

携帯型・周波数固定ロックインアンプの製作

金野茂男

1. 始めに

周期性微弱信号の測定装置としてL I A（ロックインアンプ）はよく知られている。通常メーカーの販売しているL I Aは実験室仕様であり、AC100V電源下で使用する。多方面での使用を可能とするため、汎用性を持たせた上に、多機能性も持たせている機種が多い。そのため、購入価格は数十万を下らない。

L I Aは物性量測定などにおいては、極めて有能な装置なので、そのような研究室では必須の装置でもある。が、研究費に余裕があれば購入もできよう。研究費が十分ではなく、どうしてもL I Aの必要性にせかされて、著者はかつてL I Aを自作した。この製作についての論文は既に公表済である^{(1), (2)}。自作したL I Aに要した費用は実質的に1万円程度以下であった。が、性能は、かつて使用していたメーカー製のL I A程ではないが、十分な性能を持ったものであった。物性実験以外に学生実験にも共用し、学生にL I A装置の効能を知らしめることには結構成功したと思っている。

今回、表題のL I Aを自作した。製作のきっかけは、著者の公開論文を目にした方からの問い合わせである。持ち運びができ、携帯でき、格安でのL I Aが出来ないものかとのことであった。参照信号周波数は固定式で十分であるとのことでもあった。問い合わせた方に、製作方法などを教えたが、何度か連絡し合っている内に、自分が製作した方が手取り早いと考えた。このようなわけで、製作に取りかかった。今回紹介するL I Aは携帯型(m o b i l)で、固定(f i x)周波数型なので、本論文では「MF・L I A」と呼称する。

写真1が完成したMF・L I A装置及び外部装置の外観である。右半分がMF・L I Aである。電源の006P乾電池2本は、この基板の下に鎮座している。左側が、製作したMF・L I Aの調整及び動作試験のために作成した「周波数同期発光装置+受光装置」である。重々しい名称ではあるが、実体は単なるLED・ホトトランジスタ回路である。

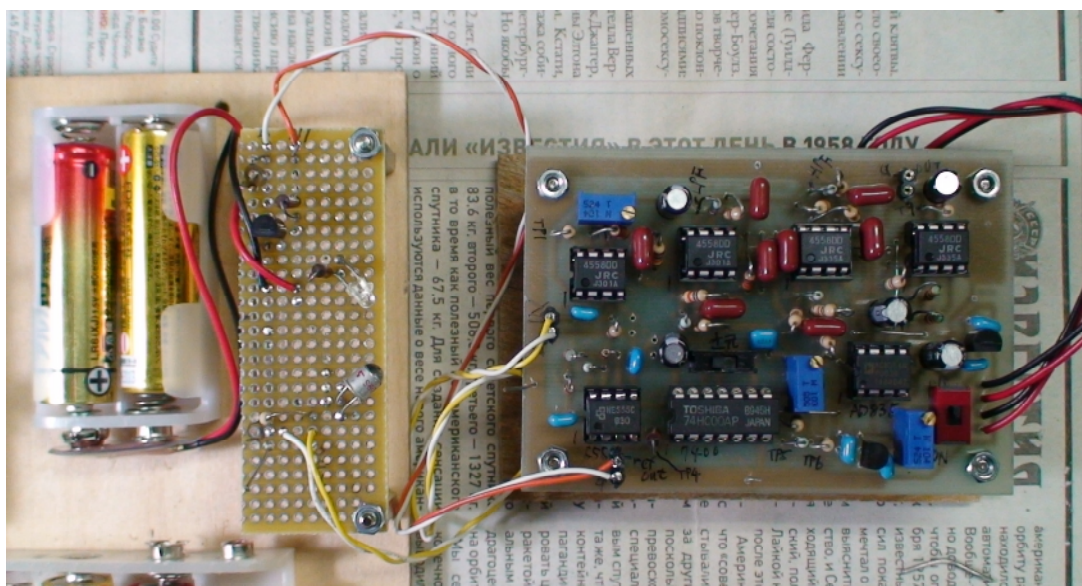


写真1 MF・L I Aの外観

本装置は非常に応用範囲が広いと思う。本論文では基準参照信号周波数（ロック周波数）は500 Hz仕様になっているが、ロック周波数を希望する周波数に、若干の抵抗とコンデンサを変更するだけで、簡単に変更できる。本論文を読めば容易である。

2. 製作

MF・L I Aの基本ブロック図を図1に示す。このブロック図は、参考文献(1), (2)のブロック図とほぼ同じである。L I Aは日本語で書くならば、周波数同期・位相同期の微弱信号抽出装置である。ここでの周波数とはL I Aの供給する基準参照信号の周波数のことである。本装置では、この基準参照信号の周波数は $f_0 = 500 \text{ Hz}$ に固定する。この基準参照信号周波数で変調された何らかの信号は、測定するべき入力信号として本装置の入力信号端子に入力する。通常、この信号は微弱なので、適宜増幅される。その後、入力信号に混在している500 Hzの成分以外を除去するために、通過周波数が500 Hzに設定されているBPF回路を通過させる。通過した信号は乗算器に送られる。一方、基準参照信号を発振している発振器からのデューティ比50%の矩形波は、適宜位相調整

ができる回路を通過させた後、同じく乗算器に送られる。これら2つの信号は乗算された後、その結果が出力される。この乗算と後段の平滑器との組み合わせにより、BPFをくぐり抜けてきている500Hzに近い周波数成分は、効率よく除去され、ほぼ500Hzで位相が同期した信号成分のみが、平滑出力されることになる。

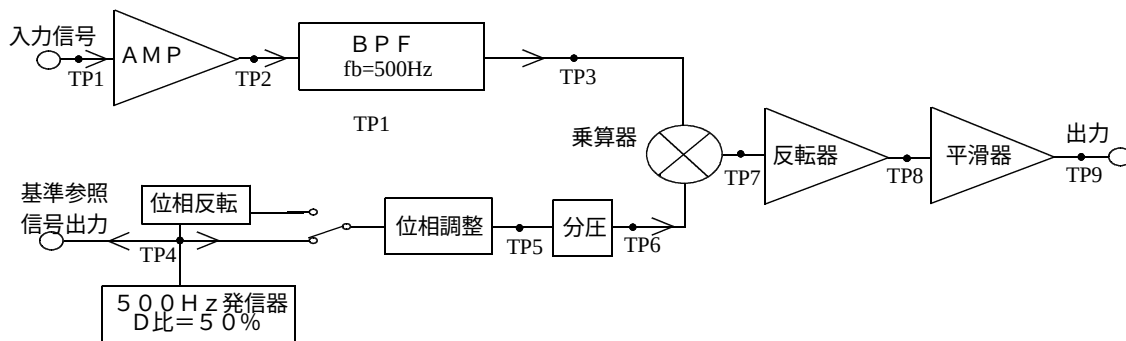


図1 LIAの基本ブロック図。

図2に回路図を示す。基準参照信号は、発振専用ICであるNE555で供給している。 $f_0 = 500\text{Hz}$ で、デューティ比=50%の矩形波を発振させている。NE555の使用法は、その使用説明書に譲る。が、簡単な説明をしよう。外付け抵抗 R_1 と R_2 を $R_1 = R_2 (=R)$ とすれば、発振矩形波のデューティ比は50%となる。発振周波数はRCに比例する。本回路では、 $R_1 = R_2 = 2\text{k}\Omega$ 、 $C = 0.47\mu\text{F}$ として、500Hzの周波数を得ている。が、このままでは、若干周波数はずれている。精度良く500Hzにするためには次のようにする。Cを取り付けて、500Hzの発振周波数より、若干周波数が高い当りまでとする。その後、小さい容量のコンデンサ ΔC を、このCに並列接続し、500Hzになるような値の ΔC を選択すればよい。なを、NE555の発振周波数が安定するまで電源を入れてから結構時間がかかるので、周波数の設定には、この周波数が安定してから行う必要がある。或いはCに並列に適当な大きさのバリコンを入れるのも方法である。

この f_0 を基準参照信号の周波数として外部装置で利用する。外部装置からは、この f_0 の周波数で変調された信号が送られてくる。が、位相がずれている場合もある。本装置内でこの位相のずれを処理できるようにしている。ロジックIC7400で形成した回路が位相調整回路である。スイッチで $\pm\pi$ の位相の選択をし、10kV_Rで位相の微調整が行える。7400からの出力レベルはLレベルが0V、Hレベルが+5V。乗算器($XY + Z = W$ を計算)ではY入力としてLレベルは0V、Hレベルは+1Vとする。抵抗分圧で、これを行っている。

入力信号端子からの信号は、余分な直流成分をカットした後、適宜に増幅が行える。その後、BPFにはいる。本装置では、BPFはLPFとHPFを直列接続することで形成している。カット周波数は共に500Hzに設定している。フィルタ部の回路構成、回路素子の抵抗とコンデンサの値の選択については、参考文献(3)を参照してほしい。LPF、HPF共に、2段のバターワース型フィルタとなっている。図3、図4に、本フィルタの特性グラフを提示しておく。図3はLPFとHPFの周波数特製グラフである。縦軸はフィルタへの入力電圧 V_{in} とフィルタからの出力電圧 V_{out} の比 V_{out}/V_{in} をとっている。フィルタの利得は必ずしも1となっていない点には注意しておいて損はない。グラフにはバターワースフィルタが1段だけの時と、直列に2段使用した時の2つを示している。図2の回路図からわかるように、バターワース2段のLPFとHPFを採用し、BPFを形成している。

乗算器にはアナログデバイス社製のAD835を使用している。必要な電源電圧は±5Vである。X端子とY端子に入力した2つの入力電圧X、Yに、Z端子での電圧が加算され、 $XY + Z$ の結果がW端子に出力される。当初、Z端子をアース電位としていた。つまり $W = XY$ の出力としていた。入力電圧Xの値が大きいときには気が付かなかったが、電圧Xが小さいと、Wに混入しているオフセット電圧が目につくようになった。そのため、Z端子に、このオフセット電圧を除去するため、適当な電圧を印加できるように可変抵抗を用いてZ端子に直流電圧を印加できるようにしている。X信号はサイン似波形、Y電圧は500Hzで交互に0Vと+1Vに切り替わるので、乗算器からの出力電圧Wは半波整流型の電圧信号となっている。乗算器からの出力は積分器で平滑される。積分器の外付けのコンデンサCの値の選定で、時定数は自在に設定できる。現在 $C = 10\mu\text{F}$ に設定している。選択は自由である。出力電圧をメーター、レコーダー、電圧計などで視認し、必要な応答特性、ノイズ特性とすればよい。

携帯型なので、AC100Vは使用しない。電源には乾電池を使用する。AD835には±5Vの電圧が必要である。ロジックICの電源電圧は+5Vである。このようなことから、回路中のOPアンプの電源は、通常の±12Vではなく、±5Vとすることにした。3端子レギュレータ7805を2個、006P乾電池を2個使用して、±5Vを供給する。本回路の試験動作で確認したところ、+6Vの電源時で、電流量は+55mA程度であった。従って、3端子レギュレータには78L05(供給電流量 約100mA)を使用する。

±5Vの電源の供給として、チャージポンプICを使用して、1個の乾電池から供給することも考えられる。が、実は、本装置の仕様の1つには「低費用」もあることを付け加えなければならない。このことからチャージポンプICは使用しないこととした。1個数千円するので。

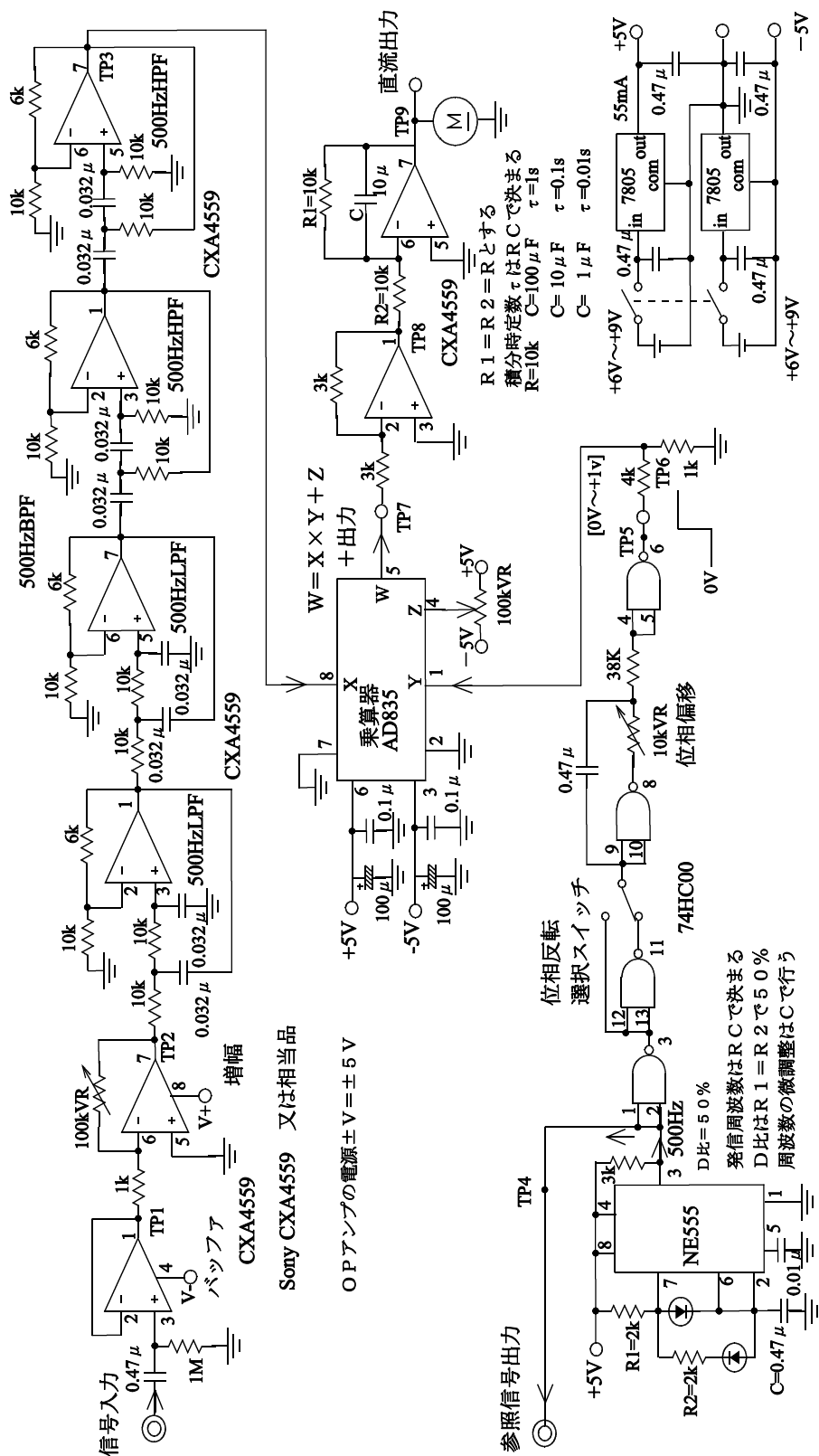


図 2 本装置の回路図

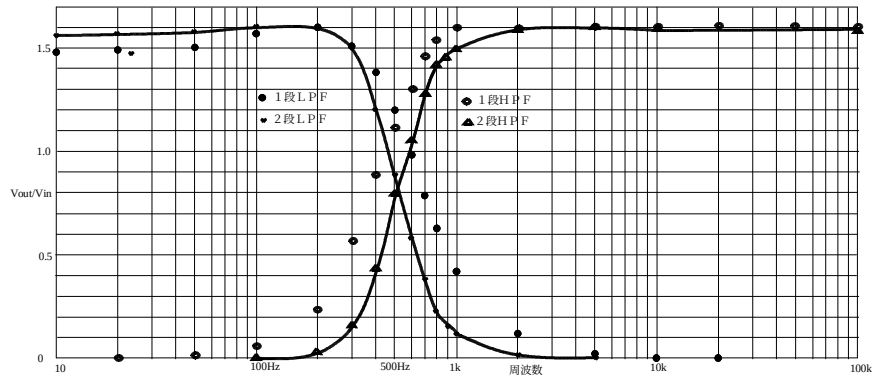


図3 フィルタ特定グラフ LPFとHPF

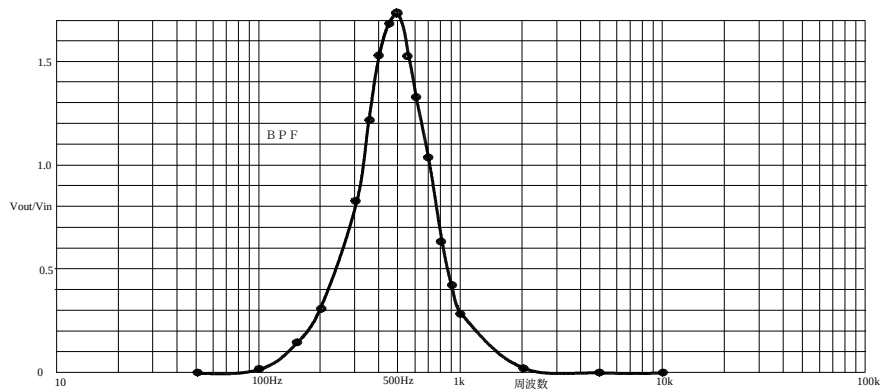


図4 フィルタ特性グラフ BPF

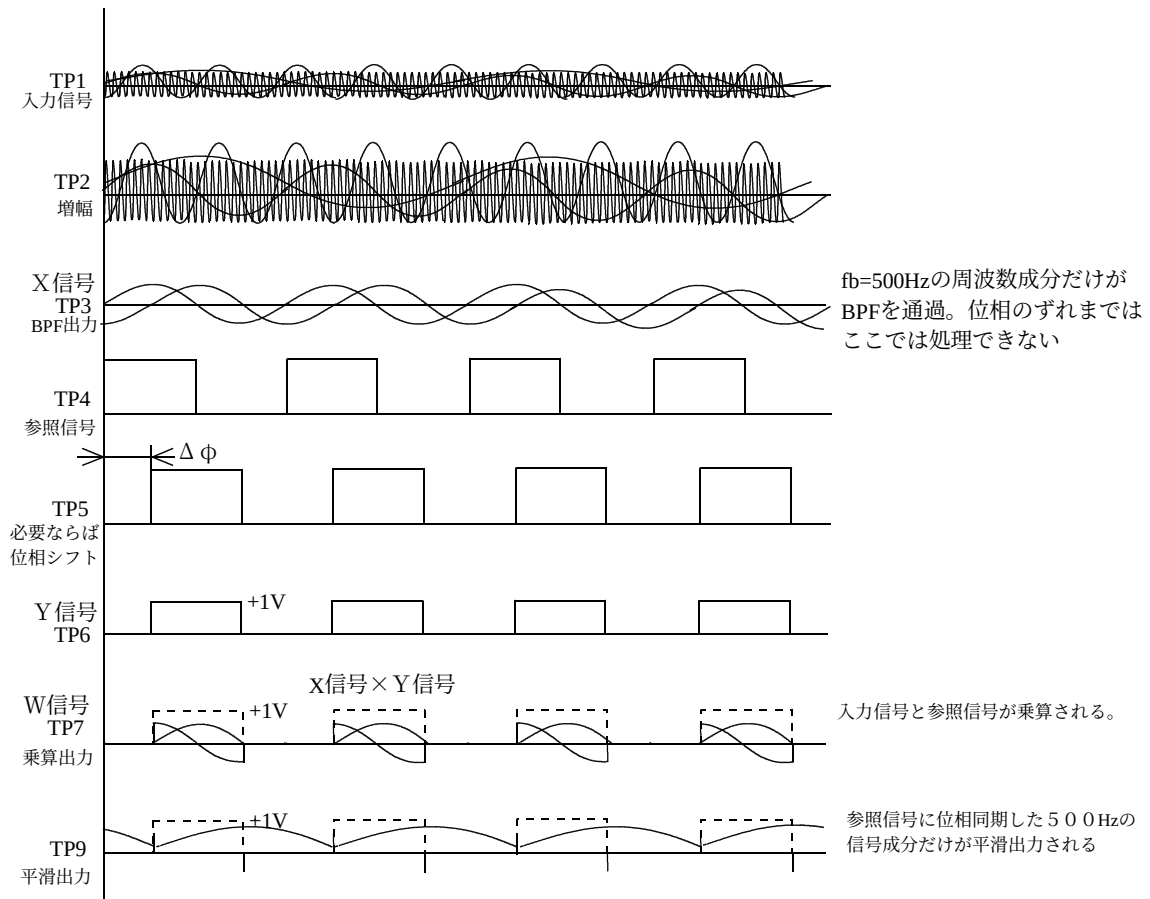


図5 本装置の信号などの流れ図

図5に、MF・LIAの信号等の流れ図を示している。左端のTP・・は、図1のブロック図、図2の回路図中のテストポイントの箇所の番号である。この箇所をオシロスコープでモニターしていれば、流れ図が良く理解できよう。TP1は入力信号を直流カットした後の信号波形である。必要な500Hzの信号成分以外に様々な雑音成分も混入しているはずである。TP2は増幅後の波形。TP3では、500HzのBPFを通過した信号波形が見られる。実際にはこのように、2つの波の電圧が見られるわけではない。略図である。500Hz前後の信号の総和電圧波形のほうである。これが乗算器のX入力となる電圧である。TP4では500Hzの基準参照信号の矩形波がモニターできる。TP5では、位相調整を行った後の矩形波がモニターできる。この矩形波は[0V～+1V]に電圧を低減され、乗算器に入力される。Y入力となる。TP6で、この電圧波形をモニターできる。Y信号はLレベルが0V、Hレベルが+1Vなので、出力Wは、Y=0Vの間は、 $X \times Y = 0$ となり、Y=+1Vの間は、 $X \times Y = X$ となる。つまり、TP7のような半波整流型の波形が見られることになる。TP7で、乗算器からの出力電圧波形がモニターできる。その後、この電圧波形は平滑器としての積分器に入る。位相が参照信号と合致した成分のみが積分器で残り、最終的に直流成分となった信号成分が出力される。TP9で、この電圧をモニターできる。

本装置の調整及び動作試験のため、図6のような簡単な装置を組み立てた。反射率の測定、則ち、反射体からの反射光の測定装置である。NF・LIAから、発光・受光装置に基準参照信号(500Hz周波数の矩形波)を送り、発光ダイオードを500Hzで点滅させる。この光で反射体を照射し、反射光をホトトランジスタの受光回路で検出する。この信号を、本装置の入力信号として測定する。図7が、試験のために作成した周波数同期式発光・受光装置の回路である。特に説明するまでもないであろう。外観は写真1の左側に見えている。通常安く入手できるホトトランジスタは、殆どが赤外領域に感度のピークを持っている。可視領域にピークを持つホトトランジスタは簡単には入手できない。入手しても比較的値が張ろう。TPS601Aの感度ピークは800nmであり、赤より長いが、十分に赤にも感度がある。そのため赤の発光ダイオードを使用している。

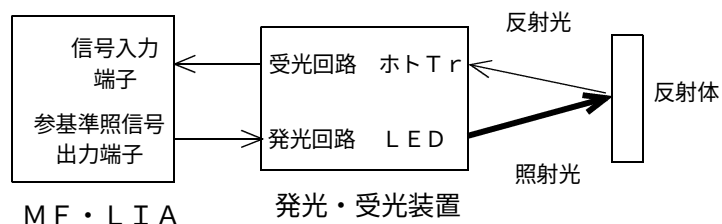


図6 試験装置の概略図

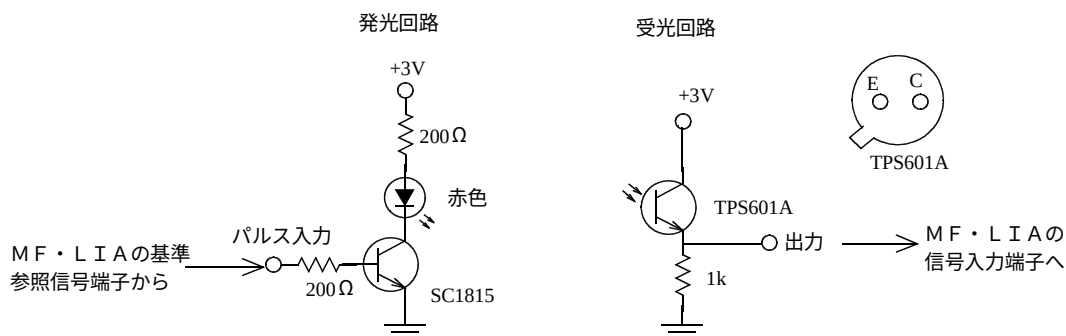


図7 試験測定のための同期式発光・受光装置の回路図

3. 本装置の調整方法と使用方法

ロックインアンプで使える装置があれば、それを利用して、本MF・LIAの調整を行っても良い。無ければ、図7で示している発光・受光装置を作り上げよう。以降は、この装置を利用した調整方法を説明する。調整なので、市販のLIA使用時と同じように、オシロスコープは必須である。

LPF、HPFのカット周波数を500Hzに完全に一致させるのは極めて困難であり、またそれほど厳密に500Hzとする必要もない。共に500Hz前後に、カット周波数が納まっていれば、十分である。±10%以上でも大丈夫そうである。回路図に示しているLPF、HPF部の抵抗とコンデンサの値で十分に500Hz近傍のBPFは形成されている。それは、フィルター特性を示している図3、図4からも理解できよう。とにかく回路図に示しているR、Cの値を持った回路を作り上げる。

調整方法

(1) 参照信号の発信周波数がほぼ500Hzで、デューティ比がほぼ50%であることを、オシロ

スコープで確認する。そうでなければ、前節で説明している方法などで、そのようになるように、調整を行う。

(2) 図7で示している試験装置を組上げる。調整のためには、MF・LIAの入力信号は大きい方が便利である。そのように発光ダイオードとホトトランジスタを配置する。TP1でモニターしたとき、1Vもあれば十分であろう。なを、TP1でモニターした光信号は、サイン波形ではなく、矩形波に近い。デューティ比が50%の矩形波で発光ダイオードを点滅しているからである。増幅部の100kVRを調整して、信号の増幅・減衰を行える。LPFもHPFも利得が1以上となっているので、増幅が大きすぎると、フィルター部で信号のオーバーフローが起こる。起こらないように、増幅部の利得調整用100kVRを調節する。

(3) 乗算器の出力端子Wの電圧はTP7でモニターできる。半波整流型の電圧波形が見られるはずである。波形ができるだけ大きな半波整流型になるように半波波形を見ながら、 $\pm\pi$ 切替スイッチと、位相偏移用10kVRで位相を調節する。

(4) 出力端子TP9をオシロスコープでモニターする。テスターなどでも良い。平滑直流出力がモニターできる。ホトトランジスタへの入射光を遮断する。入力信号はゼロになっているはずなので、TP9の出力電圧は0Vとなるはずである。そうでなければ、オフセット電圧が大きいので、乗算器のZ端子に接続している100kVRを調整して、出力電圧が0Vとなるようにする。光りの遮断、入射を何度か繰り返し、オフセット電圧の除去を行う。

(5) 光りの遮蔽をやめ、発光ダイオードとホトトランジスタの配置を換えて、TP1をモニターしながら、入力信号電圧が前述の電圧の100分の1以下にする。オシロスコープの電圧レンジを必要ならだけ上げることになる。TP9で出力電圧をモニターする。ホトトランジスタへの入射光を遮蔽したり、遮蔽しなかったりを繰り返す。TP9の出力電圧が上下することを確認する。遮蔽したときに、オフセットがあるならば、乗算器の所の100kVRで、遮蔽時に出力電圧が0Vとなるように微調整をする。これを繰り返す。

以上で基本的な調整は終了である。

使用方法

LIAの原理と、市販のLIAについての使用経験がある方には、特に本MF・LIAの使用方法を説明する必要はないであろう。前述の調整方法が理解でき、調整が完了すれば、あとは各読者の利用目的に合わせて本装置を利用したり、組み入れたりすればよい。そうでない読者のために、利用にあたって注意すべき点を何点か列記する。

(1) 入力信号の増幅率を設定しているのは増幅部の100kVRである。入力信号が大きすぎると、信号のオーバーフローを起こす。入力信号の程度に合わせて、この100kVRを調整し、オーバーフローが起こらないようにすること。

(2) 出力に現れる直流のオフセット電圧が気になるならば、乗算器のところの100kVRで、オフセット電圧を除去するように調整をすること。

(3) 最終直流出力で、ノイズの除去能力を設定しているのは、積分器(平滑器)に外付けしているコンデンサである。回路図では $C=10\mu F$ としている。このコンデンサの値を大小することで、自在に時定数を変更することができる。利用状況・目的に合わせて選択することができよう。

4. 終わりに

思うところを列記する。

(1) 乗算器にアナログデバイセス社のAD835(DIP型)を使用している。価格は1790円であった。840円のAD633があった。が、フラット型(基板表面実装型)であった。安いのは魅力があったが、試作段階であったので、AD835を使用した。もう1度製作するならば、AD633を使用するかも知れない。

(2) 本MF・LIAの基準参照信号周波数は500Hzとしている。が、数Hz~数百kHzの周波数に変更することは、何の苦労もない。希望するロック周波数を f_0 とする。次のようにすればよい。

① NE555を f_0 で発振するように、 $R_1=R_2(=R)$ とCを変更する。

② 参考文献(3)を手引きにして、LPF, HPFのカット周波数が f_0 となるように、外付けの抵抗とコンデンサ群の値を設定する。

③ 位相偏移部のコンデンサと可変抵抗の値を適宜に変更する必要もある。が、それほど難しくはない。適当な値のものを持ってきて動作試験を行えばよい。不調ならば値を変えるだけである。

以上で、任意の周波数でロックが掛けられるMF・LIAとすることができよう。

(3) 電源について。本装置の制作費を安く抑えるために、土電源として、乾電池006Pを2個使用している。長期間の使用においては、006P乾電池の交換が頻繁に必要となろう。006P乾電池は200円から400円程度である。頻繁に006P乾電池を交換しなければならないような利用環境では、006P乾電池の代わりに、チャージポンプICを用いた方が、長い目で見れば結果的には安く済むであろう。チャージポンプICを用いれば、相対的に安い値段の1.5Vの乾電池1本から土電源を簡単に供給できる。が、肝心のICは1個数千円する。初期投資の金額がはるが、長い目で見れば、チャージポンプICを使用した方が安く済むのかも知れない。

(4) 本NF・LIAの制作費について。諸々を積算しても、3千円は超えていないであろう。

(5) 乗算器であるAD835は、電気部品などをインターネット販売している「RSコンポーネンツ」から購入した。近年、秋葉原の部品専門店では、特殊なIC等を店頭には置いていない。特殊なICの購入には、下調べもできるので、インターネット販売で購入する方が便利である。

参考文献

- (1) 「電子機器の自作(その4)ーロックインアンプの製作ー」金野茂男、田崎義久、岩本宜久、小山高専工業安全教育研究センター「工業安全に関する研究集録」No. 12, 1991年、33頁。
- (2) 「ロックインアンプの改良」徳吉由紀夫、金野茂男、小山高専工業安全教育研究センター「工業安全に関する研究集録」No. 15, 1994年、50頁。
- (3) 「精選アナログ実用回路集」稲葉保、CQ出版社、1991年、317頁、330頁。

(2009年12月24日)