

広帯域・高安定二乗検波器

ZOFFY

自分が工学部時代に恩師よりご教授頂いた回路に広帯域・高安定二乗検波器 (1) があります。“Simple is best.”を具現化した回路です。計測など検波を必要とする回路設計には強力なツールであり、自身もお世話になっていますので紹介します。自分もこのような回路を生み出せる技術者になりたいと思い、日々精進を重ねているつもり (?) ですが、その域にはまだまだ到達できていません。「道は遙か・・・」です。

1. 検波器の構成と仕様

主な仕様と回路構成は、次の通りです。

- 動作モード： 差動 2 端子入力
- 伝達特性： 二乗
- 帯域： DC to 200MHz
- 出力電圧： 0 to 0.5V DC
- 入力容量： 6 to 10 pF

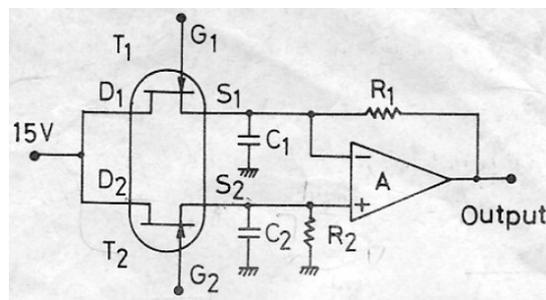


図 1、回路構成

2. 動作原理

JFET のドレイン電流 I_o とゲート電圧 V_{GS} の関係は、近似的に (1) 式で与えられます。

$$I_o = I_{DSS} * (1 - V_{GS}/V_p)^2 \quad \dots (1)$$

I_{DSS} はドレイン遮断電流、 V_p はピンチオフ電圧。

参考のために、2SK369 の伝達特性データを図 2 に示します。図 2 において、X 軸 Y 軸交差点がそれぞれ V_p 、 I_{DSS} です。

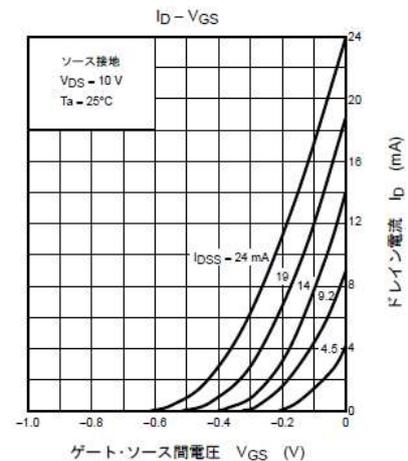


図 2、2SK369 の伝達特性

図 3 は、JFET による AC-DC コンバータです。R は負荷抵抗、C はバイパスコンデンサであり、 $1/\omega C \ll R$ の関係です。 V_{GS} の直流バイアス電圧に交流信号電圧 $V_1 \cos \omega t$ が重畳し、JFET のゲートに印加します。このとき、 V_{DS} は(2)式となります。

$$V_{DS} = V_{DD} - I_o * R - (I_{DSS} * R / 2) * (V_1 / V_p)^2 \quad \dots (2)$$

右辺の第一項、および定常ドレイン電流による第二項は一定です。第三項が交流信号成分であり、二乗特性が得られます。

図 3 の回路において、 V_{DD} や周囲温度の変化が V_{DS} を変動させるといふ安定度の欠点があります。

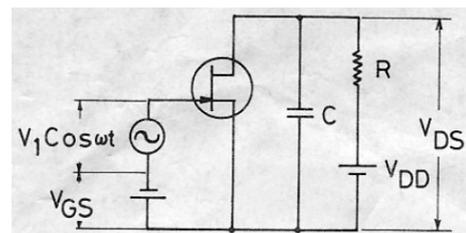


図 3、JFET による AC-DC 変換機

前記した変動分を差動増幅器でキャンセルすることにより、安定度を向上した検波回路 (1) が考案されました。回路は図4に示すように、特性が揃った1カン入りDual-JFETとバイパスコンデンサC1,C2、高精度オペアンプによる差動増幅器で構成します。

ドレインへD1,D2への電源はJFETが定電流動作領域となる電圧を印加します。仮にG2をGND電位とし、交流信号V1Cos ωtをG1に印加するとします。G1印加電圧はS1に対して、JFETのピンチオフ電圧を下限とし、上限はJFET内のPN接合をONさせない範囲です。

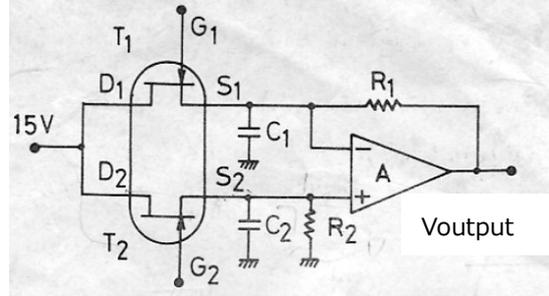


図4、二乗検波器 (図1の再掲)

Dual-JFET各素子からのドレイン電流の直流成分は差動アンプによりキャンセルされます。結果として、出力Voutputは(2)式の第三項のみになります。

$$V_{output} = - (I_{DSS} * R / (2 V_p^2)) * V_1^2 \dots (3)$$

本回路はG1をGND電位とし、G2に交流信号を加えた場合には正極出力が得られます。また、G1,G2双方に交流信号を加えた場合には、その差動出力が得られます。

$$V_{output} = (I_{DSS} * R / (2 V_p^2)) * (V_2^2 - V_1^2) \dots (4)$$

本回路での動作周波数の上限はJFETの応答速度に制限され、オペアンプの帯域によらないことが嬉しいです。必要最小限の素子で構成され、バランスのとれた美しい回路です。

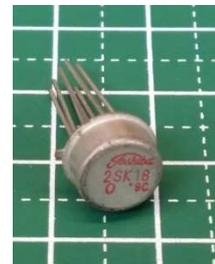
3. 回路定数の設計

Dual JFET_2SK18を用いています。図4回路の動作点は、 $V_{GS} = V_p/2$ 、 $I_{DS} = I_{DSS}/4$ に設定します。手持ちの2SK18のIDSSは1.75mA、Vpは-2.2V (@VDS=10V)でしたので、VGS=-1.1V、IDS=0.44mAとなるように、R1=R2=2.2kΩとしました。G2をGND電位とし、G1に最大振幅電圧1.1*Cos ωt (V)を印加した時の出力電圧Voutputは、(3)式より、-480 mVとなります。交流信号の周波数fを1MHzとしたときには、C1,C2がバイパスコンデンサとして働くために容量値をC1=C2>0.01μFとします。

$$R1/100 > 1/(2 * 3.14 * f * C) = 2.2E3/100 > 1/(2 * 3.14 * 1E6 * C)$$

$$C > 7E-9 \approx 0.01 \mu F$$

オペアンプは、零点ドリフトの小さいレジェンドな高精度オペアンプOP07です。2SK18は残念ながら製造中止であり、代替はLSK389(LINEAR SYSTEMS社)となります。



2SK18 外観

表1、2SK18 特性

DUAL TYPE	Type No.		V _{GDS} (V)	I _G (mA)	P _D (mW)	T _j (°C)	I _{DSS} *		Y _{fs1}		ΔV _{GS} [V _{GS1} - V _{GS2}]		Δ[V _{GS1} - V _{GS2}] ΔT _a		PACKAGE			
	N-Channel	P-Channel					I _{DSS} (mA)	V _{DS} (V)	V _{DS} (V)	V _{GS} (V)	V _{DS} (V)	I _D (mA)	(Notes) μV/°C	V _{DS} (V)		I _D (mA)		
Similar to 2SK15	2SK18		-40	10	200	150	0.45~2.8	10	0.8~3.0	10	0	10MAX.	10	0.2	100MAX.	10	0.2	(2-9C1A)
Similar to 2SK15	2SK18A		-40	10	200	150	0.45~2.8	10	0.8~3.0	10	0	10MAX.	10	0.2	20MAX.	10	0.2	(2-9C1A)

4. 応用例

正確な計測を行うためには高い安定性が求められます。この高帯域・高安定 AC-DC コンバータを LC 直列共振回路の共振状態をモニタするために用いた例を紹介します。図 5 は破線で囲まれた LC 直列共振回路と、これを駆動する発振器、および発振器と共振電圧の位相差を検出するための本回路&Pick Up コイルにより構成されます。本構成において、完全な共振状態において発振器の位相と標準インダクタの位相差は 90 度となり、位相検出回路の出力は零となります。図 6 は試作した基板の位相検出回路部です。位相検出コイルと 2SK18 が見えます。

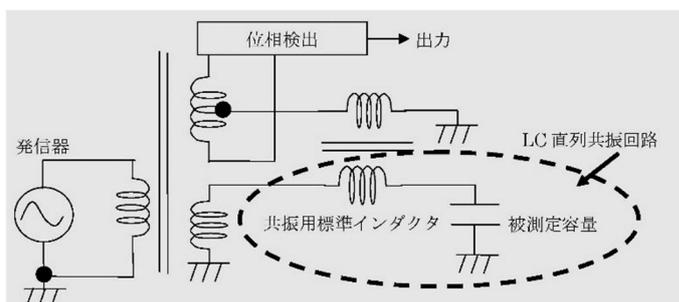


図 5、モニタ付き直列共振回路の構成



図 6、位相検出回路

引用文献

- (1) Review of Scientific Instruments 53, 528 (1982); <https://doi.org/10.1063/1.1137004>
[Akira Kakimoto](#) and [Masahide Ohshita](#)

(以上)