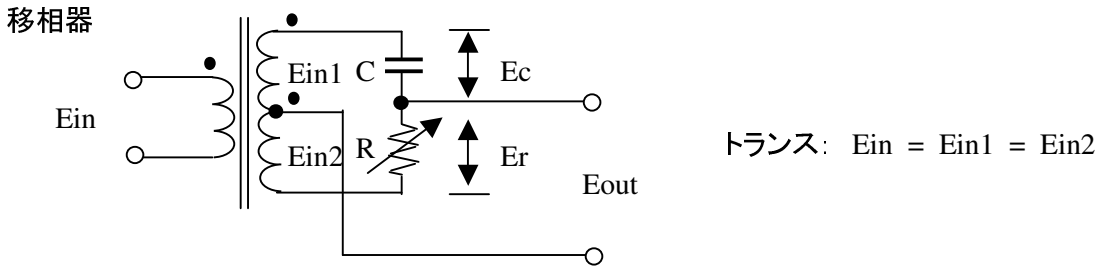


1. はじめに

以前ある回路を見ていましたら、その中に移相器という回路がありました。  
 周波数が一定の時、Rを変化させると出力 (Eout) と入力 (Ein) の間の位相差が変化します。  
 そして振幅は変化しないというのです。(トランスが有効に働く周波数範囲において)  
 また周波数を変化させた場合は、位相差は変化しますが、振幅は変化しません。  
 フェーズシフタ、位相シフタ、或いはオールパス・フィルタなどとも言うようです。  
 どうしてこんなことが実現できるのか、調べてみました。 また、後に他の回路例 なども見てみました。

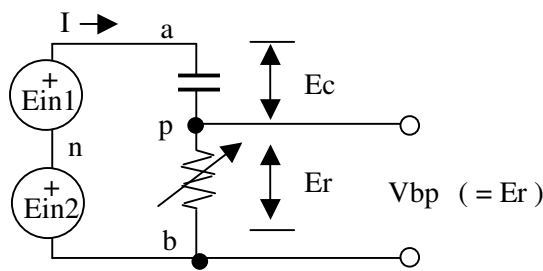


2. 調査

文献を当たってみましたら、とても良い解析がありました。(Ham Journal No93 p111)  
 この解析を私自身が理解しやすいと思われるように書き直してみました。  
 実質的には文献とこのレポートはほぼ同じ内容を述べています。

2.1 Step1

先ず第一ステップとして回路を下図のようにして考えます。 ノード記号を図のように付けました。  
 そうしますとこの回路の出力 (Vbp)は抵抗の電圧 (Er) そのものになります。  
 多く教科書に載っているC-R直列回路のRの電圧です。

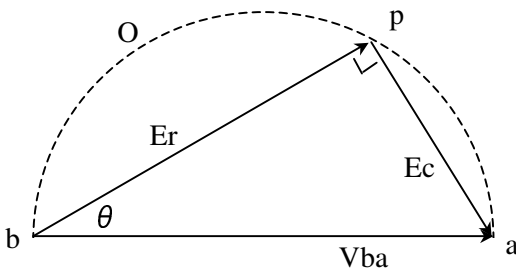


☆条件

$$\begin{aligned} E_{in1} &= E_{in2} = E_{in} \\ V_{ab} &= E_{in1} + E_{in2} = 2 * E_{in} \\ E_c &= V_{pa} \quad E_r = V_{bp} \end{aligned}$$

- 1) ErとEcの(ベクトル)和 がVabになります。
- 2) ErとEcの位相差は常に 90° です。

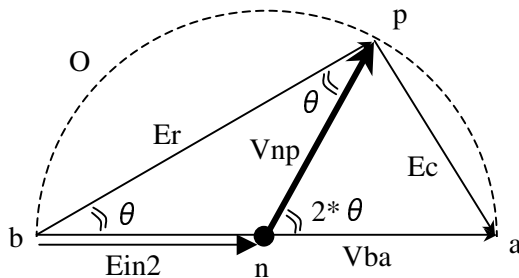
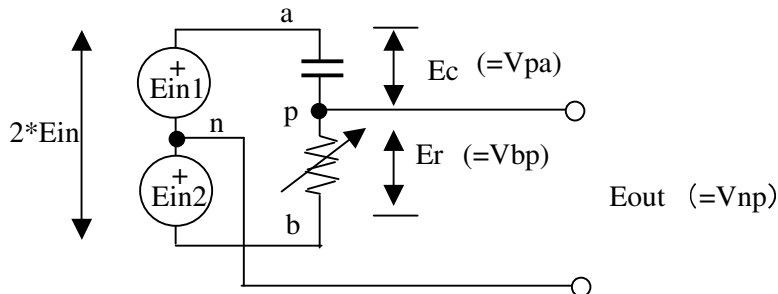
$$\begin{aligned} \angle bpa &= 90^\circ \text{ (円周角の定理 付 2.)} \\ \theta &= \arctan(E_c/E_r) = \arctan \{ (I/\omega C) / (RI) \} \\ &= \arctan \{ 1/(\omega CR) \} \quad \omega = 2 * \pi * f \end{aligned}$$



以上によってRを変化させた時の出力 (Vbp) の  
 先端はVbaを直径とする半円O上にあります。  
 C, R, 周波数が決まると、θが決まります。  
 また、各電圧との関係は次のようになります。  
 $E_r = V_{ba} * \cos \theta \rightarrow \theta = \arccos(E_r / V_{ba})$   
 $E_c = V_{ba} * \sin \theta \rightarrow \theta = \arcsin(E_c / V_{ba})$

## 2. 2 Step2

最初の回路(1. 項)での出力  $E_{out}$  は、トランスの midpoint の電圧と p 点間の電圧で、下の回路図の n-p の間の電圧 ( $V_{np}$ ) です。 n 点の電圧は  $E_{in2}$  の電圧であり、 $V_{ba}$  と同位相で電圧は  $1/2$  なので、ベクトル図では  $V_{bn}$  でこれは  $V_{ba}$  の  $1/2$  です。 従って  $V_{np}$  は n 点と p 点を結んだ、図の太線となります。

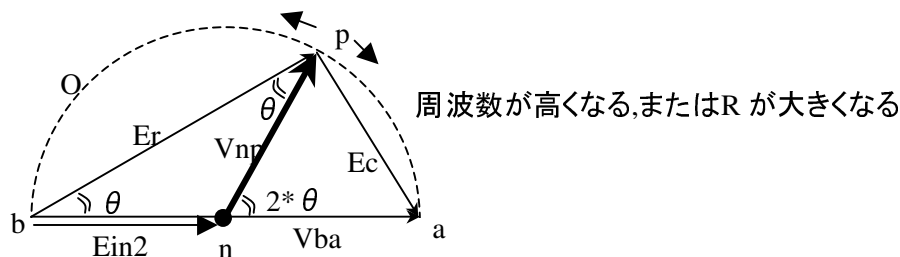


電圧振幅  $E_{in} = E_{in1} = E_{in2} = E_{out}$

この図を良く見ますと、次のようなことが分ります。

- 1) p 点は  $R$  (または  $C$ ) を変化させることによって半円  $O$  上を移動する。  
半円  $O$  は  $V_{ba}$  を直径とし、 $V_{ba}/2$  を中心とする半円。
- 2) p 点の位置は  $\angle abp$  が  $\theta (= \arctan(1/(\omega CR)))$  となるような  $V_{bp}$  と、半円  $O$  との交点である。
- 3) 出力電圧  $E_{out} (=V_{np})$  は半円  $O$  の半径なのでどのような  $\theta$  に対しても一定であり、値は  $V_{ba}$  の  $1/2$  である。これは  $R$  を変化させた時には  $\theta$  は変化するが  $E_{out}$  の振幅は変化しないことを意味する。
- 4)  $E_{out}$  は入力電圧  $E_{in}$  と等しい振幅で、位相については  $E_{out}$  は  $E_{in}$  に対して  $2 * \theta$  進んでいる。  
 $\theta$  は  $R$  の値によって  $0 \sim 90^\circ$  の値をとるので、位相差は  $0 \sim 180^\circ$  までとなる。  
入出力の位相差は 位相差 =  $\angle anp = 2 * \arctan(1/(\omega CR))$  である。
- 5) p 点の動きは下図の通りで、究極の場合の位相差は  
周波数  $= 0$  または  $R = 0$  のときは、 $p = b$  となって入力と  $180^\circ$   
周波数  $= \infty$  または  $R = \infty$  のときは、 $p = a$  となって入力と  $0^\circ$

周波数が低くなる, または  $R$  が小さくなる



### 3. 結論

移相器を次のように定義して

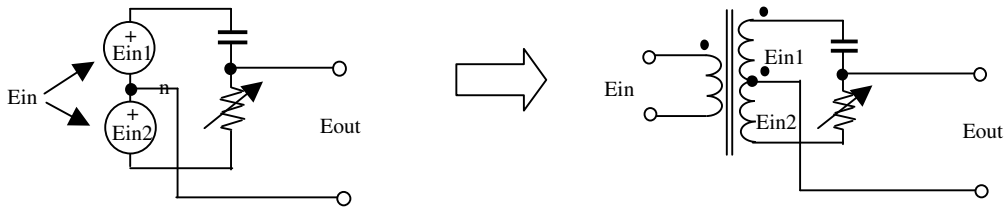
$$\text{出力電圧振幅} = \text{入力電圧振幅}$$

$$\text{入出力電圧位相差} = 2 \cdot \arctan(1/(\omega CR))$$

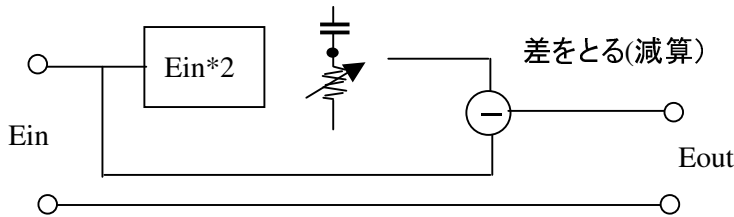
これを実現するためには、前述と重複しますが次のようにすればよいでしょう。

いずれもベクトル図の実際の回路への実現です。

- 1) 信号源と、その逆相の信号源 (振幅は等しく位相のみ反転したもの) を用意して、CRの直列接続を各信号源に図のように接続して、C,Rの接続点から信号を取り出す。



- 2) 入力信号に対して同位相かつ振幅が2倍の信号源を用意し、CRの直列接続をその信号源に接続し、C,Rの接続点の電圧から入力信号を減算する。



### 4. 移相器の回路例

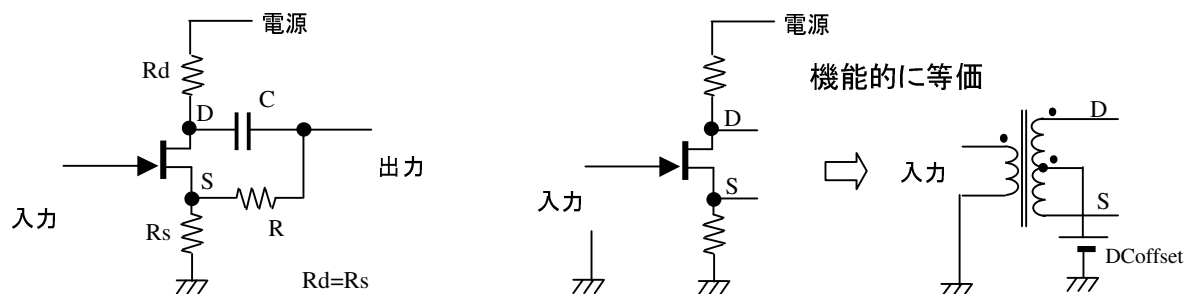
#### 4.1 FETを使用した回路

次のような回路があります。

FETではドレイン電流 ( $I_d$ ) = ソース電流 ( $I_s$ ) です。ドレイン (D) とソース (S) に同じ値の抵抗を接続すると、ドレインとソースにはゲインが1で振幅が等しく、位相が  $180^\circ$  ずれた信号が得られます。

ちょうどDCオフセットを持ったトランスと機能的に等価です。

これにC,Rを接続しますと、3. 1)項のような理由で移相器になります。



#### 4.2 オペアンプを使用した回路

オペアンプを使用して、移相器が実現できます。

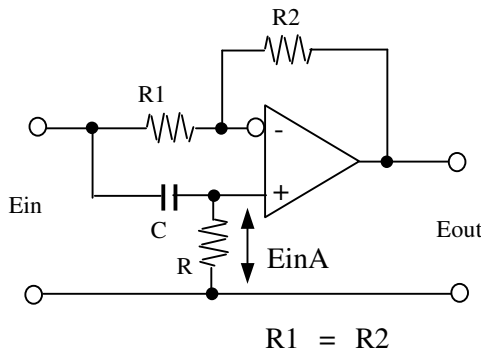
入出力の特性が計算値との誤差が小さくなるような、高精度の目的で使用されます。

オールパスフィルタと呼ばれることのほうが多いようです。

インターネットなどで検索するといっぱい出てきますが、動作原理で分り易いものは多くないようです。

ちゃんと式を立てて計算をすれば、回路の動作は記述できると思います。

ここでは前記3.項の内容を踏まえて動作を考えると、うまく動作の説明ができそうです。



オペアンプを使用した移相器  
(オールパスフィルタ)

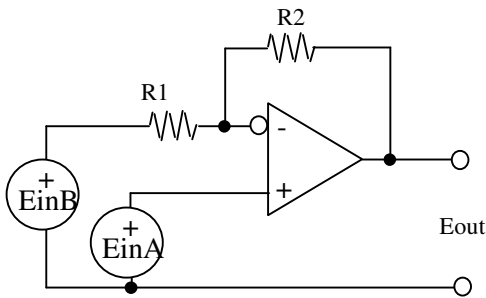
この回路の動作はそのまま回路図を見てもよくわかりません。  
オペアンプの増幅回路の基本的なところから考えて見ます。(下図)  
この回路の出力と入力の関係式と、各項目の意味は次のようです。

$$E_{out} = E_{inA} * ((R1+R2)/R1) + (-1) * E_{inB} * (R2/R1)$$

↑  
EinAの((R1+R2)/R1)倍の電圧

↑  
EinBの(R2/R1)倍の反転した電圧

出力電圧はこの2項の加算  
(EinBの内部インピーダンスは0とします)



オペアンプの増幅回路で、反転増幅器や非反転増幅器などがありますが、それは各々 EinBが入力でEinA=0 (反転増幅器)、EinAが入力でEinB=0 (非反転増幅器) の場合です。また、EinA側のゲインが高くなりますので、減衰器を入れてEinBとのゲインの絶対値を等しくした場合は差動増幅器となります。

ここでR1=R2とするとEoutは次のようになります。

$$E_{out} = E_{inA} * 2 + (-1) * E_{inB}$$

すなわち、ことばで表現するとこの回路の動作は  
出力  $E_{out}$ は  $E_{inA} \times 2$  と  $E_{inB}$ の反転の 加算  
=>  $E_{inA} \times 2$  と  $E_{inB}$  の 減算

$E_{in} = E_{inB}$ 、 $E_{inA} = C, R$ の位相シフト後の $E_{inB}$  となるので、3. 2)項によって移相器として動作することが分ります。

ただし、3. 2)項では“先に2倍の信号源を用意しCRを接続“となっていますが、この回路では”先にCRを接続しそれを(回路内で)2倍“となります。結果は同じです。

## 5. 感想

1)この始まりは、Ham Journal No.96 に出ていた受信機のノイズキャンセラでした。

キャンセラ自体ができた訳ではありませんが、回路を見てどうやって動作しているかな？と思ったのが始まりです。まあ、パズルみたいなものです。

CRの直列のハイパスフィルタ回路では振幅も位相も変化するのですが、入力の電圧を減ずると振幅が全く変わらなくなるなんて、世の中には巧妙な回路を思い付く人がいるものだと感心しました。もっとも巧妙な回路はいっぱいありますので、いちいち感心していてもきりがありません。

2)3つのパーツ(トランス、C、R)で移相器が構成されているわけで、これだけのパーツの回路の動作がわからなくて隔靴搔痒でした。ここまでわかるのに随分と時間がかかりました。

3)移相用のC,Rの位置を交換しても、またCをLに変更しても移相器として動作します。

4)フェージングタイプのSSB発生器を作ったことがあります。

音声周波数帯の移相器が必要になるのですが、4. 2のタイプを移相器として使用し、ポールの周波数をずらして複数個を多段接続し、広帯域の90°位相差を作ります。

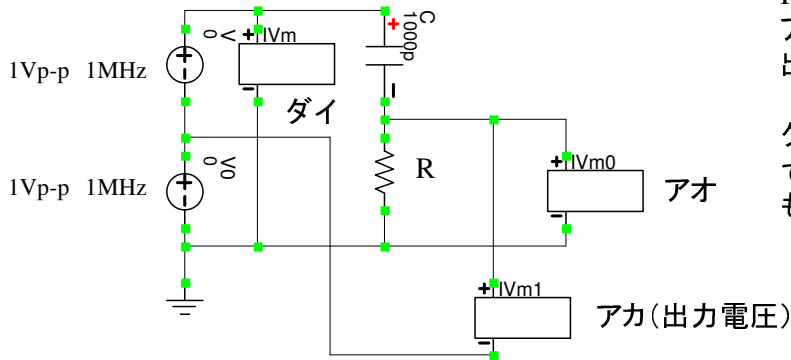
この単体の移相器の動作原理がわからなかったのですが、なんとか説明が付いたようです。

4. 1項のFETの移相器、および 4. 2項のオペアンプの移相器 とともに HJ No.91 に記載されています。

5)ベクトル図について少しかじってみました。やはりむずかしくていろいろな回路を解析できるといううまでには遠く及びません。まだ勉強不足です。

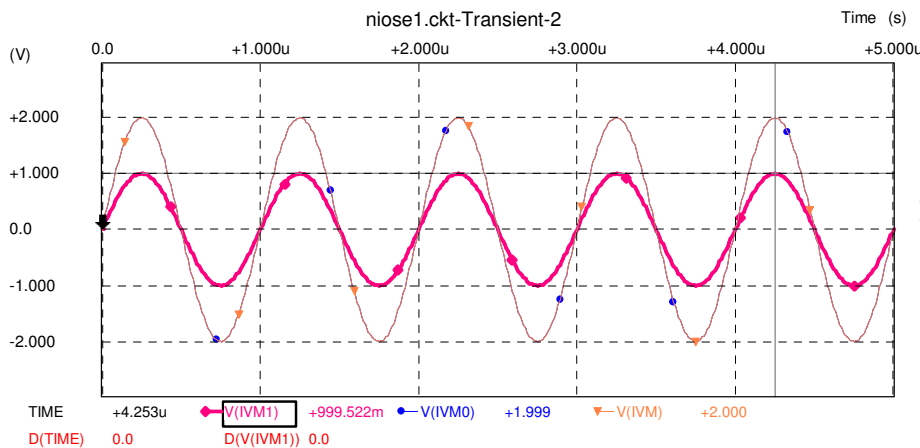
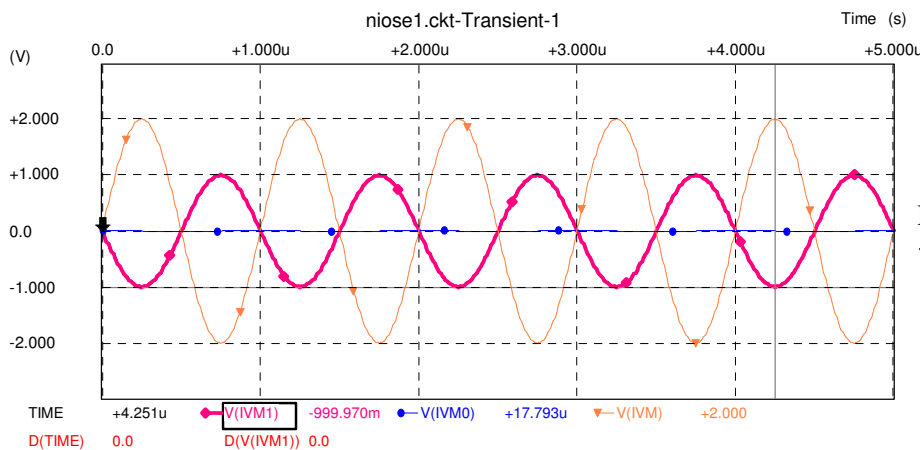
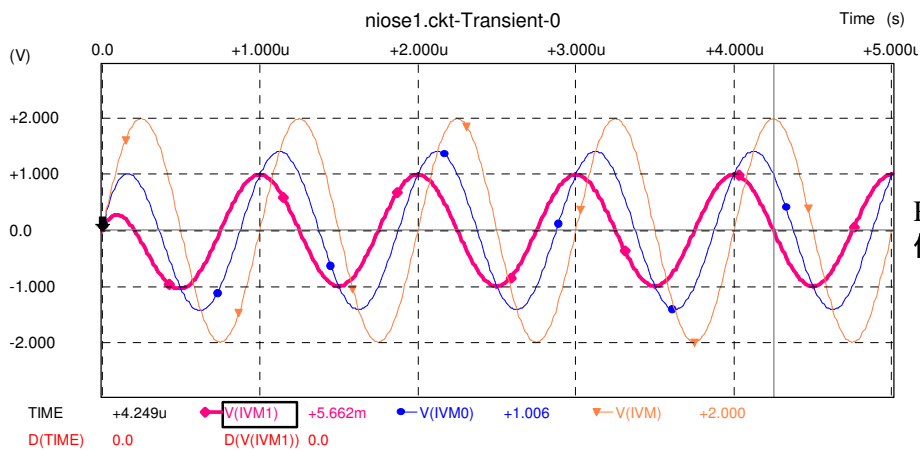
ここでもっと勉強して、どんな回路でも解析OKとなれば優秀なんです。残念ながら……

付 1. シミュレーション  
シミュレーションしてみました。

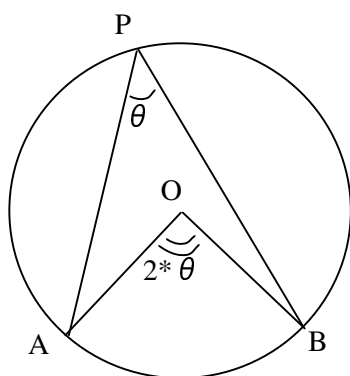


Rを変化させると、ダイ(入力)と  
アオ(Rの電圧)の位相差は変化し、  
出力振幅(アカ)は変化しません。

グラフではダイがアカの振幅の2倍  
ですが、  
もともとダイは入力\*2になっています。



付 2. 円周角の定理



円O上の弧ABに対する角を

中心角  $\angle AOB$

円周角  $\angle APB$

とすると、

$$\angle APB = \angle AOB / 2$$

この関係は点Pが円周上のどこにあっても成立します。

(証明はネット検索すればいくらでも出てきますので省略。)

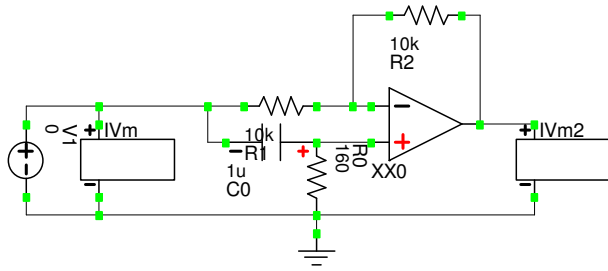
ABが円の直径の位置の時は、

$$\angle AOB = 180^\circ \text{ なので}$$

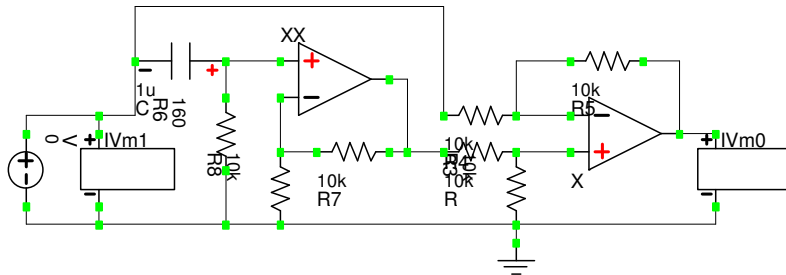
$$\angle APB = 90^\circ$$

付 3. オペアンプ使用のオールパス・フィルタ の構成

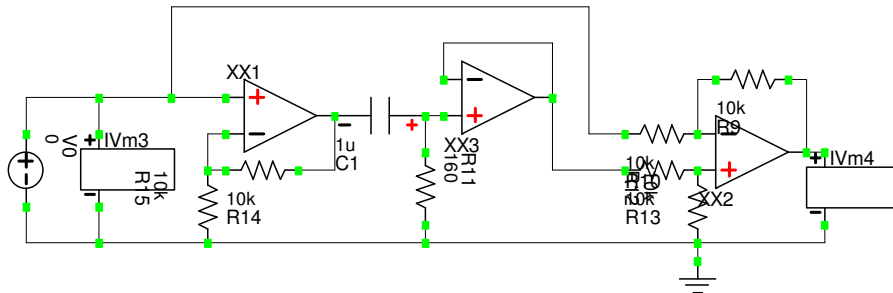
付 3.1 回路



1) 一般的なオールパスフィルタ

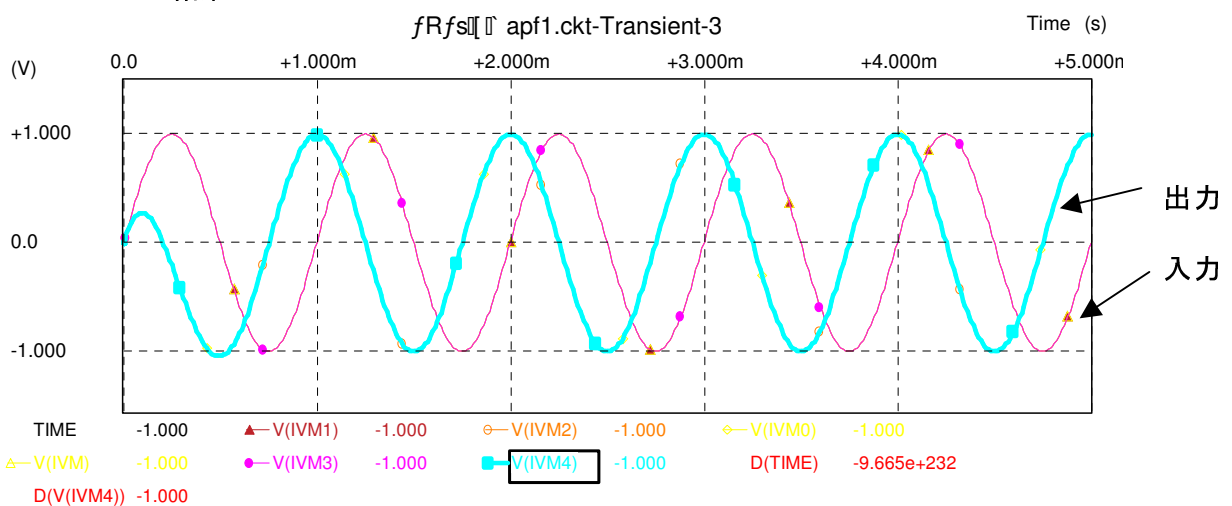


2)こんな構成でも実現可能  
 ①CRの移相器  
 ②移相後の電圧2倍  
 ③入力との差をとる



3)こんな構成でも実現可能  
 ①入力を2倍  
 ②CRの移相器  
 ③バッファアンプ  
 ④入力との差をとる

付 3.2 結果



こんなふうに移相器が作れます。  
 グラフは3つの回路の結果を重ねてあります。  
 結果に有意な差が認められません。  
 同じ動作ならば部品は少ないほうが良いので通常 1) の回路を使います。

以上