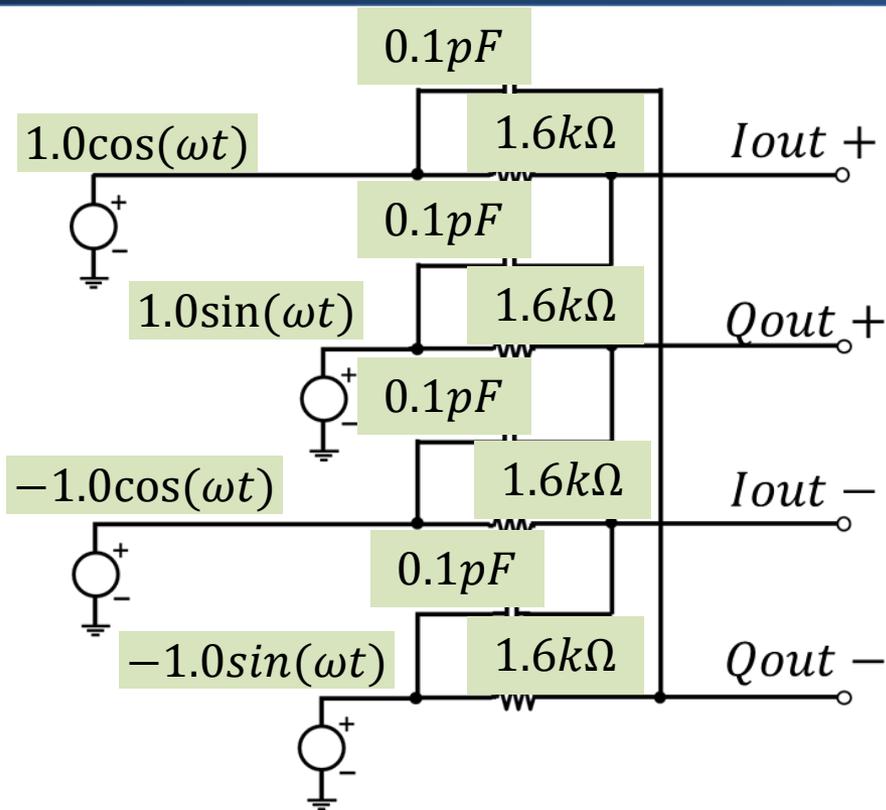
(1) 振幅A,B

(2) 抵抗R, 容量C

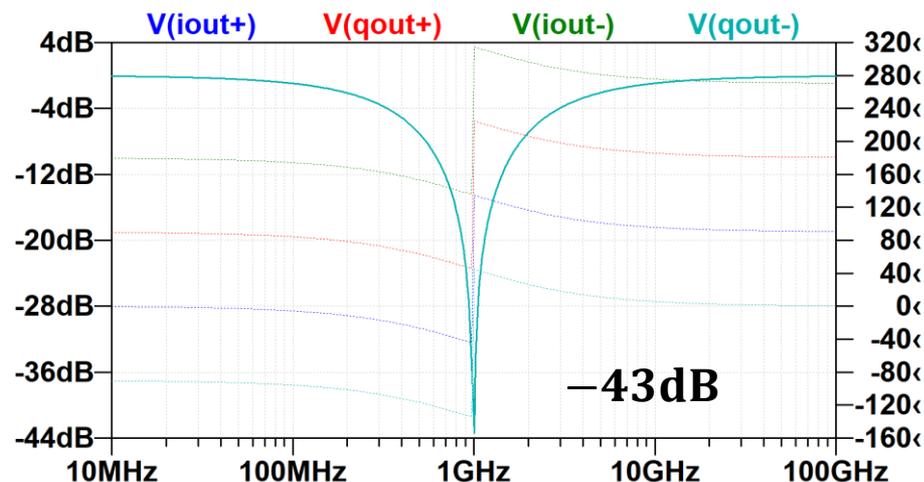


RCポリフェーズフィルタ

(1-1)Cos+jSin入力



RCポリフェーズフィルタ回路構成



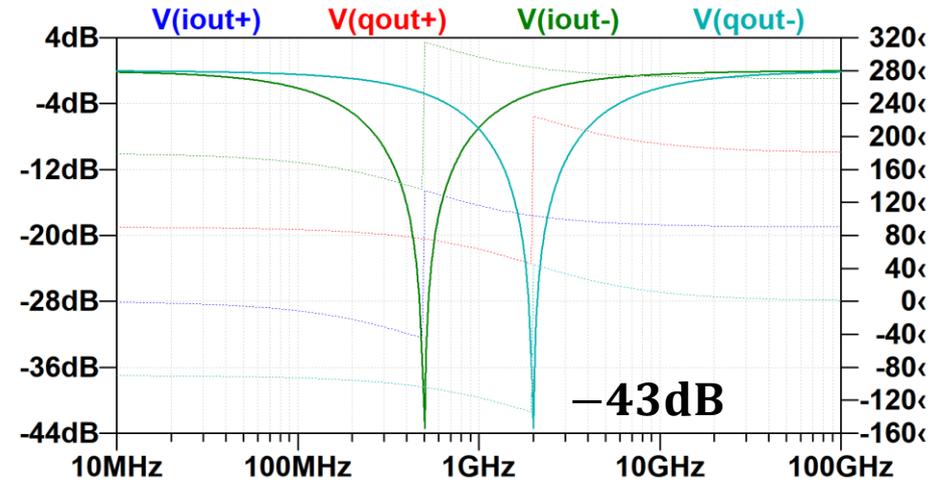
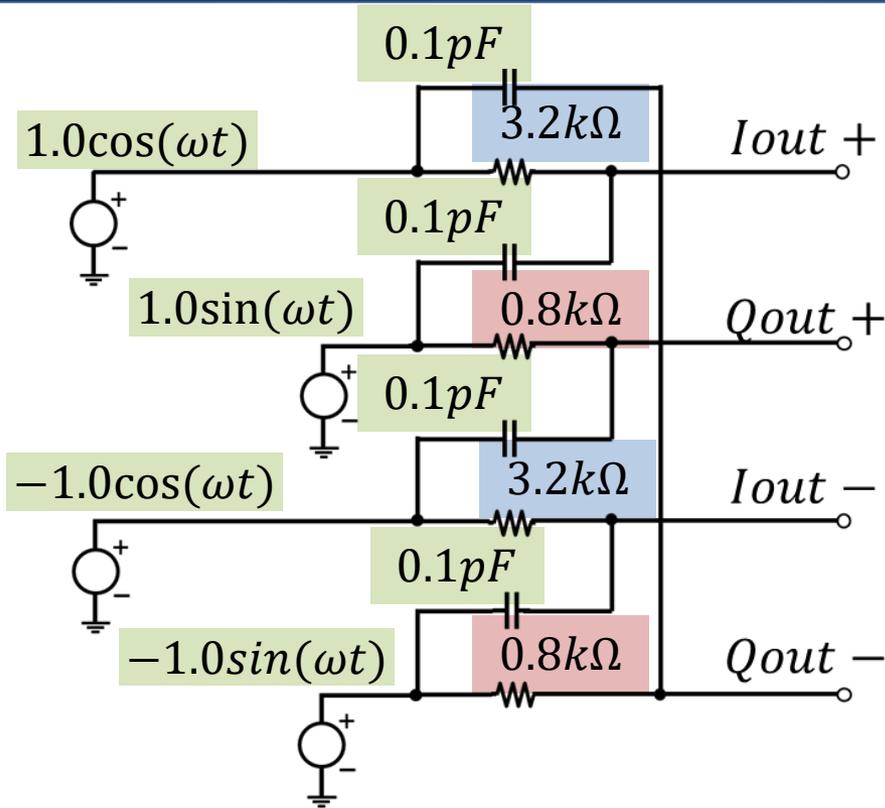
出力結果

振幅 4出力間にばらつきなし

位相 90度分割

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cong 1\text{GHz}, \quad \omega = \frac{1}{RC}$$

(1-2)抵抗Rばらつき

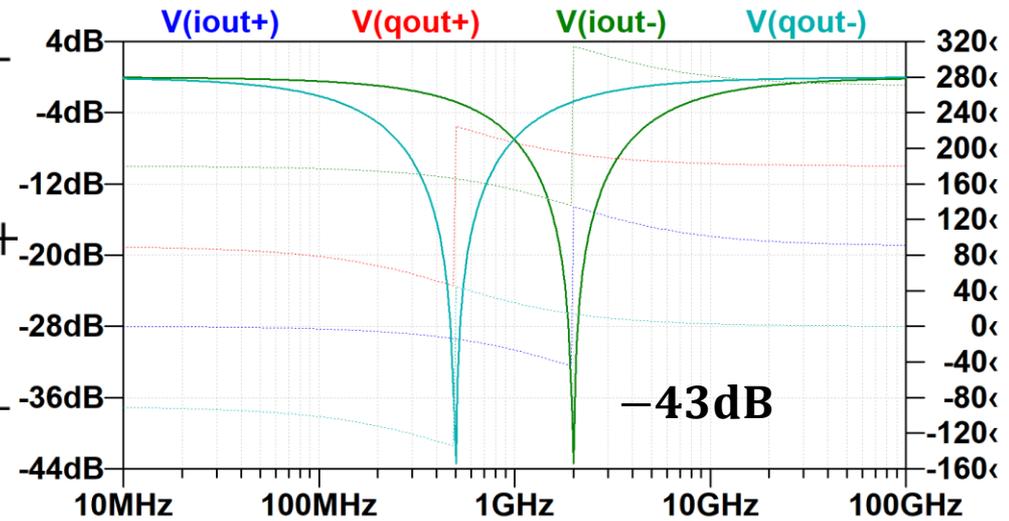
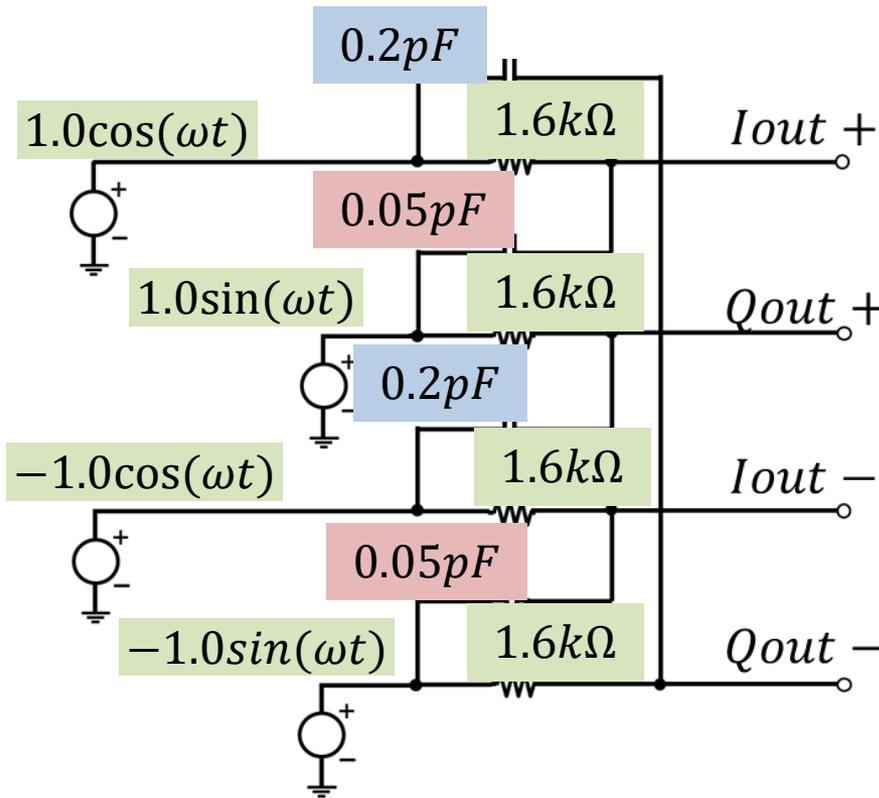


$$\omega = \frac{1}{2RC} \quad \omega = \frac{2}{RC}$$

RCポリフェーズフィルタ回路構成

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cong 1GHz, \quad \omega = \frac{1}{RC}$$

(1-3)容量C ばらつき

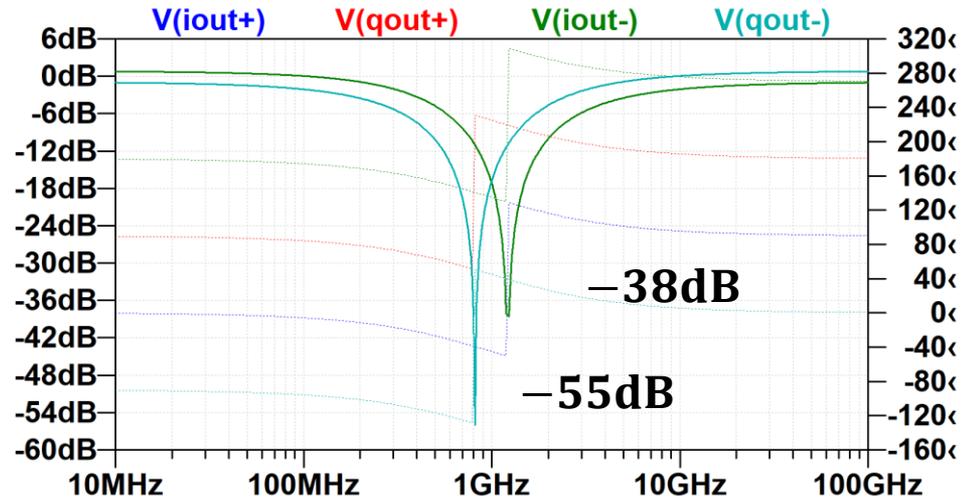
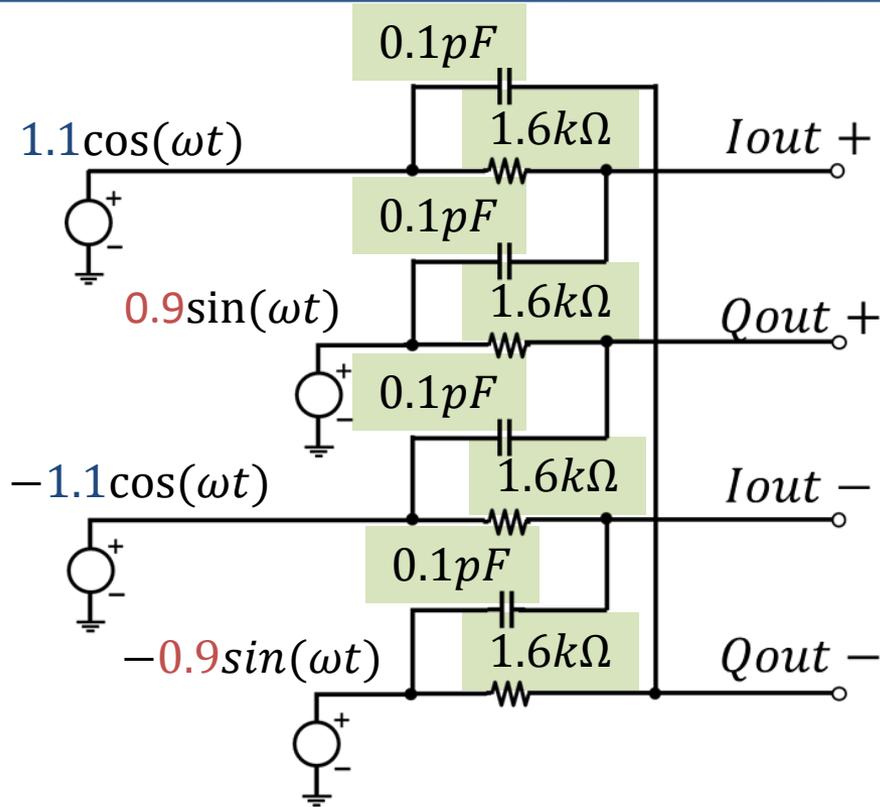


$$\omega = \frac{1}{2RC} \quad \omega = \frac{2}{RC}$$

RCポリフェーズフィルタ回路構成

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cong 1GHz, \quad \omega = \frac{1}{RC}$$

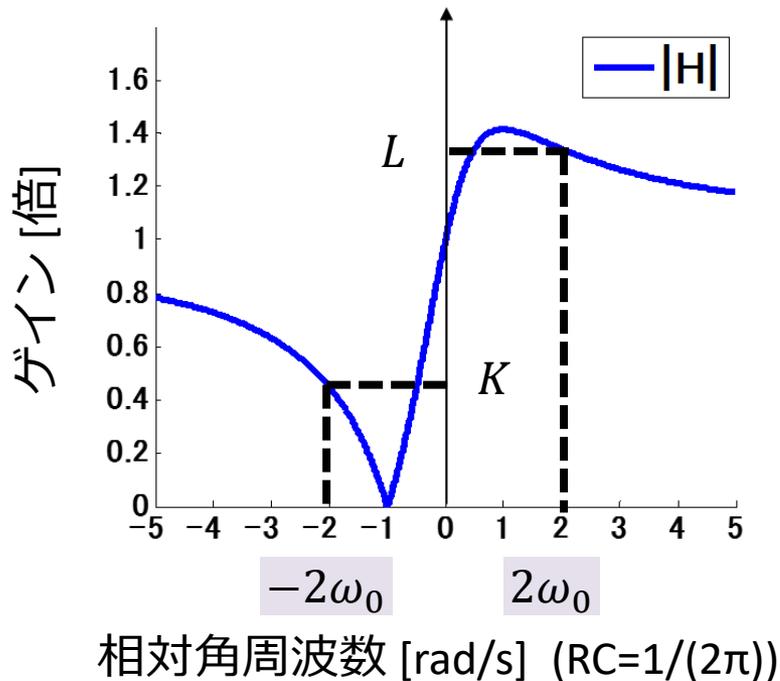
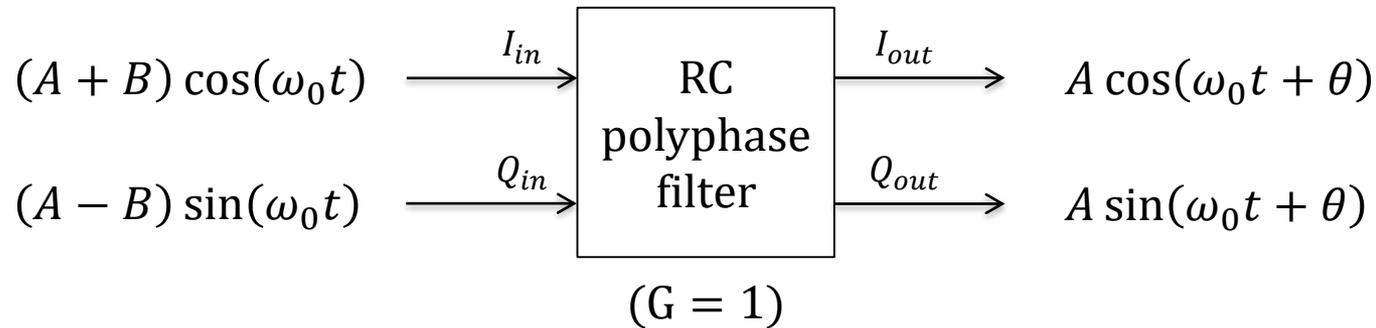
(2-1)入力振幅ばらつき



RCポリフェーズフィルタ回路構成

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \cong 1\text{GHz}, \quad \omega = \frac{1}{RC}$$

インバランス発生について



$$LAe^{j\omega_0 t} + KB e^{-j\omega_0 t}$$

$$(LA + KB) \cos(\omega_0 t)$$

$$(LA - KB) \sin(\omega_0 t)$$

イメージ成分が残ってしまう

(1) 素子ばらつきなしの場合

ゲインインバランス

角周波数 $\omega = \frac{1}{RC}$ で、インバランスなし

それ以外の帯域ではあり

位相インバランス

全ての角周波数 ω でIQ間は90度位相差でインバランスなし

(2) 素子ばらつきありの場合

ゲイン、位相ともにインバランス発生

1. 研究背景
2. 複素アナログバンドパスフィルタとヒルベルト変換特性
3. IQインバランス測定法
4. まとめ

①3種類の複素アナログフィルタについて、ヒルベルトフィルタとの近似性を調査

RCポリフェーズフィルタにヒルベルト変換の関係

高速、広帯域な通信や第5世代のミリ波通信で、
デジタル処理が追い付かない高速・高周波信号処理に役立つ可能性

②IQインバランス測定

周波数変動、素子値ミスマッチによる直交性劣化

宇都宮大学 古神先生

- IQインバランス測定法の解析結果から、いずれI信号Q信号の狙った値を出せたり、補正しやすくなる？

→ 現段階ではそこまで到達していないが、研究が進むことでできることが増えると考えている。