

2016/11/14 (Mon.)

1. ロックインアンプの原理

(1) ある周波数の正弦波信号にノイズが乗っている波形から、正弦波信号のみを取り出すことを考える。ノイズの周波数と信号の周波数が近い場合、通常のフィルタ回路ではノイズを除くのは困難である。

(2) ロックインアンプ内部では、以下のような_____法を用いて特定の周波数成分のみを取り出している。

○ 取り出したい信号の周波数を f_{ref} とする。また、入力波形は幾つかの周波数の成分のフーリエ和であるとし、そのうちのある周波数 f の成分:

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f)$$

を考える。

○ まず、ロックインアンプは、入力波形に $A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$ を乗算する。すると、周波数 f の成分は

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f) \times A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}}) = \underline{\hspace{10cm}}$$

のように変化する。この新しい波形をさらに周波数成分に分解すると、

$$\underline{\hspace{10cm}}$$

○ この新しい波形を_____ (あるカットオフ周波数以下の周波数成分のみを通すフィルタ) に通す。カットオフ周波数が十分低い場合、上記成分のうち残るのは、

$$V_x^{\text{PSD}} = \underline{\hspace{10cm}}$$

である。

○ また、入力波形に $A_{\text{ref}} \cos(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$ をかける操作も行う。この場合、周波数 f の成分は

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f) \times A_{\text{ref}} \cos(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}}) = \underline{\hspace{10cm}}$$

$$= \underline{\hspace{10cm}}$$

のようになる。これを同様にフィルタに通すと、上記のうち残るのは、

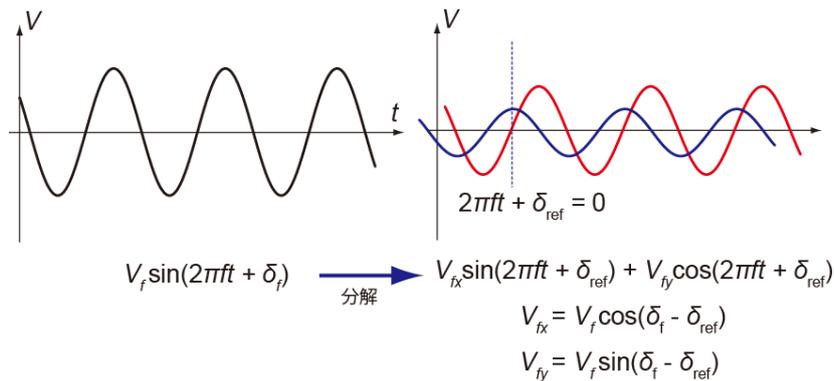
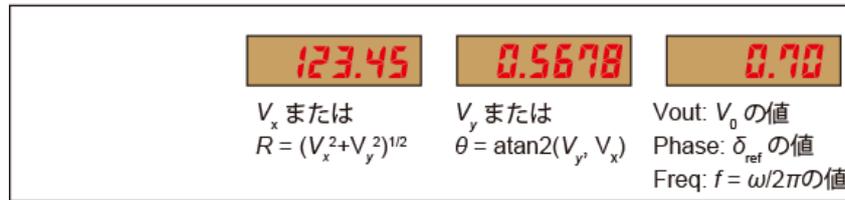
$$V_y^{\text{PSD}} = \underline{\hspace{15cm}}$$

である。

○ 入力信号がいくつもの周波数成分の重ね合わせである場合も、この_____法によって周波数 f_{ref} の成分のみを、しかも位相情報込みで検出することができる。

(3) ロックインアンプの詳細

$$V = V_x \sin(\omega t + \delta_{\text{ref}}) + V_y \cos(\omega t + \delta_{\text{ref}}) \text{ とした時の}$$



$2\pi ft + \delta_{\text{ref}}$ に対する sin の成分と cos の成分に分解することに対応。

- ✓ ロックインアンプは、 A_{ref} などの既知の値を用いて V_x^{PSD} および V_y^{PSD} から $V_x = V_{f=\text{ref}} \cos(\delta_f - \delta_{\text{ref}})$ および $V_y = V_{f=\text{ref}} \sin(\delta_f - \delta_{\text{ref}})$ を復元して表示する。(それぞれ左と右の表示窓の値)
- ✓ V_x は $A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$ に対して同位相の成分の振幅、 V_y は $A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$ に対して位相が 90 度ずれた成分の振幅である。(実際には実効値(振幅の $\sqrt{1/2}$ 倍)である)
- ✓ ロックインアンプでは Phase というパラメータが上記 δ_{ref} に対応する。つまり、Phase を変えることで、ロックインアンプで検出する信号の「時間の原点」を変えることができる。
- ✓ Auto Phase 機能は、 $\delta_f - \delta_{\text{ref}} = 0$ となるように勝手に δ_{ref} を選んでくれる機能である。
- ✓ 多くのロックインアンプには周波数 f_{ref} の電圧の正弦波 $V_{\text{out}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t)$ を出力する機能がある。(← δ_{ref} が無いことに注意)
- ✓ ローパスフィルタのカットオフ周波数は Time Constant τ というパラメータで設定できる ($f_{\text{cutoff}} = 1/(2\pi\tau)$ で与えられる)。
 - 大ざっぱに言って、 τ は積算時間に対応。長くするとノイズは減るが値が正しい値に落ち着くのに時間がかかる。今の測定の場合、300 msec あたりが適切。
- ✓ Harmonic パラメータを変えることで、 n 倍の周波数成分を取り出すこともできる。

☆ この方法は交流磁化率測定のほかにも、電気抵抗率測定、微分抵抗測定(以前話したやつ)、光学測定(光をチョッパーで区切ってわざと交流信号を作り出す)などにも使われる、基本的テクニックである。

“Laboratory Work in Physics B4” -- Handout No.6b

Your name (_____) Nov. 14th, 2016 (Mon.)

1. Mechanism of the lock-in amplifier

(1) Consider to pick up a sinusoidal signal of a certain frequency from a voltage with noise. It is generally difficult to remove noise by using ordinary filters when the frequencies of noise and signal are close.

(2) A lock-in amplifier use the _____ method to pick up the component of a certain frequency.

○ Assume that the frequency of the signal you want to pick up is f_{ref} . Also assume that the input signal is a Fourier sum of components with various frequencies. Now let's consider the component of frequency f :

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f)$$

○ First the lock-in amplifier multiplies $A_{ref} \sin(2\pi f_{ref} t + \delta_{ref})$ to the input signal. Then the component of f changes to

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f) \times A_{ref} \sin(2\pi f_{ref} t + \delta_{ref}) = \underline{\hspace{10cm}}$$

This new waveform can be further separated to sinusoidal waves as:

○ Then this new waveform is passed to a _____ filter, which only pass components with frequency lower than a cut-off frequency. If the cut-off frequency is low enough, the filter only passes

$$V_x^{PSD} = \underline{\hspace{10cm}}$$

○ The lock-in amplifier also multiplies $A_{ref} \cos(2\pi f_{ref} t + \delta_{ref})$ to the input signal. Then the f -component will become

$$V_f \sin(2\pi f t + \delta_f) \times A_{ref} \cos(2\pi f_{ref} t + \delta_{ref}) = \underline{\hspace{10cm}}$$

$$= \underline{\hspace{10cm}}$$

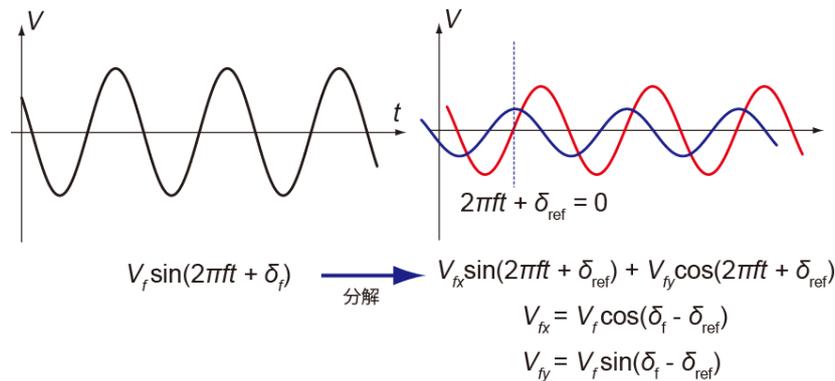
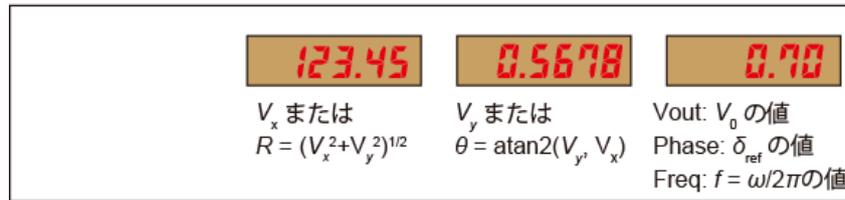
After passing this to the filter, the component that remains is

$$V_y^{\text{PSD}} = \underline{\hspace{15cm}}$$

Even when the input signal consists of multiple frequency components, one can pick up the component of frequency f_{ref} by using the _____ method, with the information about the phase shift.

(3) Details of the lock-in amplifier

$$V = V_x \sin(\omega t + \delta_{\text{ref}}) + V_y \cos(\omega t + \delta_{\text{ref}}) \text{ とした時の}$$



V_x and V_y correspond to sin and cos components separated by $2\pi f t + \delta_{\text{ref}}$

- ✓ A lock-in amplifier shows $V_x = V_{f=\text{ref}} \cos(\delta_f - \delta_{\text{ref}})$ and $V_y = V_{f=\text{ref}} \sin(\delta_f - \delta_{\text{ref}})$ using values such as A_{ref} , V_x^{PSD} , and V_y^{PSD} (V_x and V_y are shown in the left and the central windows respectively)
- ✓ V_x is the amplitude of the component without phase shift compared with $A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$. V_y is the amplitude of the component with 90-deg phase shift compared to $A_{\text{ref}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t + \delta_{\text{ref}})$. Actually shown are the root-mean-square (rms) values ($\sqrt{1/2}$ times the amplitude).
- ✓ In the lock-in amplifier, the parameter “Phase” corresponds to δ_{ref} . In other words, by changing the parameter Phase, we can change the “origin” of the time.
- ✓ By pressing “Auto Phase”, the amplifier chooses δ_{ref} so that $\delta_f - \delta_{\text{ref}} = 0$.
- ✓ Most lock-in amplifiers can output sinusoidal voltage wave with frequency f_{ref} : $V_{\text{out}} \sin(2\pi f_{\text{ref}} t)$. Notice that the sin has no phase factor δ_{ref} .
- ✓ The cutoff frequency of the low-pass filter is determined by the parameter “Time Constant τ ” i.e. $f_{\text{cutoff}} = 1/(2\pi\tau)$
 - Roughly speaking, τ corresponds to an integration time. If one sets τ longer, one can reduce noise but on the other hand longer time is required to until the value settle the correct value. For our purpose, 300 msec is appropriate.
- ✓ By changing the parameter “Harmonic”, we can pick-up n -th harmonic component.

☆ This lock-in technique is very commonly used for such as differential resistivity measurements and optical measurements (on and off the light with a “chopper” to produce ac signal).