

目次

12 微少信号の検出	— 87 —
12.1 雑音に埋もれた微少信号	— 88 —
12.2 ロックインアンプ	— 89 —
12.3 P.S.D. 位相敏感検波器のはたらき	— 90 —
12.4 P.S.D. の動作	— 90 —
12.5 ローパスフィルタの役割	— 91 —
12.6 ロックインアンプ使用の実際	— 92 —
13 統計処理による雑音の除去	— 93 —
13.1 自己相関関数	— 93 —

12 微少信号の検出

物理実験では、宇宙からやって来る微弱な光を観測したり、あるいは原子が吸収する極微な電磁波の量を測定したりする。また、人間の生活に密着した音や光や熱や振動、あるいは位置の検出...その他さまざまな物理現象から生じる微少な信号を観測し、測定する。これらの目的を達成するため、それぞれの現象に固有の信号をできる限り高感度に生じさせる装置やセンサーを工夫し、製作する。しかし、装置やセンサーから得られる生の信号には、常に望まない不要な雑音が混ざっている。雑音が小さく、クリアな信号が得られることは極めて希である。そこで、如何にして雑音を減らし、本来の信号だけを取り出すかということが、物理実験の測定において極めて重要なこととなる。

これに対処する方法として、次の2つの異なる面がある。

・装置の基本的な性能

何をどのように測定するか。ある現象を調べるのに、どの信号が重要でしかも感度よく測定できるか、さらにその信号は現象のどの段階で測定するのがよいか、などを十分検討する。そして、より優れた装置を工夫し製作する、つまりハードウェアの性能面での工夫

・データの処理方法

得られた信号から不要な雑音を除き、本来の信号になるべく近いものを得るためにハードウェア的な処理を行う。この処理は、コンピュータが発達であった時代はハードウェアで行うしかなかったが、近年のようにコンピュータが発達し、膨大なデータを短時間で処理する能力をもつようになったため、ソフトウェア的に従来のハードウェアと同等の処理を行うことも可能になった。

しかしながら、ソフトウェアでの処理を行う前に、アナログ信号の段階で、ハードウェアで可能な限り質の良い信号を作り出しておくことが重要である。

12.1 雑音に埋もれた微小信号

図70は、雑音がない本来の信号に、雑音がいろいろな割合で混ざった場合の波形を示している。信号と雑音の大きさの比をSN比、S/N比、信号対雑音比などと呼ぶ。

$$S/N = \frac{\text{信号強度}}{\text{雑音強度}} \quad (121)$$

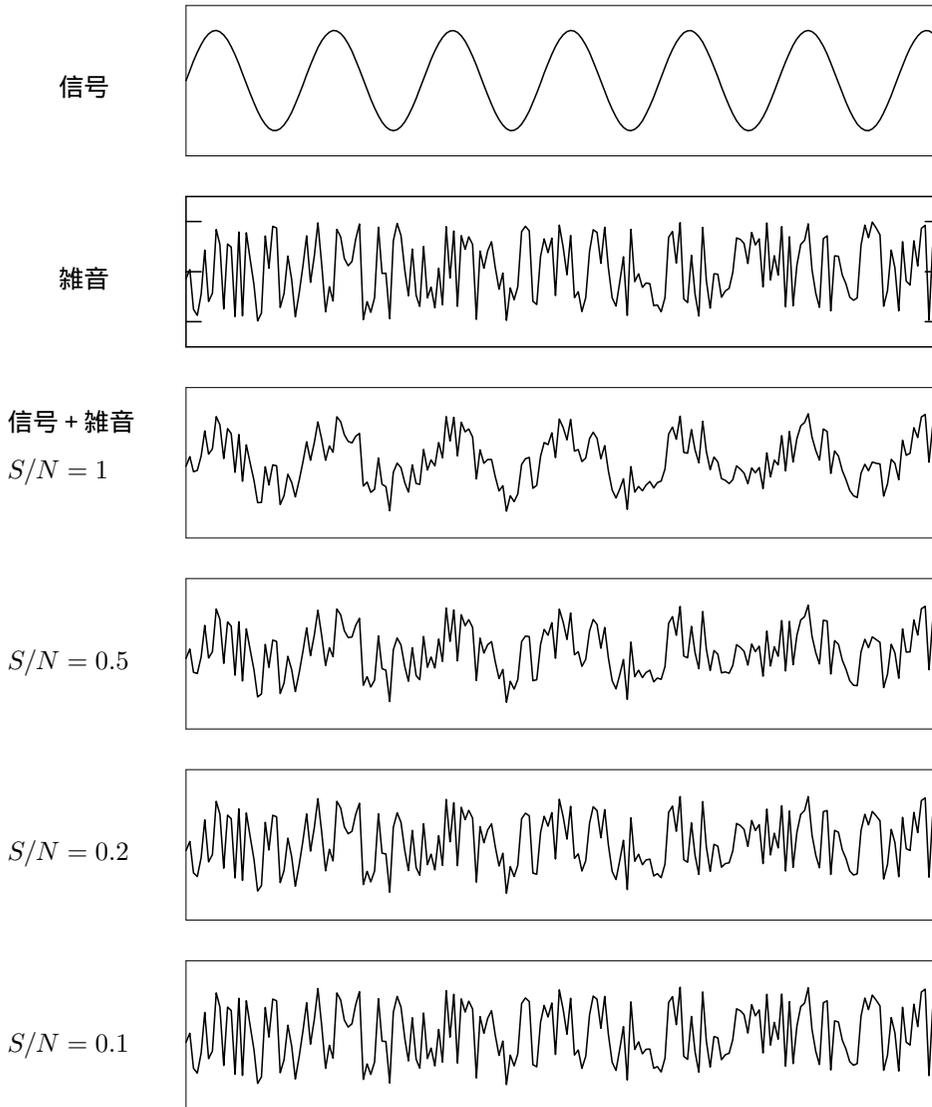


図70. 信号と雑音

$S/N = 1$ は、信号と雑音の強度比が 1 : 1 の場合である。元の信号波形がかなりの割合で乱されていることが分かる。これが音声信号である場合には、ザーという雑音が大きく、かなり耳障りな音になる。さらに雑音が強くなると乱れは一層ひどくなり、 $S/N = 0.2, \dots 0.1$ 程度になると、波形を見ただけでは元の信号は全く確認することができなくなる。このままでは、信号の検出は不可能である。以下で、この一見不可能に思われる、信号を再現する方法を述べる。

12.2 ロックインアンプ

ロックインアンプ (Lock in Amplifier) は雑音に埋もれた微小信号を高感度に検出する装置である。ロックインアンプを用いると、図 70 の $S/N = 0.1$ の場合のような雑音だけしかないように思われる信号から本来の信号を取り出すことができる。ロックインアンプは図 71 のように構成される。

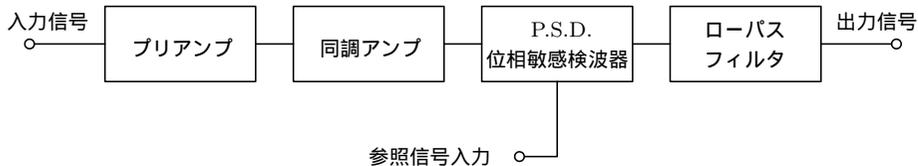


図 71. ロックインアンプの構成

図 71 の各部分は次のようなはたらきをする。

プリアンプ (前置増幅器)

まず、信号を処理に適した大きさまで増幅する。

同調アンプ

特定の周波数 (= 参照信号の周波数 = AM 変調の周波数、後述) だけを選択的に増幅する。これにより、周波数が異なる雑音成分のかなりの部分が削除される。

P.S.D. (位相敏感検波)

参照信号に対して特定の位相関係をもつ成分だけを取り出す。これにより、位相がランダムな雑音成分が削除される。

ローパスフィルタ

位相検波器の出力を平均化し、最終的な出力信号を作る。

12.3 P.S.D. 位相敏感検波器のはたらき

P.S.D. は Phase Sensitive Detector の略で，日本語では直訳的に，位相敏感検波器と呼ばれる。その構成を図 72 に示す。

ロックインアンプの動作を一言で説明するなら，取り出したい信号の変調周波数と位相の情報によって，雑音をふり落とすものである。特に優れた効果をもち，ロックインアンプの心臓部といわれるのが，この位相の情報を処理する P.S.D. の部分である。

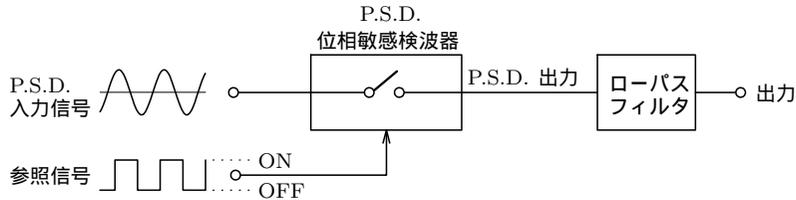


図 72. P.S.D. 位相敏感検波器の構成

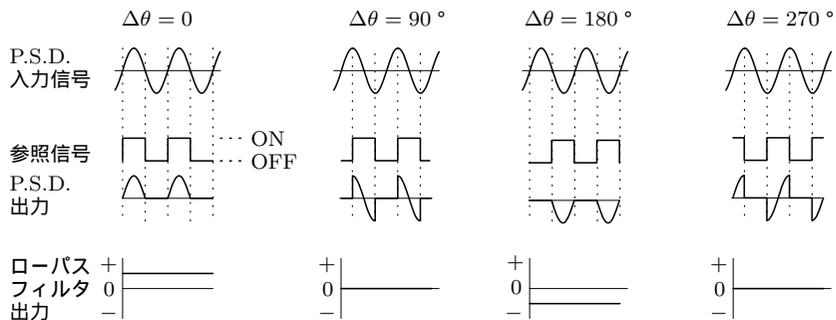


図 73. P.S.D. の動作

12.4 P.S.D. の動作

雑音を含む信号を P.S.D. にかけるには前処理が必要である。図 74 のように処理前の元の信号を $\xi(t)$ とし，これに振幅が 1 で，特定の角周波数 ω をもつ正弦波を乗算すると図 75 のように AM 変調波が得られる。処理前の信号は雑音を含むが，図には雑音は描いていない。

$$V(t) = \xi(t) \sin \omega t$$

AM 変調に使う正弦波の周波数は，測定したい信号の周波数より高い値を選ぶ。変調に使う波をキャリア（搬送波）という。信号を運ぶ波，という意味である。

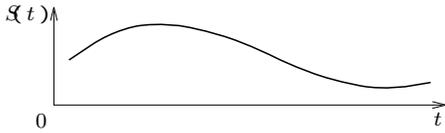


図 74. 元の信号

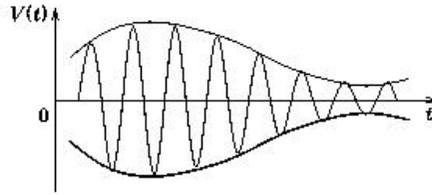


図 75. AM 変調された信号

この AM 変調波を P.S.D. の入力信号とする。一方、変調に用いた正弦波から、波形を整形して矩形波「 \square 」を作り、参照信号とする。

P.S.D. の中心部分は、図 72 のように入力信号を通したり通さなかったりするスイッチの役割をするものである。このスイッチは、参照信号の周波数で高速に ON, OFF を繰り返す。

そこで、図 73 P.S.D. の動作の波形を注意して見てみよう。入力信号と参照信号の位相が同じで位相差 $\Delta\theta = 0$ の場合は、P.S.D. の出力には $\sin\omega t$ の正の部分だけが取り出される。もし入力信号と参照信号の位相が 90° ずれている場合には $\Delta\theta = 90^\circ$ の図のように、正弦波の正から負へわたる一部分が対称的に取り出される。位相差が $\Delta\theta = 180^\circ$ の場合は $\sin\omega t$ の負の部分だけが取り出される。さらに位相差が $\Delta\theta = 270^\circ$ の場合は、正弦波の負から正にわたる一部分が対称的に取り出される。これが P.S.D. 部のはたらきである。

12.5 ローパスフィルタの役割

P.S.D. で処理された信号出力は、ローパスフィルタに送られる。ローパスフィルタのカットオフ周波数は測定したい元の信号の周波数よりは高く、しかし AM 変調に用いた正弦波の周波数よりは低い値に設定する。そうすると、P.S.D. から出力された AM 変調の正弦波の部分波の振幅を時間的に平均したものが、ローパスフィルタから出力される。

従って、図 L148 のローパスフィルタ出力の波形のように、測定したい元の信号と参照信号の位相を等しくし $\Delta\theta = 0$ としておくと、正の最大の出力電圧が得られ、AM 変調波の包絡線が出力される。もし、 $\Delta\theta = 180^\circ$ に設定すれば、符号が反転した負の出力電圧が得られる。こうして、位相差が 0° の測定したい元の信号だけが再現される。

元の信号に雑音が含まれている場合、雑音の成分はどうなるであろうか。雑音は周波数も位相もランダムであり、変調に用いた正弦波の角周波数 ω やその位相と全く相関をもたない。従って、

P.S.D. を通った後の雑音成分の時間平均はゼロとなる。このように、P.S.D. は参照信号の位相の情報を元にして、測定したい信号だけを雑音から抽出する機能をもつものである。

ロックインアンプは、この P.S.D. を心臓部として、その前段にプリアンプと同調アンプを備えたものである。同調アンプの増幅周波数は、変調周波数 ω に設定され、この周波数の選択性により、雑音成分のかなりの部分が除去される。

ロックインアンプを用いると、図 70 の $S/N = 0.1$ のようなほとんど雑音だけの信号波形からでも、元の信号がクリアに再現される。ここでいう元の信号とは図 70 で「信号」として示されている正弦波の包絡線、つまり振幅の変化である。

12.6 ロックインアンプ使用の実際

例えば原子が出す蛍光や燐光などの微弱な光を観測する場合、フォトマル (photo multiplier 光電子倍增管、高感度な光センサー) を用いて、その出力信号電圧を増幅する。しかし、信号電圧が極めて微弱で、フォトマル自身の雑音や測定系の雑音が目立ち、たとえ高感度なフォトマルを用いても、望む光の信号が得られなことが多い。

そのような場合、ロックインアンプが威力を発揮する。図 76 のように光源とフォトマルとの間に、角速度 ω で回転する円盤セクタを置き、人為的に光信号を周期的に断続するようにする。これは信号を AM 変調することに相当する。円盤セクタは窓を切った円盤で、半回転の間は光を通し、残りの半回転は光を遮断するようなものである (1 回転の間に光が N 回通過と遮断を繰り返すものでよい)。

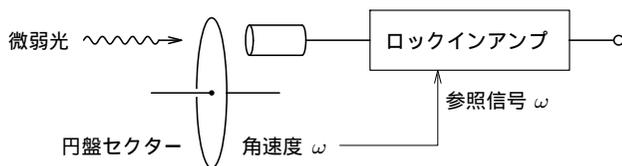


図 76. 微弱光の測定方法

円盤セクタを通った光の信号波形は図 77 のような角周波数 ω で変調されたものになる。

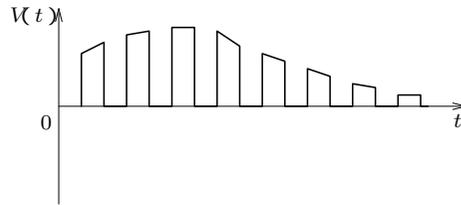


図 77. 円盤セクタ通過後の光信号

この信号を入力信号とし、また円盤セクタの回転から参照信号を作ってロックインアンプを働かせると、単に増幅しただけでは測定できなかった光の信号が測定できるようになる。円盤セクタを用いる方法は古典的なもので、今日では半導体素子の進歩により電子的なスイッチング回路で同じ効果が得られる。

13 統計処理による雑音の除去

ある値を測定する場合、数回の測定値を平均すると、ランダムなゆらぎによる誤差を小さくすることができる。この考え方は時間の関数として得られる信号などの雑音を減らすことにも効果がある。一般に多数のデータについて、目的にあった適当な統計処理を行うことで、より正しい結論を導き出すことができる。コンピュータにより多量のデータを対象として多数回の計算処理を行うことができるようになり、さまざまな有効な統計処理方法が工夫されている。

実験では、データが 1 回しか得られない場合があるが、一方で、同じ信号が繰り返し何度でも得られるという場合も多い。コンピュータによる統計処理が向いているのはもちろん後者の場合である。以下では比較的簡単で大きな効果が得られる自己相関関数について述べる。

13.1 自己相関関数

(別ファイル： Autocorr.pdf)