電子情報工学専門実験

B2: ロックイン信号計測

1 目的

物理量の測定は、ある目的の信号を、各種センサーで受け止め、電気信号に変換することで電気計器 による測定が可能になる。目的の信号が微小な場合、純粋な信号のみが検出されることは稀で、雑音が 電気信号に含まれることになる。その場合、そこから目的の信号を抽出する作業が必要になる。本実験 では、そのような雑音に埋もれてしまった微小な信号の測定に非常に有効なロックインアンプを用いた 計測を行う。実験を通して、その動作原理・特徴を理解すると共に、測定の基礎技術を身につける。



図 1.1 ロックインアンプの機能

2 ロックインアンプ

ロックインアンプでは、測定対象の周波数のみを非常に鋭い選択性で取り出せるため、強い雑音除去 効果を得ることが出来る。以下に、その基本概念を示す。

図 2.1 に、雑音に埋もれた一般的な信号と、特定の周波数成分を持つ周期信号の特徴を示す。雑音は 通常、多くの周波数成分を持つ波が合成されたものである。所望の信号が非常に弱い場合、信号は雑音 中に埋もれてしまい、時間応答から観測することは非常に困難である。







図 2.2 バンドパスによる特定周期信号の抽出

図 2.2 は、ロックインアンプで行う周波数帯域選択の様子である。先に述べたように目的信号が雑音 に埋もれた状態であっても、周波数帯域幅の狭いフィルタを通して信号を抽出すれば、所望の信号を観 測することが可能になる。

2.1 バンドパスフィルタとロックインアンプ

上記のように、特定の周波数を選択して取り出すことの出来るバンドパスフィルタを用いれば、雑音の除去が可能であり、目的の信号を抽出することが出来る。しかし、一般的に実現できるバンドパスフィルタではその能力に限界があり、以下に述べるようにロックインアンプがそれに比べて非常に有効である。

バンドパスフィルタの鋭さ/性能の指標として、以下の式で定義される Q が用いられる。上記、図2. 2に示すように、f、 Δ f はそれぞれ f:中心周波数、 Δ f:帯域幅と呼ばれ、信号処理の重要な要素である。

$Q = f / \Delta f$

Qが大きい程帯域幅が狭く、雑音除去能力が高くなる。一般的なフィルタではフィルタを構成する部品の精度や温度/時間安定度に限界があり、実現できるQは100程度である。一方、ロックインアンプは以降述べる特殊な方法により、107程度のQを得られる。しかも、中心周波数fを測定周波数に自動的に追尾できる。

・一般的なバンドパスフィルタ、ロックインアンプそれぞれの特徴

| | f | | | |
|-----------|----------------------------------|-----------|--|--|
| バンドパスフィルタ | 100 程度(1kHz/10Hz) | 固定(可変は困難) | | |
| ロックインアンプ | ~10 ⁷ 程度(1kHz/0.1mHz) | 測定信号に追従 | | |



図 2.3 にロックインアンプの概要を示す。**測定信号および参照信号の2つを入力**し、それらが Phase Sensitive Detector (PSD)で乗算され、その後 Low Pass Filter(LPF)を通して、目的の信号の強度成分 を持つ出力信号を得る。以下、その動作原理を述べる。

以下の、同じ角振動数 $\omega=2\pi f$ を持つ、測定信号 Vsと参照信号 Vsを考える。(s: signal, r: reference)

$$V_s = V_0 \sin(\omega t) \tag{1}$$

$$V_r = \sin(\omega t) \tag{2}$$

これらを PSD で積算すると、周期信号のおける和成分と差成分の2つに分離される。

$$V_{s} \times V_{r} = V_{0} \left(-\frac{1}{2} \right) \left\{ \cos(\omega t + \omega t) - \cos(\omega t - \omega t) \right\}$$
$$= \frac{V_{0}}{2} \left\{ \underbrace{1}_{\text{int}} + \cos(2\omega t)_{\text{int}} \right\}$$
$$\uparrow \mathbf{\hat{n}} \mathbf{\hat{$$

従って、参照信号と同じ周波数(角振動数)をもつ信号は、PSDでの積算により、直流成分に変換される。雑音は周波数成分を保持するため、LPFで周波数成分を除去することで、測定信号の強度 Wを含む直流成分を取り出し、目的の信号強度を測定することが可能になる。



2.3 PSD:スイッチングによる乗算(もう少し実際の回路に近い内容で考える)



図 2.5 ロックインアンプの構成

実際のロックインアンプでは、微小な信号抽出のための大きなダイナミックレンジ(120dB)を PSD で実現するため、スイッチングによる乗算を PSD で行っている。上式(1)、(2)で表される測定信号と参照信号が入力された場合、測定信号は、図 2.5 の回路を通して、参照信号と同期した信号でスイッチン グされる。従って、PSD では以下のように方形波信号の乗算が行われることになる。

(4)、(5) が PSD で乗算され、以下のようになる。

$$V_{s1} \times V_{r1} = \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \right) \left\{ \cos(\omega_s t + \phi + \omega_r t) - \cos(\omega_s t + \phi - \omega_r t) \right\} \\ + \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \right) \left\{ \cos(\omega_s t + \phi + 3\omega_r t) - \cos(\omega_s t + \phi - 3\omega_r t) \right\} \\ + \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \right) \left\{ \cos(\omega_s t + \phi + 5\omega_r t) - \cos(\omega_s t + \phi - 5\omega_r t) \right\} \\ + \cdots$$
(6)

ロックインアンプでは、参照信号と同期した信号の処理による検波を行う(同期検波)。 従って、入力信号のうち参照信号と同周波数、すなわち同角振動数ω_s=ω_rの成分について考えると、以 下のようになる。

$$V_{s1} \times V_{r1} = \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \right) \{ 2\cos(2\omega_s t + \phi) - \cos(\phi) \} \leftarrow \Box \mathcal{O} \mathbf{I} \mathbf{I} + \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \right) \{ \cos(4\omega_s t + \phi) - \cos(2\omega_s t + \phi) \} + \frac{4V_0}{\pi} \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \right) \{ \cos(6\omega_s t + \phi) - \cos(4\omega_s t + \phi) \} + \cdots$$

$$(7)$$

この信号について、LPFを通して周波数成分(ωを含む成分)を取り除くと、以下の<u>6に比例した直流成</u>分のみが取り出され、目的の信号中の強度成分を観測することが可能になる。

$$OUTPUT = \frac{2V_0}{\pi} \cos(\phi)$$
* ϕ は位相差、通常固定されていることに注意。
(8)

2.4 ダイナミックリザーブ

ロックインアンプでは、雑音に埋もれた微小な信号を取り出す。このとき、信号の大きさに対して、ど れほど大きい雑音まで許容できるかを示す値が、ダイナミックリザーブであり、以下の式で表される。

Dynamic reserve [dB] =
$$20 \times \log \frac{$$
最大雑音電圧 (*Peak - to - peak*)}{信号入力フルスケール (*rms*)} (9)

*実際の装置では、測定感度: Sensitivity と、ダイナミックリザーブ High-Low-Medium のボタンで、 ダイナミックレンジが決定される。各設定値において、装置に依存した一定の値が決定される。(詳し くは、各装置の取扱説明書で確認→本指導書巻末 p. 14 の「付録 1: NF LI5640 のダイナミックリザー ブ値」参照)

装置の安定度のため、信号が測定できる範囲での、出来る限り小さなダイナミックリザーブで測定を行 うことが好ましい。

2.5 参照信号の位相調整

式(8)で示されたように、同期された信号であっても、位相によって出力は変化する。実際のロック インアンプは、信号処理により、出力信号は以下のようになる。従って位相差が無い場合(*φ*=0)、機能 的には交流電圧計と同様となる。

$$OUTPUT = V_0 \cos(\phi)$$

(10)

そこで、参照信号と測定信号間の位相差を0°に調整して PSD に入力する。ロックインアンプには図2.4に示すように移相回路 (Phase Shifter) が組み込まれており、参照信号の移送を調節することが可能である。

同期した出力信号において移送を変化させた場合、次のページ図 2.6 に示すように、LPF 出力が変化する。従って、 VO を正確に把握したい場合、厳密に位相を調節し、 *φ*=0 とする必要がある。

以下、図 2.4 に、位相と出力の関係を示す。cos(ø)を反映して、出力が変化する。

*手動で正確に位相を調整するには、図 2.4 の特性を利用し、まず、出力が 0 になるように位相を調整 する。その後、位相を 90° 戻して正確な出力を得るのが有効である。



図 2.6 同期信号における位相差依存性 (~X 出力)

2位相ロックインアンプ

上に示したように、ロックインアンプにおける位相調整は、正確な出力を得るために非常に重要であ る。ただし、入力信号の位相が不安定な場合は、連続的に正確な出力を得ることが非常に困難となる。 そこで、現在は以下に示す、2位相式のロックインアンプが多く用いられている。図 2.7 に示すよう に、通常の参照信号に加えて 90° 位相の異なる参照信号を用い、2つの PSD 出力を同時に処理する。 以って、式(8)で得られる出力 X に加え、位相の 90° 異なる出力 Y を得る。これより、以下のような出 力 R、 φ が得られ、位相調整無しで目的信号強度 V₀ が得られると供に、参照信号との位相差 φ も計測 が可能になる。X, Y, R, φ については、以下のように表される。

$$X = V_0 \cos(\phi) \tag{11}$$

$$Y = V_0 \sin(\phi) \tag{12}$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{V_0^2 \cos^2(\phi) + V_0^2 \sin^2(\phi)} = V_0$$
(13)

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X}{Y} \tag{14}$$



図 2.7 2位相ロックインアンプの構成

また X, Y, Z, φそれぞれのパラメータについては、以下図 2.8 のように理解できる。

ロックインアンプで出力されるR、X、Y、θ:位相/Phase は、 参照信号の位相を差をφとすると、以下のように定義されている。



Rを選択すると、位相θ(位相差φ)に係わりなく信号の大きさを測定できる。 ただし、位相が安定しているのであればYを0に調整して、Xで信号の大きさを求める方が、 回路が簡素であり雑音の影響が少ない。 基準とする位相(φ=0)は、REFERENCEのPHASEキーで調整できる。 また、PHASEのAUTOキーを押すことで、自動的にY~0の位置をφ=0に設定できる。

図 2.8 2 位相ロックインアンプにおける、X,Y,R, ϕ の定義

演習1:

本指導書 p. 15「付録 2: Mathematica 計算例 1」に、Mathematica で PSD 出力を模擬する計算例を示 している。例に倣って、以下の項目を検討せよ。

初期状態: 測定信号周波数 203 Hz 参照信号周波数 200 Hz 位相差 0° 測定信号強度 5 V 参照信号の矩形派 計算次数 8次まで

- 1) 測定信号周波数を 200, 202, 205, 300, 400, 600, 1000 Hz と変化させて、 出力への影響を検討せよ。
- 2) 測定信号周波数を 600 とし、矩形派計算次数を 1, 2, 5, 10 と変化させて、 出力への影響を検討せよ。
- 3) 測定信号周波数を 200 として参照信号と合致させ、位相差を 0,10,90,180,270,360。と変化させ て、出力への影響を検討せよ。

3 実験装置

本実験では以下の装置を使用する。それぞれの実験装置の概観と、使用する機能、内容を以下に示す。

3.1. ロックインアンプ: Lock-in amplifier

ロックインアンプ:NF LI5640



3.2. ファンクションジェネレーター: Function Generator、波形発生器

ファンクションジェネレータ: Tabor Electronics 8020



3.3. オシロスコープ: Oscilloscope、波形の計測器





3.4. その他

- ・LED: Light Emitting Diode、発光ダイオード、発光素子
- ・フォトディテクター: Photo Detector、受光素子
- ・ライトチョッパー:Light Chopper、
 本実験では光を周期的にカットし、擬似的に周期信号を作成する。
 また、固定の出力電圧を持つ方形の周期信号を出力できるので、それを参照信号として
 利用する。

4 実験

本実験では、蛍光灯を点灯した室内で LED を弱く発光させ、それらの光をフォトディテクターで受け止める。ロックインアンプを用いることで、大きな蛍光灯からの光の信号に埋もれた LED からの信号を抽出する。以下図 4.1 に実験当初の設定を示すので、大まかなイメージをつけてから実験に取り組むこと。



- ・LED にはファンクションジェネレーターからパルス電圧を入力し、発光させる
- ・LED の発光を、フォトディテクターを用いて観測

・ファンクションジェネレーター、フォトディテクターの出力をオシロスコープで確認

・フォトディテクターの出力から LED の信号のみをロックインアンプを用いて検出

図4.1 実験(4.1~4.2)の設定

4.1 前準備: 測定信号を発生させる

4-1-1 ロックインアンプ、オシロスコープ、ファンクションジェネレーターの電源を入れる。

4-1-2 ファンクションジェネレーターで 100Hz、1.0V/0.0V の矩形波を発生させる。そして、ファンク ションジェネレーターからの出力をオシロスコープの CH2 へ入力させ、オシロスコープを調整してそ の波形を確認する。

4-1-3 この時のファンクションジェネレーターの参照信号出力(同期出力)をオシロスコープの CH1 へ入力させ、その波形を確認する。

【レポート】参照信号の電圧と周期を求めよ。

4-1-4 ファンクションジェネレーターで 150Hz、2.0V/0.0V の矩形波を発生させ、同様にオシロスコー プで信号と参照信号の波形を確認する。

【レポート】参照信号の電圧と周期を求めよ。

4-1-5 ファンクションジェネレーターで 200Hz、2.7V/0.0V の矩形波を発生させ、同様にオシロスコー プで信号と参照信号の波形を確認する。

【レポート】参照信号の電圧と周期を求めよ。

4-1-6 ファンクションジェネレーターからの出力を T 型コネクタで分岐させて LED に接続し、LED が 発光することを目視で確認する。

※この時、発光強度が適切かティーチングアシスタントに確認をしてもらうこと。

4-1-7 フォトディテクターを LED から 60cm のところに固定し、その出力をオシロスコープの CH1 へ 入力させて、信号を確認する。

【レポート】この時の波形を手書きのラフなもので構わないのでグラフとして記録せよ。なお、縦軸と 横軸の値はできるだけ正確に記録せよ。

--

4-1-8 【レポート】この時、LED を手で覆って光を遮ってもフォトディテクターからの出力はほとんど 変化しない。その理由を簡潔に述べよ。

4-1-9 フォトディテクターを LED から 10cm のところに移動させ、その出力をオシロスコープで確認 する。

【レポート】この時の波形を手書きのラフなもので構わないのでグラフとして記録せよ(波形が時間的に変化するので、ある瞬間の波形を記録すればよい)。なお、縦軸と横軸の値はできるだけ正確に記録せよ。

4-1-10【レポート】フォトディテクターを 10cm に近づけたことで波形が変化した理由を簡潔に述べよ。

4-1-11 【レポート】フォトディテクターを 10cm に近づけた時、波形が単純に形状を変えるだけでなく、時間的にも変動するようになった。この時間的変動が発生した理由について考察せよ。

4.2 ロックイン計測

4-2-1 これまで順序通りに作業していると、ファンクションジェネレーターから LED に 200Hz、 2.7V/0.0Vの矩形波が印加され、LED とフォトディテクター間が 10 cm に設定されている。このことを 確認する。

4-2-2 ファンクションジェネレーターの参照信号出力(同期出力)をロックインアンプの参照信号入力 端子に接続する。

4-2-3 フォトディテクターから出力(オシロスコープの CH1 入力端子部分にて T型コネクタで分岐させて取り出す)をロックインアンプの信号入力端子に接続する。

4-2-4 順序通りに作業をしていれば次ページのように配線されているはずなので確認する。

4-2-5 ロックインアンプの REFERENCE 部分の FREQ キーを押すと、入力された参照信号の周波数が 計測され、表示される。これがファンクションジェネレーターで設定した 200Hz に一致していること を確認する。

4-2-6 ロックインアンプの REFERENCE 部分の Phase キーを押し、その次に Auto キーを押し、ロッ クインアンプの動作を確認する。 ※動作確認が良く分からない場合はティーチングアシスタントに相談する。

4-2-7 【レポート】 <u> $\theta \in 30^{\circ}$ ステップで 360[°] 変化させ、X、Y、R の値をそれぞれ測定せよ</u>。(Phase → Auto キーを押したとき Y~0 になることを確認すること。そこを起点に θ を変化させること。)

4-2-8 矩形波の周波数を 240Hz に設定し、その時のロックインアンプの挙動を確認する。そして、この ような挙動となった原因について実験班員と議論する。

【レポート】この時のロックインアンプの挙動を簡潔に述べよ。そして、実験班員と議論したロックインアンプの挙動の原因と、そのように考えた根拠について述べよ。

4-2-9 矩形波の周波数を 200Hz に戻し、次のレポートに必要なデータを収集する。

【レポート】LED-フォトディテクター間の距離を 10 ~ 60 cm の範囲で変化させ、5 cm おきに X と Y をそれぞれ測定せよ。測定時は、適切な測定レンジを用いているか注意すること。ここで、測定時の Dynamic reserve の表示 と、Sensitivity、Time constant の値を記録する。本指導書 p. 14、「付録 1 : LI5640 のダイナミックリザーブ値」を参照し、各測定におけるダイナミックリザーブ値も記録する。

4.3 チョッパーを用いた直流測定信号のパルス化とその測定

4-3-1 チョッパーの参照信号出力をオシロスコープで確認する。(注:ファンクションジェネレーターの 出力をオシロスコープの CH2 から外すとインピーダンスのマッチングが取れなくなるので外さないこ と。それとは別のポート(CH1)で波形を確認すること。また、トリガーは下向きの方が取りやすい。) 【レポート】チョッパーの参照信号出力の電圧と周期を求めよ。

4-3-2 ロックインアンプに導入する参照信号をチョッパーからのものに繋ぎ変える。

【レポート】チョッパーからの参照信号の周波数をロックインアンプで調べよ。また、この参照信号の 周波数が 4-4-1 の結果と合致することを確認せよ。

4-3-3 ファンクションジェネレーターの出力をパルスモードから直流モードに切り替え、フォトディテ クターの出力をオシロスコープ経由でロックインアンプに導入した上で、レポートに必要な次のデータ を収集する。

4-3-4 【レポート】 4-2-8 と同様の測定を LED-フォトディテクター間の距離を 20 ~ 60 cm の範囲で行 え。測定時の Dynamic reserve の表示と、Sensitivity 、Time constant の値を記録する。また、各測 定におけるダイナミックリザーブ値も記録する (p. 15 参照)。

4.4 演習2

4-4-1 【レポート】4-2-9 および 4-3-4 で得られた結果について、本指導書(p. 17)の「付録 2: Mathematica 計算例 2」を参考にして、プログラム Mathematica を用いて、出力 R を関数 Ar⁻² (A は定数、r は LED-ディテクター間の距離)でフィッティングを行え。その結果として出てくる A は記録しておく こと。(レポート用グラフは各自別途作成すること)

4-4-2【レポート】上の結果を用いて、4-2-9 および 4-3-4 それぞれの結果について、LED-フォトディテ クター間が 5cm および 100cm の時の、R の値を予測せよ。

4-4-3【レポート】出力 R が関数 A r⁻² でフィッティングできる理由について、物理的意味を述べよ。

4.5 後片付け

- 4-5-1 LED のケーブルを外す。(LED を破損する恐れがあるので、まず LED のケーブルを先に外す)
- 4-5-2 全ての機器の電源を切る。
- 4-5-3 全てのケーブル・コネクタを外し、これらを元にあった場所に戻す。
- 4-5-4 チョッパーを元にあった場所に戻す。

5 レポート

・第4章中の実験を行った項目のうち、【レポート】の記述がある項目について、出来るだけグラフ、 表などを交えてレポートを作成し、提出すること。

6 参考

- ・ロックインアンプのしくみ、フィルター関係
 - 1. 遠坂俊昭「計測のためのフィルタ回路設計」
 - 2. NF ホームページ、雑音に埋もれた信号の測定 http://www.nfcorp.co.jp/keisoku/noise/
 - 3. 例えば、フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』/ フィルタ回路

・LED、フォトディテクターについて

4. 半導体デバイス関係の本で、"pn 接合"、"発光ダイオード"、"フォトダイオード"についてみると詳しい。例えば、谷口研二、宇野重康「半導体デバイスの物理」など。

4.5 ダイナミックリザーブの操作

表4-2 実際のダイナミックリザーブの値 (参考値)

DR:ダイナミックリザーブ

2.5557 / /

| ダイナミックリザーブ | | LOW | | MEDIUM | | HIGH | | |
|----------------------|----------------------|---------------|------|--------|------|------|------|-----|
| | 感度 | (sensitivity) | AC利得 | 実DR | AC利得 | 実DR | AC利得 | 実DR |
| I (10 ⁶) | I (10 ⁸) | A, A-B | dB | dB | dB | dB | dB | dB |
| 1 µ A | 10nA | IV | 0 | 0 | 8 | 8 | -14 | 14 |
| 500nA | 5nA | 500mV | 6 | 0 | -8 | 14 | -8 | 14 |
| 200nA | 2nA | 200mV | 12 | 2 | 0 | 14 | 0 | 14 |
| 100nA | 1nA | 100mV | 18 | 2 | 6 | 14 | 0 | 20 |
| 50nA | 500pA | 50mV | 24 | 2 | 6 | 20 | 0 | 26 |
| 20nA | 200pA | 20mV | 30 | 4 | 12 | 22 | 0 | 34 |
| 10nA | 100pA | 10mV | 36 | 4 | 12 | 28 | 0 | 40 |
| 5nA | 50pA | 5mV | 42 | 4 | 18 | 28 | 0 | 46 |
| 2nA | 20pA | 2mV | 48 | 6 | 22 | 32 | 0 | 54 |
| 1nA | 10pA | 1mV | 48 | 12 | 22 | 38 | 0 | 60 |
| 500pA | 5pA | 500 µ V | 48 | 18 | 22 | 44 | 0 | 66 |
| 200pA | 2pA | 200 µ V | 48 | 26 | 22 | 52 | 0 | 74 |
| 100pA | 1pA | 100 µ V | 48 | 32 | 22 | 58 | 0 | 80 |
| 50pA | 500fA | 50 µ V | 48 | 38 | 22 | 64 | 0 | 86 |
| 20pA | 200fA | 20 µ V | 48 | 46 | 22 | 72 | 0 | 94 |
| 10pA | 100fA | 10 µ V | 48 | . 52 | 22 | 78 | 0 | 100 |
| 5pA | 50fA | 5μV | 48 | 58 | 22 | 84 | 0 | 106 |
| 2pA | 20fA | 2μV | 48 | 66 | 22 | 92 | 0 | 114 |
| 1pA | 10fA | 1μV | 48 | 72 | 22 | 98 | 0 | 120 |
| 500fA | 5fA | 500nV | 48 | 78 | 22 | 104 | 0 | 126 |
| 200fA | - | 200nV | 48 | 86 | 22 | 112 | 0 | 134 |
| 100fA | <u> </u> | 100nV | 48 | 92 | 22 | 118 | 0 | 140 |
| 50fA | _ | 50nV | 48 | 98 | 22 | 124 | 0 | 146 |
| _ | _ | 20nV | 48 | 106 | 22 | 132 | 0 | 154 |
| _ | | 10nV | 48 | 112 | 22 | 138 | 0 | 160 |
| - | _ | 5nV | 48 | 118 | 22 | 144 | 0 | 166 |
| _ | - | 2nV | 48 | 126 | 22 | 152 | 0 | 174 |

AC利得: 位相検波器PSDより前の利得。 実DR : ダイナミックリザーブの値。PSD後のDC利得に等しい。 dBとリニア倍率の関係: 0dB→1倍、6dB→2倍、10dB→3倍、12dB→4倍、14dB→5倍、18dB→8倍、20dB→10倍 この表に記載されているダイナミックリザーブは、感度と最大許容入力電圧(または電流)の 比です。言い換えると、最良の条件で得られる値です。 正弦波を仮定したときの、実際の最大許容入力電圧(電流)は、感度フルスケールを上の表 にある実DR(=DC利得)倍した値です。 120dB以上のダイナミックリザーブを確保して測定しようとすると、極めて大きな時定数を必 要とします。測定する信号の周波数に近い周波数成分の雑音があるときは、あまり大きなダイ ナミックリザーブは得られません。

LI5640

(* ロックインアンプ PSD 出力模擬計算 *)

```
fs = 203; (* 測定信号周波数 *)
fr = 200; (* 参照信号周波数 *)
phi = 0; (* 位相差 *)
A = 5; (* 測定信号強度 *)
omega = 360 fs ;
omegar = 360 fr ;
  (* 測定信号 *)
func = A Sin[(omegat + phi) / 360 * 2 Pi]
Plot[func, {t, 0, 0.02}]
(* 参照信号: 方形波 デフォルトでは 8次の項まで計算 *)
Square1 = 4 / Pi Sum[Sin[(2n-1) omegar t / 360 * 2Pi] / (2n-1), {n, 1, 8}]
Plot[Square1, {t, 0, 0.02}]
(* PSD出力 *)
Y[t_] := func Square1
Plot[Y[t], {t, 0, 0.02}]
Plot[Y[t], {t, 0, 0.4}]
 (* 以下,
1.測定信号
     2.参照信号(数式)
    3.参照信号
    4.PSD出力(0-20 ms)
    5.PSD出力(0-400 ms)
*)
5 Sin[406 πt]
     4
    2
                                                             0.005
                                                                                                                       0.010
                                                                                                                                                                                 0.015
                                                                                                                                                                                                                                           0.020
 -2
 -4
                 \left(\sin[400 \pi t] + \frac{1}{3}\sin[1200 \pi t] + \frac{1}{5}\sin[2000 \pi t] + \frac{1}{7}\sin[2800 \pi t] + \frac{1}{7}\sin[2800
 ^{1}_{-4}
                   \frac{1}{9}\sin[3600 \pi t] + \frac{1}{11}\sin[4400 \pi t] + \frac{1}{13}\sin[5200 \pi t] + \frac{1}{15}\sin[6000 \pi t]\right)
```



```
(* r^-2 Fitting *)
```

