

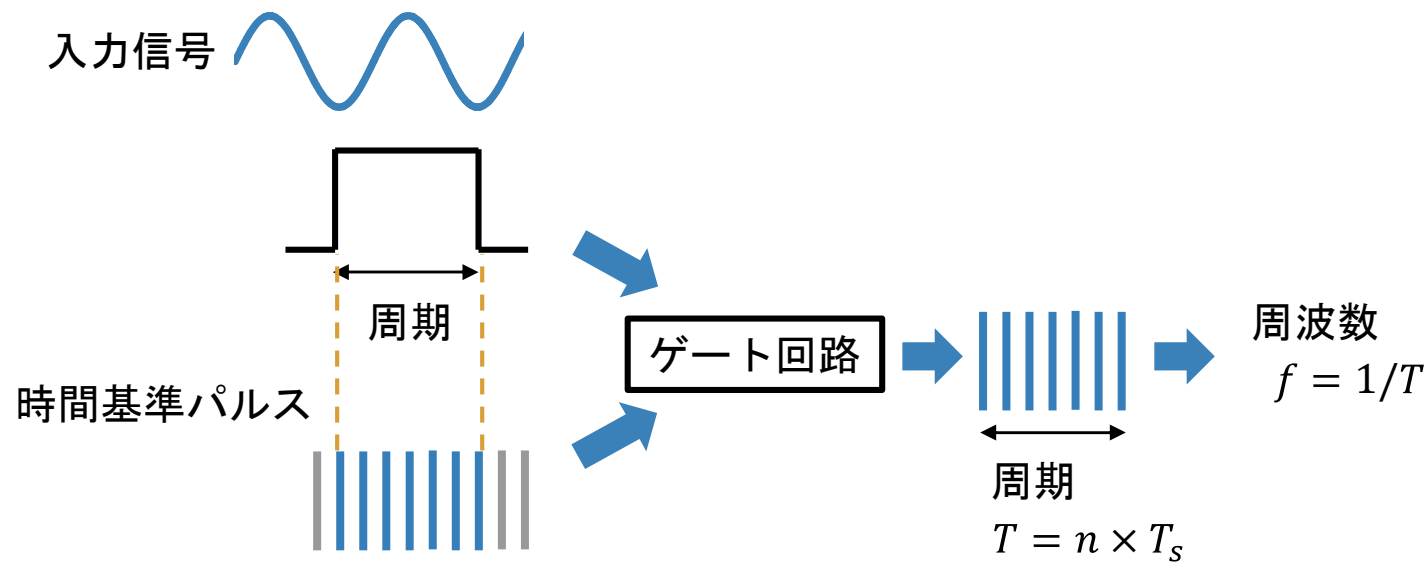
動的に変化する単一正弦波の 瞬時周波数の高精度推定法

東京理科大学
先進工学部電子システム工学科
教授 相川 直幸

2021年10月7日

単一正弦波の周波数推定法

- ✓ 周波数カウンタ
 - ✓ FFT
 - ✓ **ヒルベルト変換を用いた瞬時周波数**
- ←出力間隔が1周期以上
- ←サンプル毎に出力



➡ 出力に**1周期以上の時間間隔が必要**

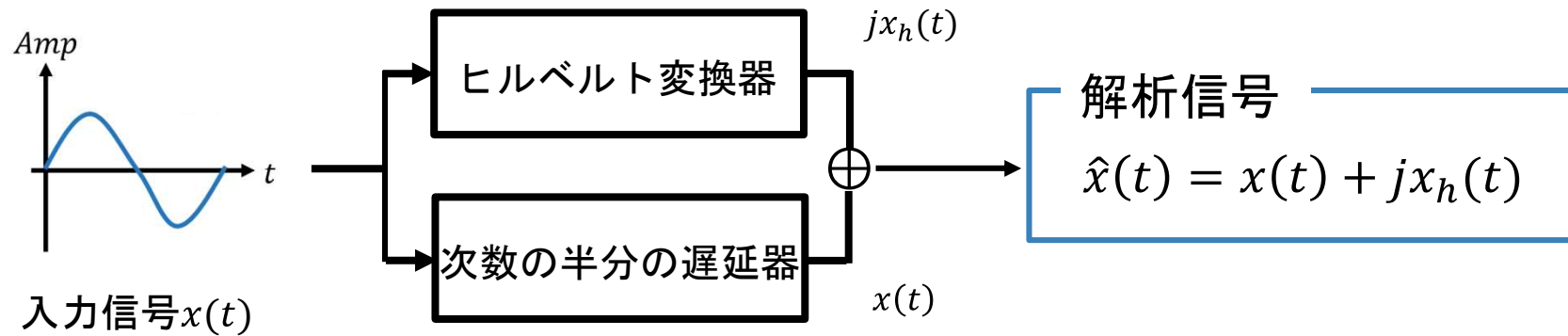
瞬時周波数を用いたアプリケーション

- ✓ 非破壊検査・音叉はかりに用いる位相変化
- ✓ モーターやインバータなどの制御のため
- ✓ 電力網における位相差
- ✓ 設備や機器の振動分析による故障診断
- ✓ MRE画像から弾性率の推定

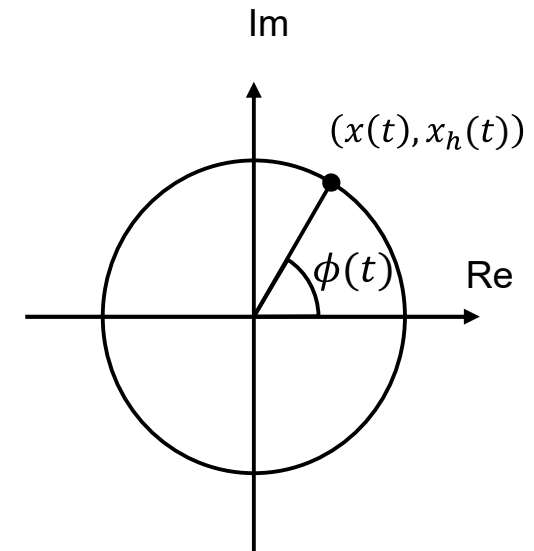
提案法の利点

- ✓ ヒルベルト変換器の次数低減・システム全体の次数低減
- ✓ 高精度な位相変化の抽出
- ✓ 回路規模縮小、消費電量の低減

瞬時周波数の導出

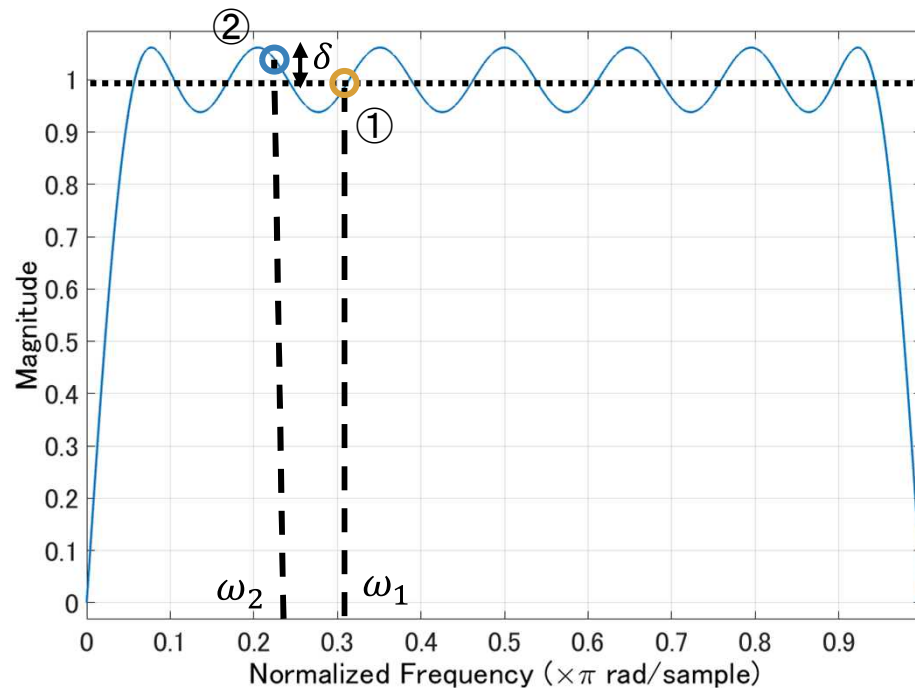


- 解析信号 $\hat{x}(t) = x(t) + jx_h(t)$
- 解析信号の位相 $\phi(t) = \tan^{-1} \frac{x_h(t)}{x(t)}$
- 瞬時角周波数 $\tilde{\omega}(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$
- 瞬時周波数 $f(t) = \frac{1}{2\pi} \tilde{\omega}(t)$



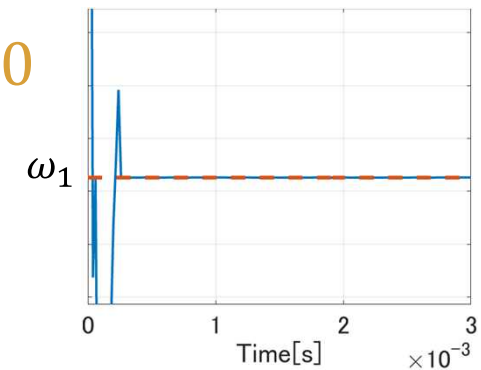
有限次数ヒルベルト変換器を用いた瞬時周波数推定の問題点

ヒルベルト変換器の振幅特性

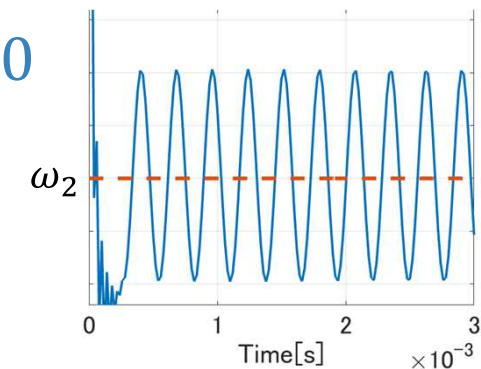


推定された瞬時角周波数

① $\delta = 0$



② $\delta \neq 0$



$\delta \neq 0$ で瞬時角周波数は振動する

瞬時角周波数の解析

$A \sin \omega_1 t$ に対して推定される瞬時角周波数

$$\tilde{\omega}(t) = \frac{2(1 - \delta)\omega_1}{1 + (1 - \delta)^2 + [(1 - \delta)^2 - 1] \cos(2\omega_1 t)}$$

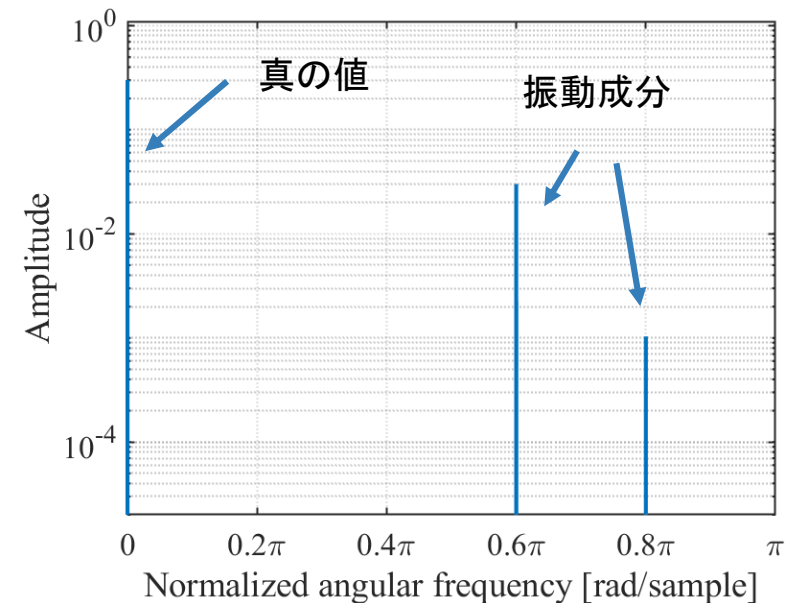
↓ フーリエ変換

$$\tilde{\omega}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\omega_1 n t)$$

$$a_n = \frac{4\omega_1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2\omega_1}} \tilde{\omega}(t) \cos(2\omega_1 n t) dt$$

$$a_{n+2} = \frac{2(1 + (1 - \delta)^2)}{1 - (1 - \delta)^2} a_{n+1} - a_n$$

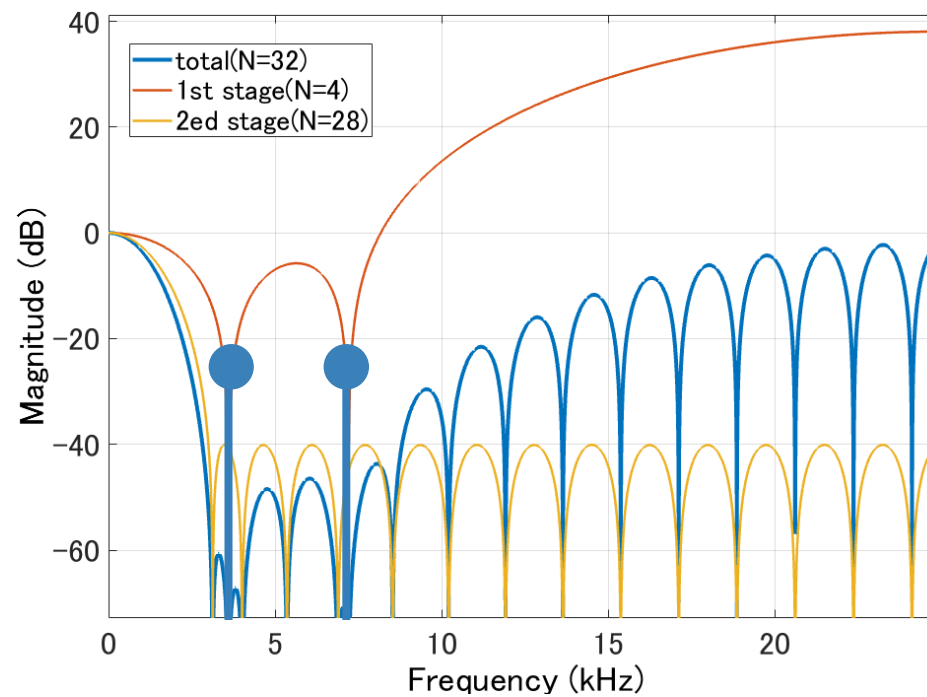
$$a_0 = 2\omega_1 \quad a_1 = 2\omega_1 \frac{\delta^2}{1 - (1 - \delta)^2}$$



推定された瞬時角周波数のスペクトル
($\omega_1 = 0.3\pi$)

伝送零点を有するFIRフィルタ

$$H_1(e^{j\omega}) = \prod_{i=1}^L (1 - 2 \cos \omega_i e^{-j\omega} + e^{-2j\omega})$$



可変フィルタの伝達関数

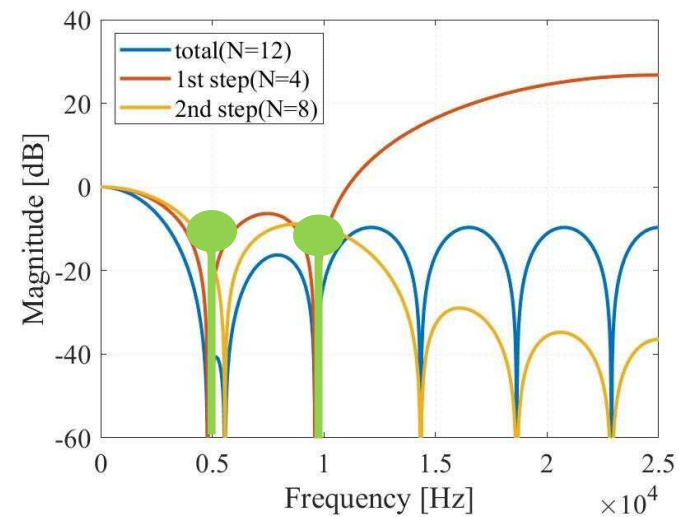
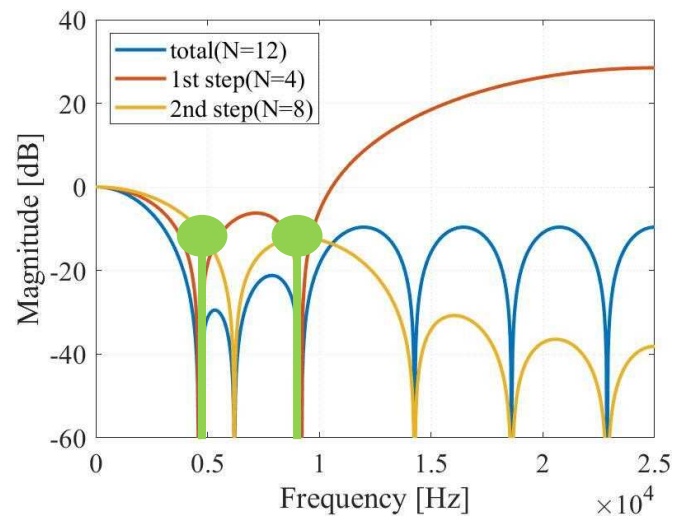
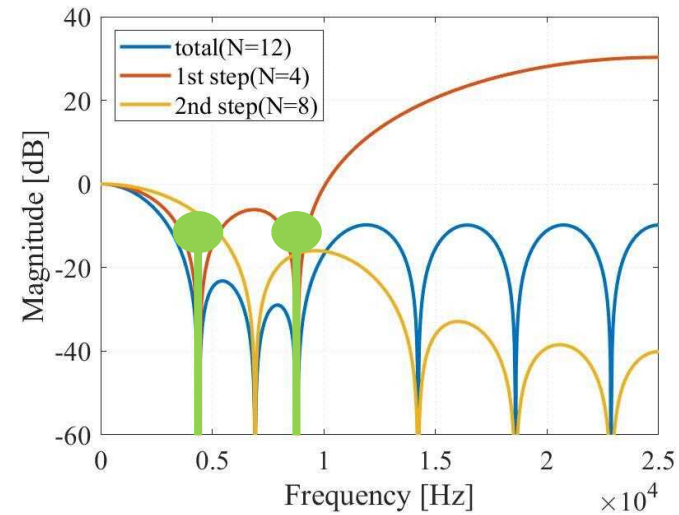
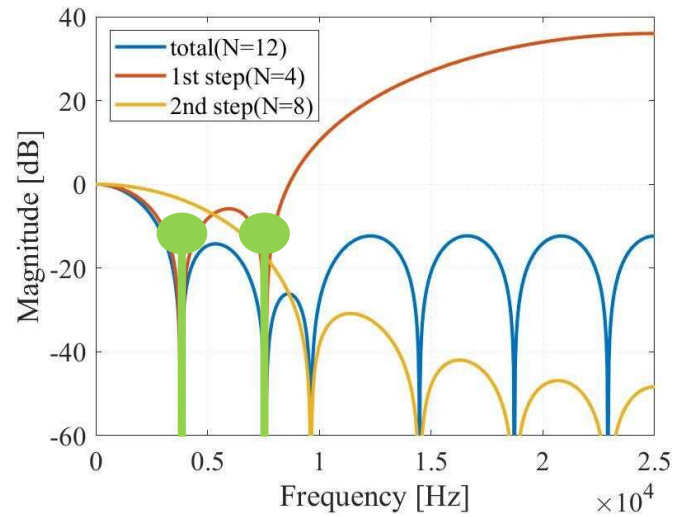
$$A(\omega, \alpha) = \underbrace{\prod_{b=1}^B 2\{\cos \omega - \cos 2b\alpha\}}_{\text{伝送零点項}} \times \underbrace{\sum_{k=0}^{(M-B)} \frac{c(k, \alpha) \cos k\omega}{1}}_{\text{補正項}}$$

$\left(\begin{array}{l} B : \text{伝送零点の数} \\ M : \text{フィルタ次数の半分} \\ \alpha : \text{可変パラメータ} \end{array} \right)$

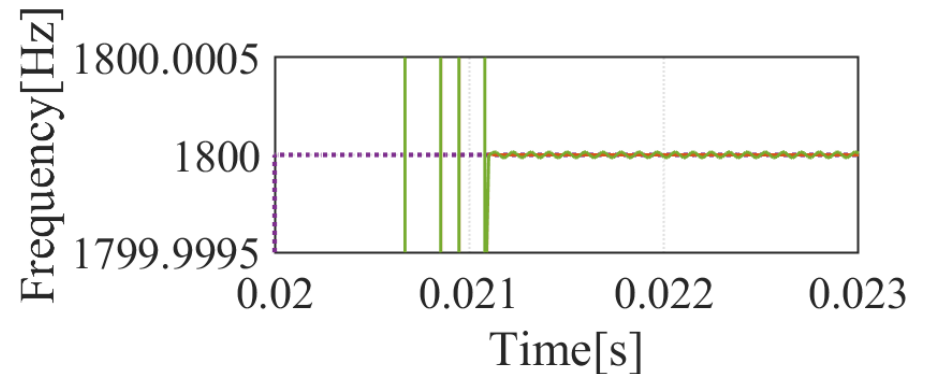
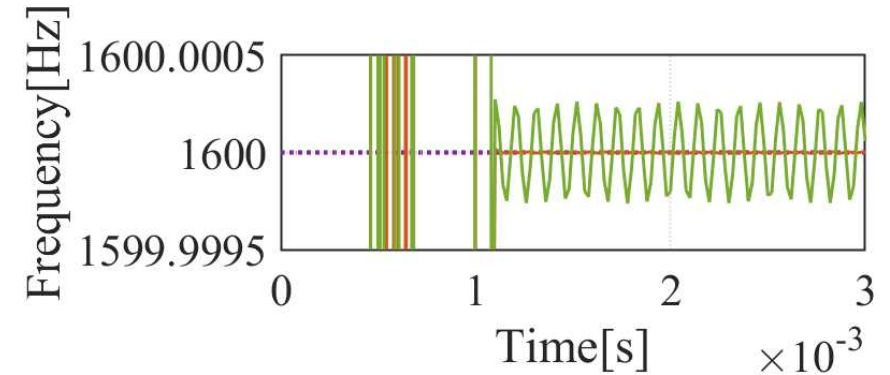
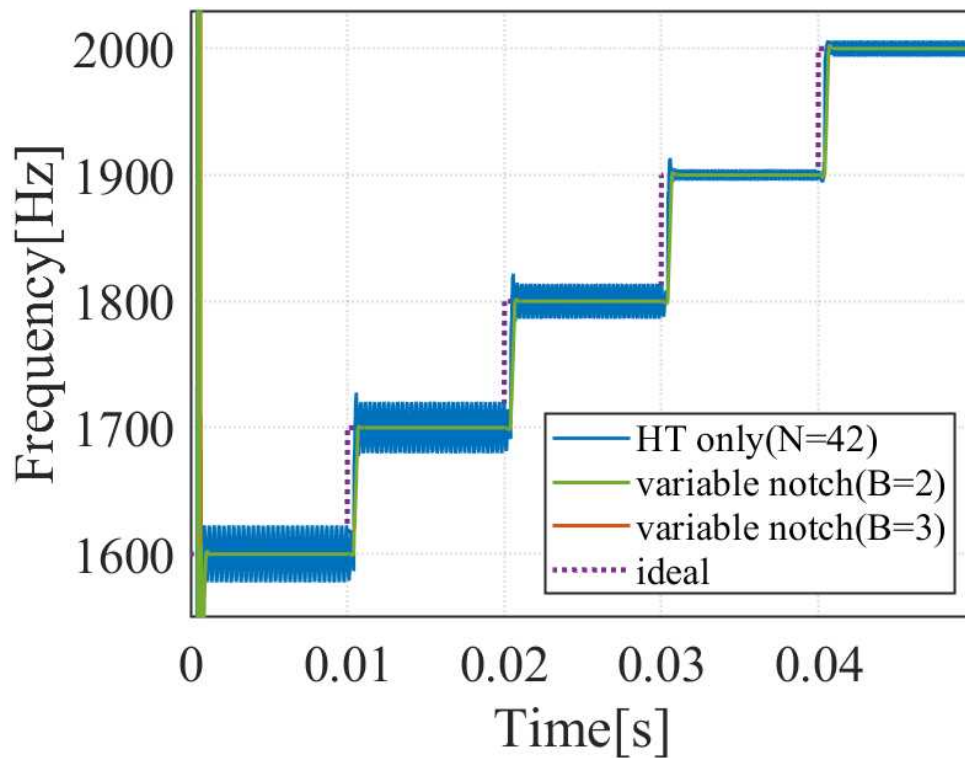
$$\underbrace{c(k, \alpha)}_{\text{補正項}} = \sum_{l=0}^L g(k, l) \left(\frac{\alpha - \omega'_{\min}}{\omega'_{\max} - \omega'_{\min}} \right) \quad \left[L : \text{多項式の次数} \right]$$

可変パラメータによる係数の変化を多項式より近似

可変フィルタの振幅特性



シミュレーション例



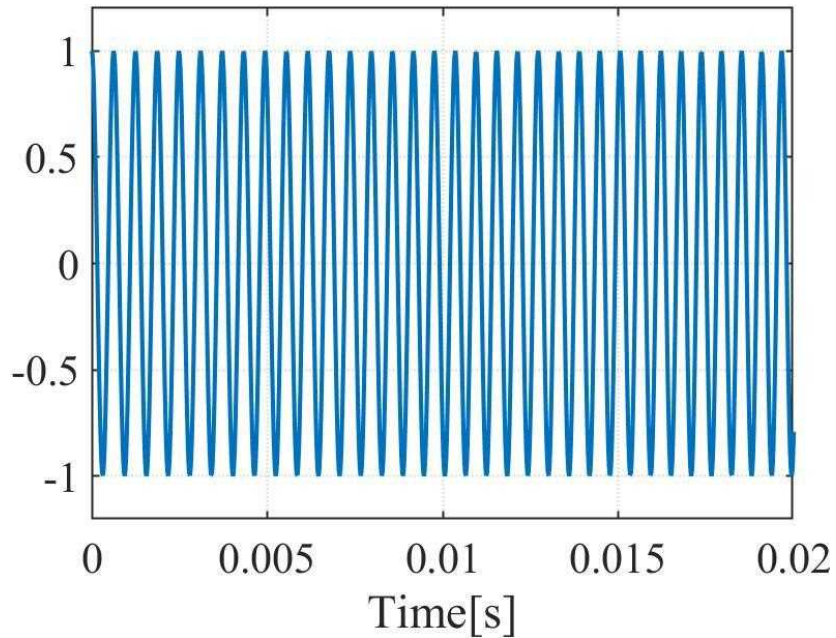
同精度に必要なシステムの次数

HTのみの場合： 182次

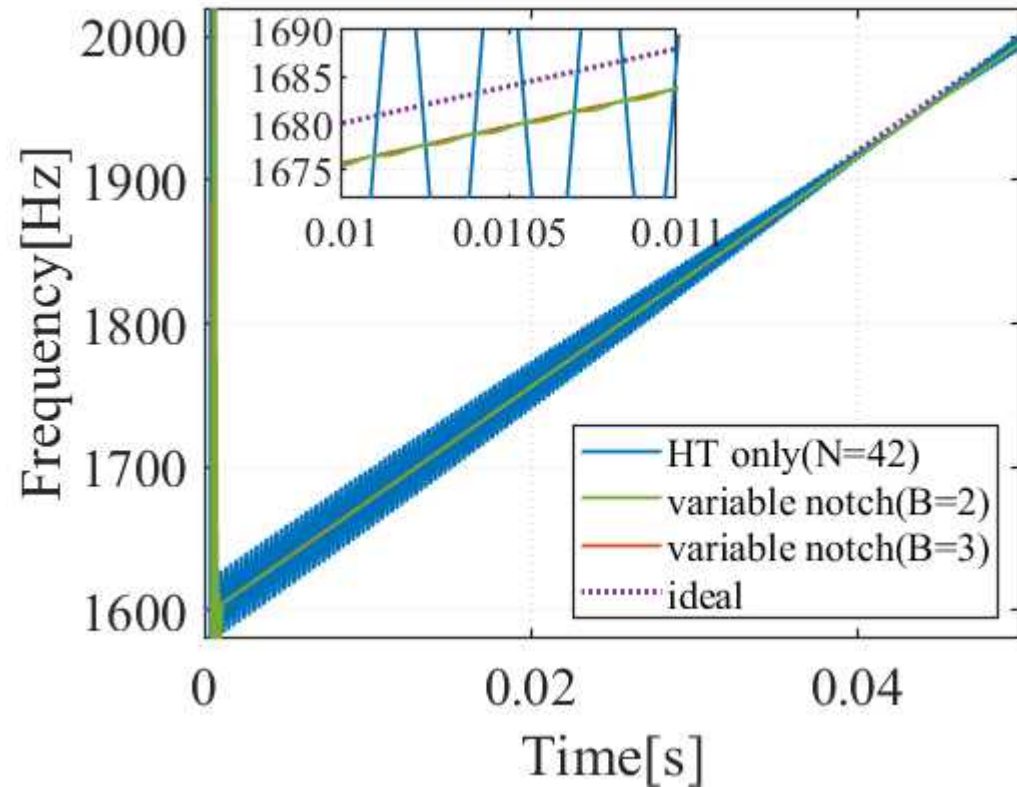
HT+低域通過フィルタ：(42+64)次

提案法：(42+12)次

シミュレーション例

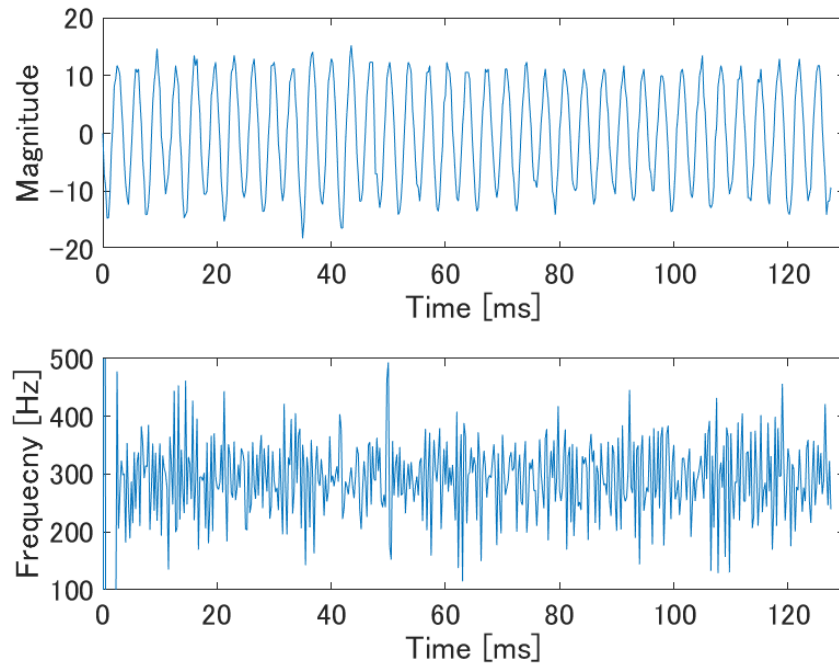


Sweepする時間波形

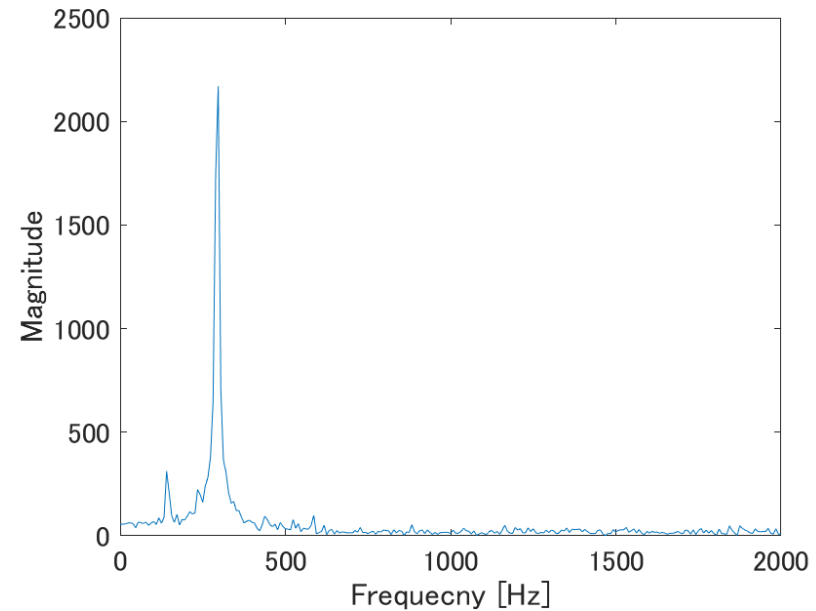


Sweepする瞬時周波数

モータの瞬時周波数



モーターの回転波形と
瞬時周波数



FFTを用いた周波数波形

- 対応周波数範囲
- ノイズが含まれる中での瞬時周波数の導出
- 複数の周波数が含まれた場合の瞬時周波数の導出
- ヒルベルトフィルタおよび可変フィルタ次数

- モーター回転機の回転数制御
- 音叉周波数計測
- 3相電力変換
- 周波数カウンター
- 設備や機器の振動分析による故障診断
- MRE画像から弾性率の推定
- ◆ 実データの提供と商品化に取り組んで頂ける
共同研究企業の募集

発明の名称 : 周波数推定装置、周波数推定方法、
及び周波数推定プログラム
出願番号 : 特願2021-002224
出願人 : 学校法人東京理科大学
発明者 : 相川 直幸

お問い合わせ先

東京理科大学
研究戦略・産学連携センター 辻本 明

T E L 03-5228-7431

F A X 03-5228-7442

e-mail tsujimoto_akira@admin.tus.ac.jp