ロックイン増幅器と信号増幅器

安藤 正典

(株)エヌエフ回路設計ブロック (〒223-8508 神奈川県横浜市港北区綱島東6-3-20)

Lock-in Amplifier and Signal Amplifier

Masanori ANDO

NF Corporation, 6-3-20 Tsunashima Higashi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8508

(Received February 16, 2012)

Lock-in amplifier is a useful instrument for recovering small signals buried in noise. This paper describes the principle and an application example of the lock-in amplifier. In addition, it offers some advice on the selection and usage of signal amplifier.

Key Words: Lock-in amplifier, Phase Sensitive Detector, Current amplifier, Charge amplifier

1. はじめに

ここでは、センサの微弱な信号を検出するロックイン増幅器と、信号増幅器(特に電流増幅器)について、その原理、使用上の注意点、応用例を紹介する。

2. ロックイン増幅器

2.1 ロックイン増幅器の概要

微小な信号を測定しようとする、不要な雑音と有用な信号を分離する必要に迫られる。ロックイン増幅器は、信号と雑音を周波数の違いに基づいて分離する。この点で帯域通過フィルタと似ているが、入力信号の波形ではなく、信号の大きさに比例した直流電圧が出力される。測定対象は正弦波であり、その他の波形を入力すると、その基本波の実効値が測定される。直流は測定できないが、変調して交流化すれば測定できる。

ロックイン増幅器には、周波数と位相の基準となる参照信号を必要とする煩わしさがあるが、参照信号を用いることで、信号の周波数に自動的に追従し、また位相を測定できる利点が生じる。

2.2 ロックイン増幅器の歴史

ロックイン増幅器が最初に市販されたのは1962年、Princeton Applied Researchからのようである。1967年には、エヌエフ回路設計ブロックが国産品の市販を始めている。ロックイン増幅器は、安価で高感度、物理実験に適した操作性が特徴であるが、位相調整が面倒な1位相型から、2位相型(直交検波)による位相調整の不要化、ヘテロダイン方式によるフィルタ調整の不要化と高感度

化、デジタル化による操作性や機能・性能の向上を果たし、現在では1 μ Hzから数100 MHzまでをカバーする製品群が存在する。

2.3 ロックイン増幅器の動作原理

ロックイン増幅器では、Fig. 1に示すように、被測定信号と同じ周波数 F と位相をもつ参照信号を入力信号に乗じることで、直流と $2F$ に周波数変換したのち、高域遮断周波数が f_c である低域通過フィルタで雑音と $2F$ を除去し、直流だけを増幅する。雑音を除去してから増幅するので、回路が飽和することなく、大きな雑音下で小さな信号を測定できる。

2.4 ダイナミックリザーブ

信号フルスケールよりどれだけ大きな雑音を許容できるかを示す数値をダイナミックリザーブと呼び、ロックイン増幅器では、フルスケール(レンジ)とは別に指定できる。

前段の交流利得を下げ、後段の直流利得を上げれば、ダイナミックリザーブを大きくできるが、直流ドリフトを考慮すると、実用的な直流利得には上限がある。多段交流増幅器の中間にフィルタを置き、フィルタの後ろで交流利得を上げることでダイナミックリザーブを大きくできるが、フィルタによる利得と位相のずれ、ドリフトが加わる。

乗算から直流増幅までをデジタル演算で行う方式では、直流ドリフトがないので、上記の問題は生じない。

2.5 等価雑音帯域幅と時定数

帯域通過フィルタに比べて、ロックイン増幅器は、信

(a) Block diagram

(b) Spectrum

Fig. 1 Principle of lock-in amplifier.

号周波数への追従と狭帯域化がはるかに容易である。遮断周波数が f_c である1次の低域通過フィルタを用いたロックイン増幅器の等価雑音帯域幅 B_n は次式になる。

$$B_n = \pi f_c \quad (1)$$

出力のランダム雑音は、等価雑音帯域幅の平方根に比例するので、 f_c を低くするほど雑音は除去される。ただし、応答速度とのトレードオフである。1次フィルタでは、その時定数を T とすると、次の関係がある。

$$B_n = 1/(2T) \quad (2)$$

遮断特性が緩やかなアナログフィルタでは、 $2F$ を除去するために大きな時定数が必要。このため、雑音が少なくても、周波数が低いと時定数を小さくできず、測定に時間がかかる。高速応答を求めるときは、高い周波数を用いる。

デジタル方式では、 $2F$ にノッチを持つ移動平均フィルタにより、信号のほぼ1周期で出力を整定させることができる。これにより低い周波数における応答時間を短縮できる。

2.6 位相の変化を検出する

Fig. 1の乗算器は、位相検波器またはPSD (Phase Sensitive Detector)と呼ばれ、Fig. 2に示すように出力 X は参照信号と被測定信号の位相差 θ の関数である。参照信号系に設けた移相器により位相差を約 90° に調整すると、位相に対する感度が高いうえ出力が小さいので、さらに増幅できる。信号振幅が一定なら、微小な位相の変化を捉

Fig. 2 Signal vector.

えられる。

2.7 信号の大きさを測る

位相検波器を一つしか持たない一位相ロックイン増幅器では、出力が最大になるように参照信号の位相を調整した状態で、信号の大きさ R を測定する。

二つの位相検波器を持つ二位相ロックイン増幅器では、二つの検波出力 X と Y から信号の大きさ R と位相 θ を計算で求めることができる。これは便利であるが、ランダム雑音の抑圧比が3dB劣る。言い換えると、同じS/N (信号対雑音比)を得るのに2倍の応答時間が必要になる。

なお、簡易なロックイン増幅器は、アナログスイッチを用いて方形波参照信号を乗算するため、信号の奇数次高調波に相当する周波数にも感度がある。その周波数に雑音があると、妨害を受けてしまう。正弦波参照信号の乗算を用いるデジタル方式では、この問題は生じない。

2.8 応用例

信号を大きくする工夫と、ロックイン増幅器を用いた微小信号測定を組み合わせ、気体分子濃度の測定例をFig. 3に示す。

光音響セル内の気体にチョッピングしたレーザー光を照射すると、気体分子固有の波長で光が吸収される。セルの音響的な共振周波数に合わせてチョッピングを行い、レーザー光の吸収による加熱膨張で発生する音波をマイクロフォンで拾って、ロックイン増幅器で検出す

Fig. 3 Laser photoacoustic spectroscopy.

る。強いレーザー、セルの共振、ロックイン増幅器の組み合わせで、低濃度の測定を実現している。

3. 信号増幅器

3.1 増幅器の選択

信号源インピーダンスが低いときは電圧増幅器を用いればよい。信号源インピーダンスが高いセンサに対しては、一般に電流増幅器を用いる。信号源インピーダンスが高い場合、電圧増幅器を用いると、その入力インピーダンスで信号が減衰したり、接続ケーブルなどの静電容量を充放電するために応答が遅くなる。圧電素子を用いた加速度センサなど、電荷出力型のセンサから信号を受けるときは、電荷増幅器(チャージアンプ)を用いる。

3.2 電圧増幅器

一般的な低雑音増幅器が発生する入力換算電圧雑音密度 e_n は数 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるが、 $1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の増幅器も入手できる。信号源インピーダンスが低ければ、インピーダンス変換トランスを用いることで、さらに低雑音を実現できる。

増幅器自身が雑音が発生するため、増幅器を用いると必ず S/N は劣化する。この劣化の度合いを雑音指数(NF: Noise Figure)と言う。

$$\text{NF} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{入力信号/入力雑音}}{\text{出力信号/出力雑音}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

NFは信号源抵抗と周波数によって変化するので、実際の信号源や測定周波数においてNFが小さい増幅器を選択する。

3.3 電流増幅器(電流入力アンプ)

電流増幅器は、入力電流に比例した出力電圧を発生する増幅器である。変換利得はトランスインピーダンスと呼ばれ V/A 単位で示される。これはインピーダンスの単位 Ω と同じ次元である。

Fig. 4に基本的な電流増幅器を示す。演算増幅器により入力端子の電圧は 0 V に保たれ、センサで発生した電流 I は帰還抵抗 R_f に流れて、電圧 V に変換される。

$$V = R_f \times I \quad (4)$$

トランスインピーダンスは帰還抵抗に等しい。電流雑音が小さい演算増幅器を選択するなど適切に設計すると、入力換算電流雑音密度 i_n は帰還抵抗 R_f の熱雑音とほぼ等しくなる。

$$i_n = \sqrt{4kT/R_f} \quad [\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (5)$$

k はボルツマン定数、 T は絶対温度

電流増幅器の高域遮断周波数 f_c は帰還抵抗の浮遊容量を C_f として、およそ次式で与えられる。

$$f_c = 1/(2\pi R_f C_f) \quad (6)$$

具体的には、特に工夫せずに、利得 $1 \times 10^6\text{ V/A}$ におい

Fig. 4 Basic current amplifier.

て、室温における入力換算電流雑音密度 $130\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、高域遮断周波数 100 kHz 程度が得られる。

入力インピーダンス Z_{in} は理想的には 0Ω であり、信号源抵抗 R_s や信号源と接続ケーブルの静電容量 C_s の影響を受けない。実際には、帰還抵抗の浮遊容量 C_f と演算増幅器利得の周波数特性によって誘導性になり、負性抵抗を示すこともある。これに C_s が作用すると、周波数特性にピークを生じたり、発振することがある。 C_s が大きいつきは、 C_f を大きくしてピークや発振を抑えるが、 f_c が下がってしまう。 C_s はできるだけ小さく抑えることが望ましい。センサに電流増幅器を内蔵できれば最良である。センサ自身の静電容量が小さいのなら、高感度と高速性を両立しやすい。IBM社の初期のSTM(Scanning Tunneling Microscope)では、利得 $1 \times 10^{10}\text{ V/A}$ で帯域幅 1 MHz を得たようである。

汎用電流増幅器の最近の開発事例では、工夫を凝らすことで C_s 100 pF 、利得 $1 \times 10^9\text{ V/A}$ において、入力換算電流雑音密度 $5.8\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、高域遮断周波数 100 kHz が得られている。

電流増幅器が発振した場合、 C_f を調整できなくても、入力に抵抗を直列に挿入して負性抵抗を打ち消すと発振を止められる。 R_s が小さいかまたは C_s が大きいつ、演算増幅器の入力換算電圧雑音が増幅されて S/N が劣化するので、電圧雑音も無視できない。

3.4 電荷増幅器

Fig. 4で、 R_f を十分に大きくして、正確な C_f で入力電荷を電圧に変換すれば電荷増幅器になる。リーク電流で出力が発散するのを防ぐため、通常は有限の R_f を用いる。このため交流しか扱えない。出力のドリフトを許容して R_f を省くときは、定期的に C_f を放電して初期化が必要がある。

3.5 低雑音ケーブル

微小信号の伝送には信号線のシールドが重要であるが、一般的なシールド電線では摩擦電気による雑音が発生する。このため、感度の高い電流増幅器を用いるときは、絶縁体表面に半導電層を設けた低雑音ケーブルを用いる。さもないと、わずかな振動でも雑音が発生する。

電位差がある導体間の距離が変化すると、同様に雑音電流が発生する。直流電源ラインとむき出しの信号線がごく近づいていれば、電源電圧に含まれる小さな雑音でさえ、浮遊容量を介して妨害を与える。微小電流の取り扱いには細心の注意が必要である。

4. まとめ

ロックイン増幅器は、微小信号の測定に便利ではあるが、初めて手にすると戸惑うことも多い。ここで紹介した内容が、ロックイン増幅器やその周辺機器を理解し活用する一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) ロックインアンプ技術解説集 ((株)エヌエフ回路設計ブロック, 2000).
- 2) 下坂 琢哉, 「標準ガスの高感度測定法に関する調査研究」, (産総研計量標準報告 Vol.3, No.4, 2005).
- 3) 公開特許公報 H04-233475, インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション.