

PLL の基礎と応用

1 . PLL の基本原理

PLL(Phase-Locked Loop)とは入力信号の位相にロックするループ回路である。もう少し具体的に言えば、PLL システムの基本構成を図 1 に示す。すなわち、位相比較器(PC:Phase Comparator)、低域フィルタ(LPF)、増幅器(AMP)、電圧制御発振器(VCO)からなる。

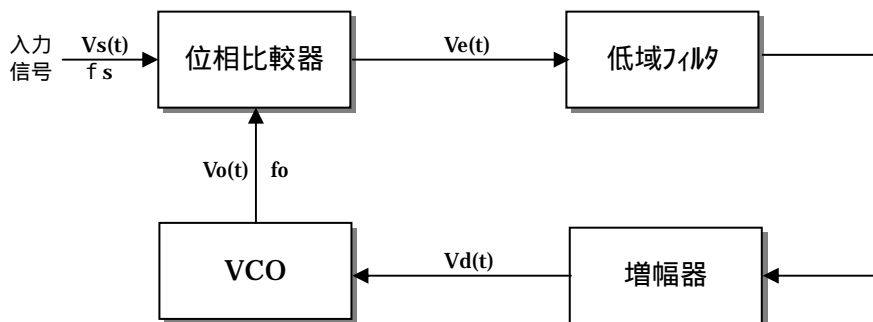


図 1 PLL の基本システム

入力信号 f_s に対して VCO 信号 f_o の位相が進んでいけば(周波数が高ければ)、VCO 信号 f_o の周波数を下げ、反対に VCO 信号 f_o の位相が遅れていけば、その周波数を下げることにより、入力信号の周波数 f_s に一致した VCO 信号 f_o を得ることが出来る。

位相比較器により、入力信号 f_s と VCO の出力信号 f_o を比較し、それらの位相差に応じたパルス電圧(Error Voltage) $v_e(t)$ が出力される。パルス幅は位相差に比例する。更に、低域フィルタにより信号 $v_e(t)$ を積分、平均化することにより、位相差に比例した DC 電圧を得ることが出来る。更に、この信号を増幅し、位相差に比例した電圧 $v_d(t)$ が VCO に与えられる。

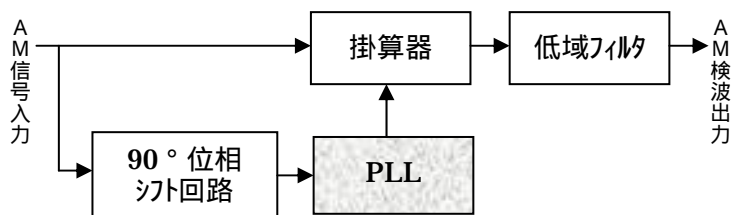
2 . PLL の応用事例

PLL の応用事例を挙げると表 1 のようになる。

表 1 PLL の応用事例

通信関係	AM 検波器 FM 信号復調器 UHF 放送の選局 トランシーバ用周波数シンセサイザ
家電関係	ステレオ MPX デコーダ カラーテレビ・クロマ回路 水平偏向回路 テレビカメラの同期信号発生器 磁気テープのクロック再生回路
計測関係	飛行体の速度測定 周波数測定回路 ベクトルボルトメータ 周波数発生器 周波数カウンタ スペクトラムアナライザ

2 - 1 . AM 検波器への応用

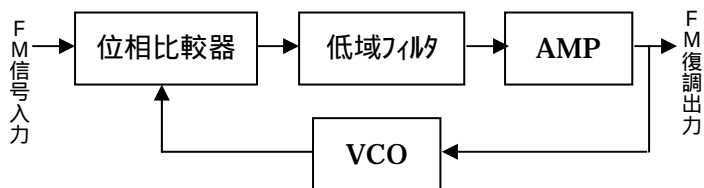


入力された AM キャリアー信号に対してロックした信号が PLL から出力される。90° 位相シフト回路は PLL による位相のずれを補正するためにある。

図 2 AM 検波器への PLL 応用

AM 変調信号 :	$V_{AM} = V_o(1+m \sin pt) \sin t$
PLL 出力 :	$V_P = V_o \sin t$ 搬送波
掛算器出力 :	$V_M = V_o(1+m \sin pt) \sin 2t = V_o(1+m \sin pt)(1 - \cos 2t)/2$
低域フィルタ出力 :	$(V_o/2)(1+m \sin pt)$ 信号波

2 - 2 . FM 復調器への応用



PLL が FM 信号入力にロックして作動するので、位相比較器の出力は変調信号に対応した位相差が出力されるので、低域フィルタからは FM 復調信号に対応する信号が出力する。

図 3 FM 復調器への PLL 応用

2 - 3 . トランシーバ用周波数シンセサイザ

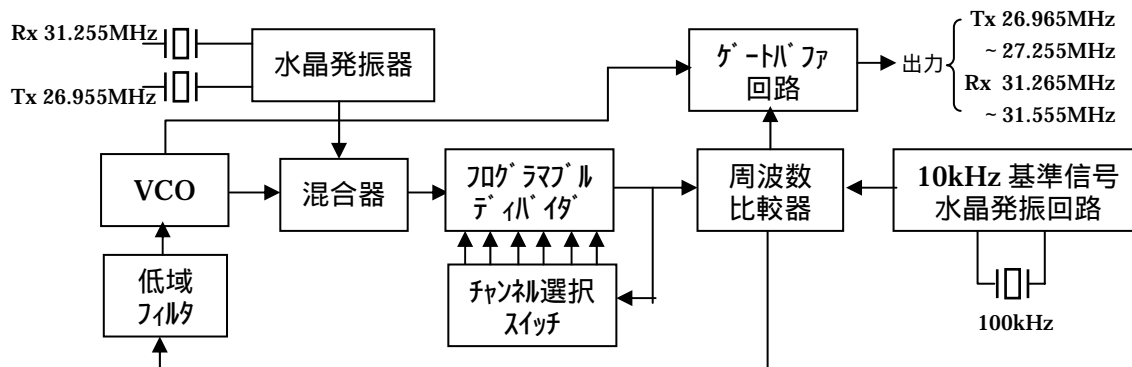


図 4 トランシーバ用周波数シンセサイザへの PLL 応用

混合器により VCO と水晶発振器の周波数の差が出力する。次にプログラム・ディバイダにより、その出力が 10kHz になるように分割される。分割比はチャンネル選択スイッチで設定され、1 の場合はその差は 10kHz となる。すなわち、水晶発振器の周波数 Tx または Rx に対して、10kHz づつシフトした周波数が出力される。

3. 低～中周波数用 PLL IC MC4046B による PLL の応用

PLL IC の MC4046B の内部構成と、それを用いた基本的使い方の構成を図 2 に示す。MC4046B は VCO と位相比較器等が内蔵されており、外部に低域フィルタとカウンタを設けるだけで周波数てい倍回路を構成することが出来る。

この具体的事例(PLL 周波数シンセサイザ)の回路を図 3 に示す。分周器としては 4018B(Presettable Divide by N Counter)を用いる。

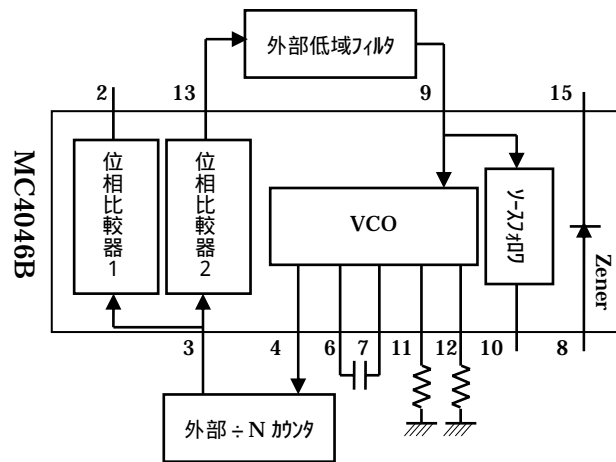


図 2 4046B の内部構成と外部の基本構成

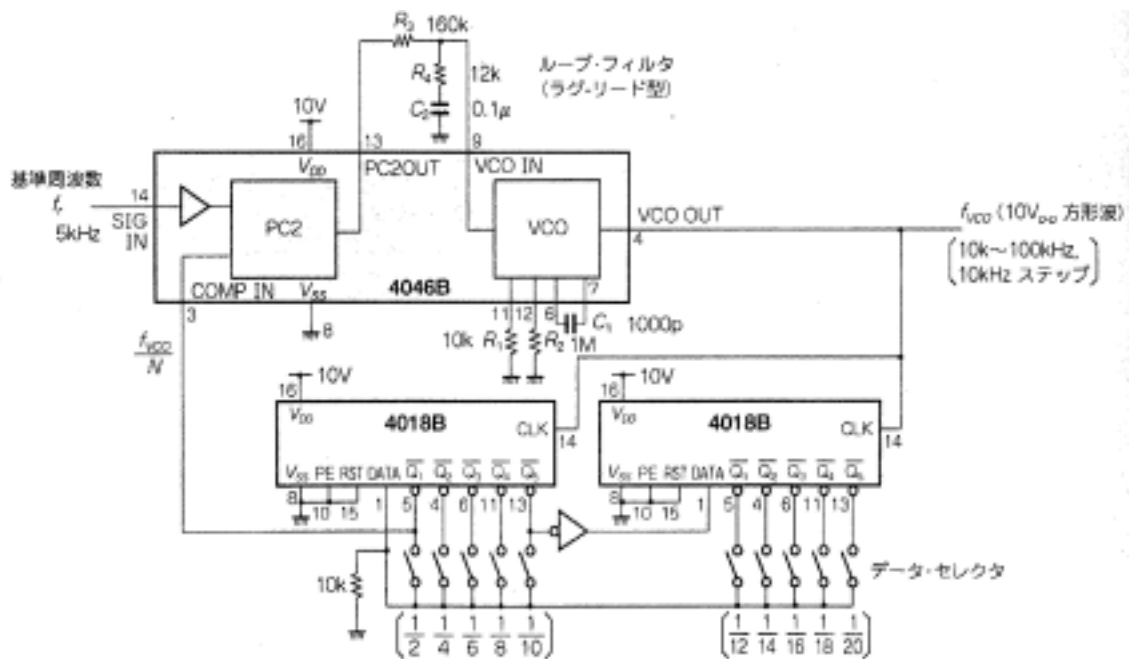


図 3 4046B による PLL 周波数シンセサイザ

4018B の各出力 $\overline{Q_n}$ をスイッチにより DATA 入力に帰還することにより、夫々、 $1/2, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/12, 1/14, 1/16, 1/18, 1/20$ の分周比が得られる。すなわち、位相比較器に入力する基準周波数を 5kHz とし、例えば、分周比 $1/10$ にセットしたとすると、位相比較器に入力(4046B COMP IN)する周波数が 5kHz に調整されるので、よって、VCO の出力周波数は 50kHz になる。

3 1 基準周波数発生回路

周波数が安定した周波数発生には水晶発振回路を用いることが好ましい。マイクロコンピュータ等のクロックに良く用いられている発振回路は C-MOS IC 水晶発振回路であり、これを図 4 に示す。

今回、PLL 周波数シンセサイザに用いられる基準周波数は低周波の 5kHz であり、図 4 の水晶発振回路は一般には周波数 1MHz 以上に用いられ、1MHz 以下の低周波には図 5 の回路が用いられる。

しかしながら、共振周波数 5kHz 程度の低周波の水晶振動子の入手は難しく、また、形状も大きくなるため、一般には、分周して所用の低周波を得ている。

入手が最も簡単で、低周波な水晶共振子は時計用の 32.768kHz であり、これを用いる。この周波数を 4018 で 1/6 に分周すると、5.461kHz の基準周波数を得ることが出来る。この回路を図 6 に示す。

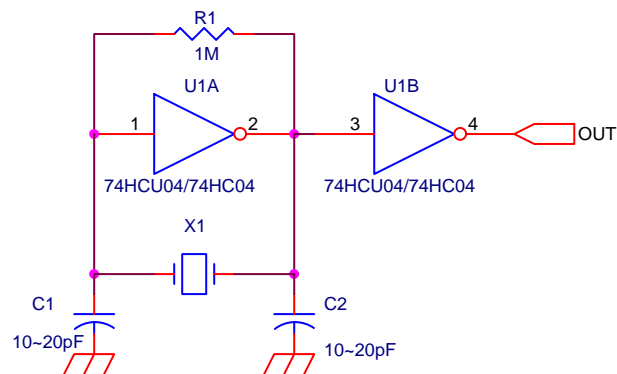


図 4 CMOS 水晶発振回路(1MHz ~)

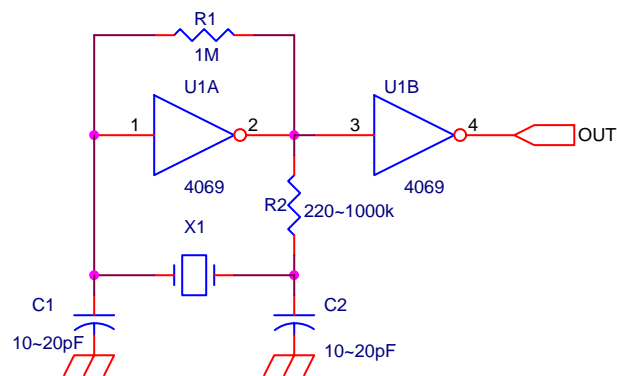


図 5 CMOS 水晶発振回路(1MHz 以下)

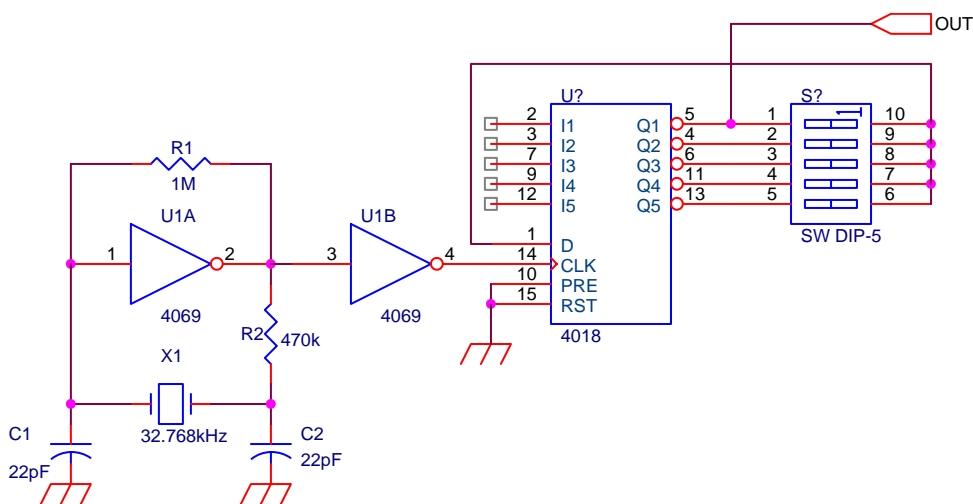


図 6 5.461kHz の基準周波数発生回路

3 - 2 . VCO 部

VCOの発振周波数範囲は外付け部品 C_1, R_1, R_2 の値により決定し、最大、最小発振周波数 f_{max}, f_{min} は次式により示される。

$$f_{min} \approx \frac{1}{R_2(C_1 + 32pF)}$$

$$f_{max} \approx \frac{1}{R_1(C_1 + 32pF)} + f_{min}$$

$$\therefore 10k\Omega < R_1 < 1M\Omega$$

$$10k\Omega < R_2 < 1M\Omega$$

$$100pF < C_1 < 0.01\mu F$$

設定可能な最大周波数は 1.4MHz(typ.)である。今回は基準周波数 5.46kHz の最大 20 倍、すなわち、109.2 kHz まで発振させる。

$$C_1 = 1000pF, R_1 = 10k\Omega, R_2 = 1M\Omega$$

の場合、

$$f_{min} \approx 1kHz, f_{max} \approx 101kHz$$

となる。

この場合における、VCO の入出力特性(Vc Fo)の実測値を図 7 に示す。

3 - 3 . 低域フィルタ

この低域フィルタにより PLL 回路の応答特性が決まり、1 次パッシブ型、ラグ・リード型、アクティブ型がある。応答性の良いラグ・リード型を採用する。

フィルタの各定数は、次式に従い、最低、最高発振周波数 f_{min}, f_{max} と分周比 N により決定される。

$$C_2 R_4 = \frac{6N}{f_{max}} - \frac{N}{2\pi(f_{max} - f_{min})}$$

$$C_2 (R_3 + 3k\Omega) = \frac{100N(f_{max} - f_{min})}{f_{max}} - C_2 R_4$$

$f_{min} = 10kHz, f_{max} = 100kHz, N = 20$ の場合

$$C_2 = 0.1\mu F \quad R_3 = 160k\Omega \quad R_4 = 12k\Omega$$

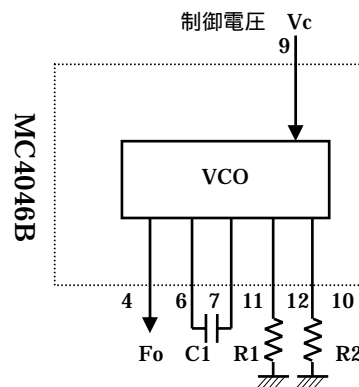


図 6 4046B の VCO の構成

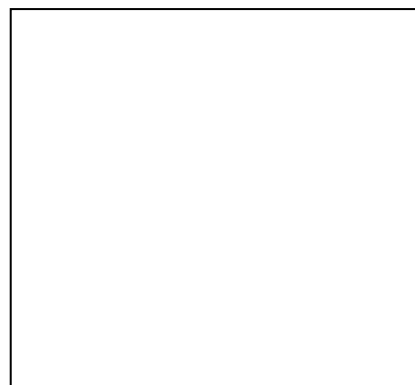


図 7 VCO の実測入出力特性

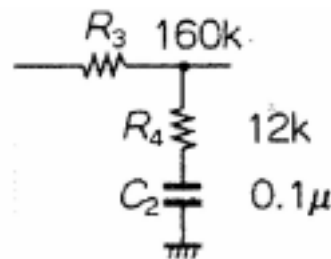


図 8 ラグ・リード型低域フィルタ

4 . 低～中周波数 PLL 用汎用波形発生 IC ・ ICL8038 を用いた VCO 回路

波形発生用 IC ICL8038 を用いて低周波から中周波用 VCO 回路を構成することが出来る。

この IC の主な特徴は

簡単な周辺部品により、パルス波、三角波の波形のみならず、正弦波の波形を発生することが出来る。

FM SWEEP INPUT 端子(8pin)を利用することにより、FM 変調、および、周波数の電圧制御が可能である。

温度係数が 50ppm/ であり、環境温度安定性が高い。

である。

ICL8038 の内部回路を図 9 に示す。

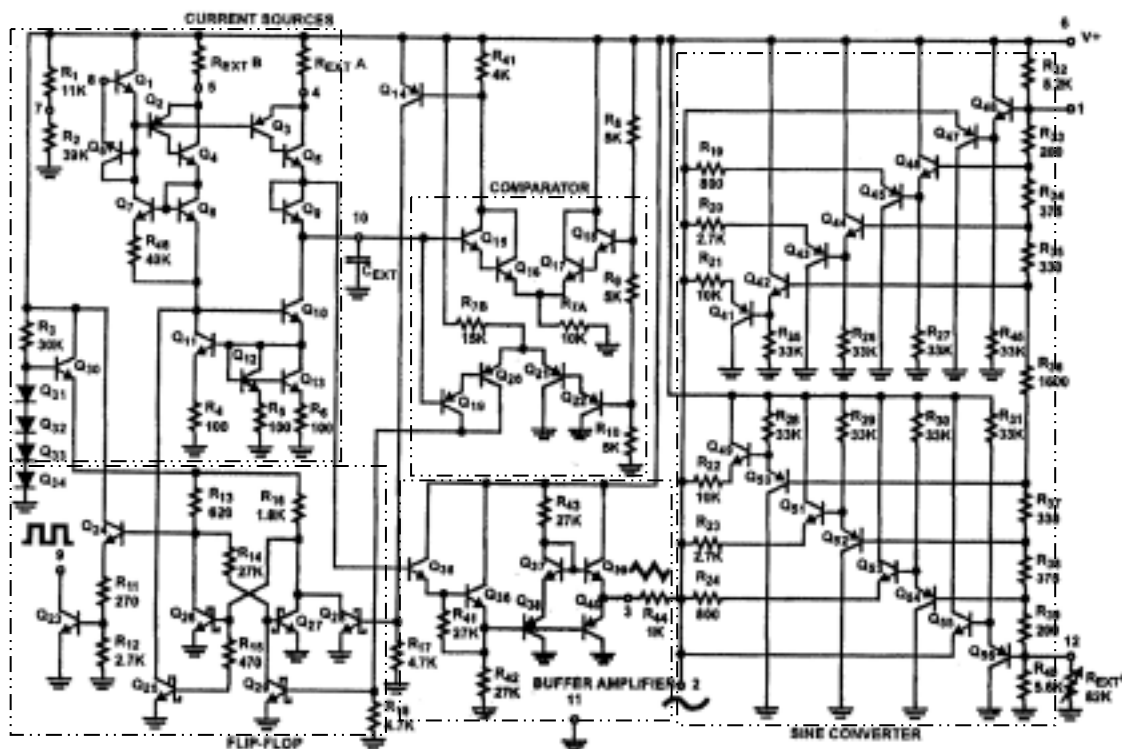


図 9 ICL8038 の内部回路

更にブロック図で表すと、図 10 になる。また、図 10 に示す幾つかの外部を付加する事により、VCO の基本回路を構成することが出来る。

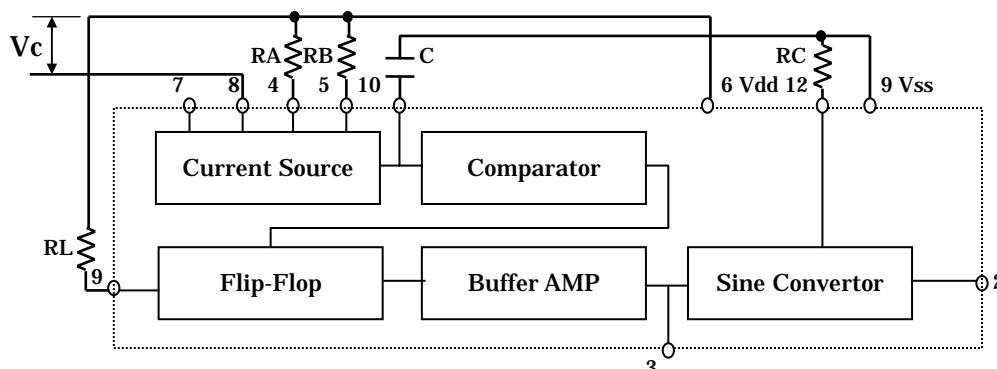


図 10 ICL8038 内部ブロック図と VCO の基本回路

R_A, R_B, C により、発振周波数とデューティ比が決まり、字式の関係が成り立つ。

$$t_1 = \frac{R_A C}{0.66} \quad t_2 = \frac{R_A R_B C}{0.66(2R_A - R_B)}$$

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)}$$

$R_A = R_B$ であれば、

$$t_1 = t_2 = \frac{R_A C}{0.66}$$

$$f = \frac{0.33}{R_A C}$$

となる。

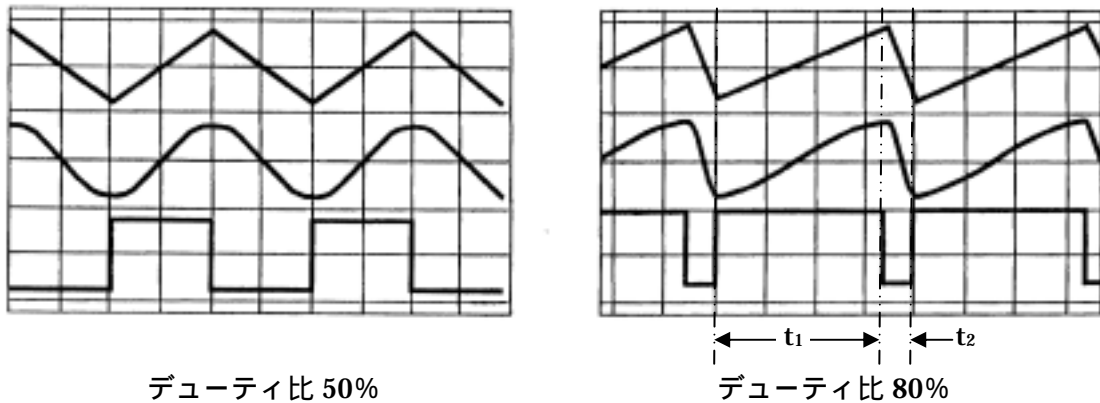


図 11 ICL8038 の出力波形

次に ICL8038 の応用回路を図 12 に示す。

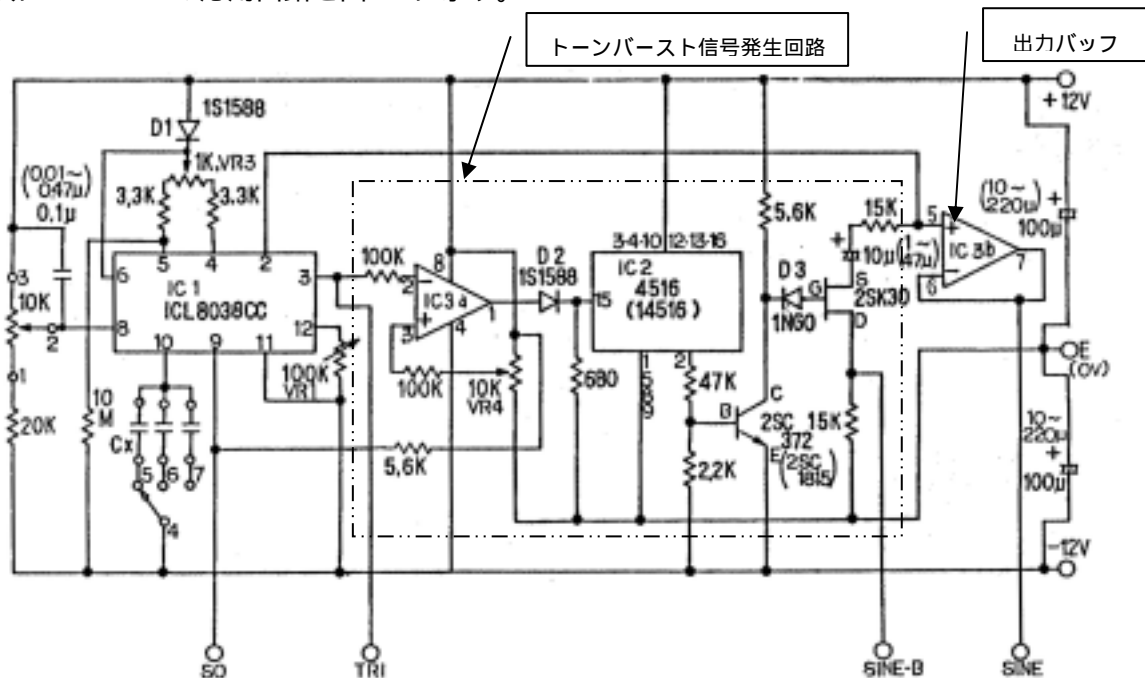


図 12 ICL8038 の応用回路

5 . 中～高周波用波形発生 IC ・ MAX038 を用いた VCO、PLL

MAX038 は次の特長を有する波形発生用 IC である。

動作周波数：0.1Hz～20MHz

三角波・方形波・正弦波等を発生

その IC の内部構造を図 13 に示す。

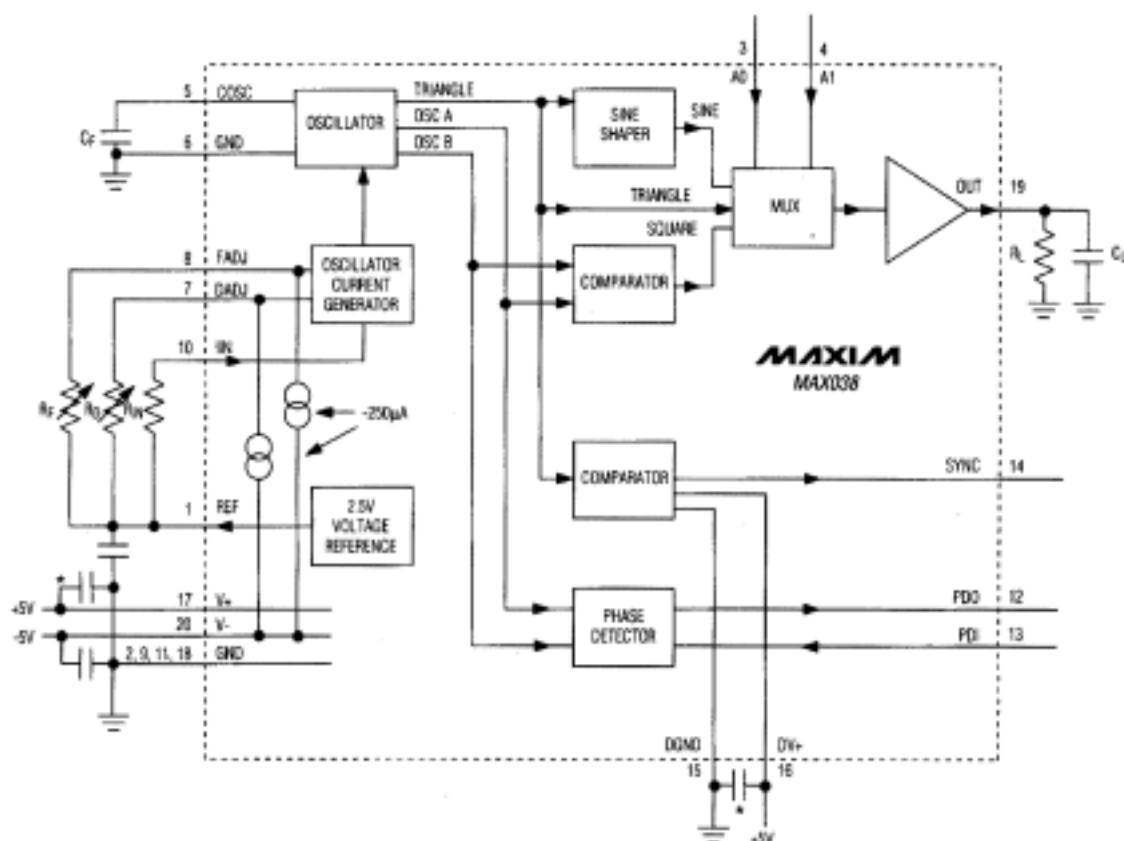


図 13 MAX038 の内部構造

内部の基本構成は ICL8038 に酷似しており、まず、 C_F により充放電を繰返すことにより方形波と三角波を発生する。発振周波数 F_o は C_F と充放電に流れる電流 I_{IN} により決まり、次式によって与えられる。

$$F_o(\text{MHz}) = \frac{I_{IN}(\mu\text{A})}{C_F(\text{pF})}$$

I_{IN} を内部レファレンス電圧 V_{REF} により抵抗 R_{IN} を通じて与えると

$$I_{IN} = \frac{V_{REF}}{R_{IN}}$$

であるので、

$$F_o(\text{MHz}) = \frac{V_{REF}}{R_{IN} C_F(\text{pF})}$$

となる。この関係を図 14 に示す。

出力された三角波を正弦波整形回路の入力し、一定振幅の低歪正弦波に変換する。

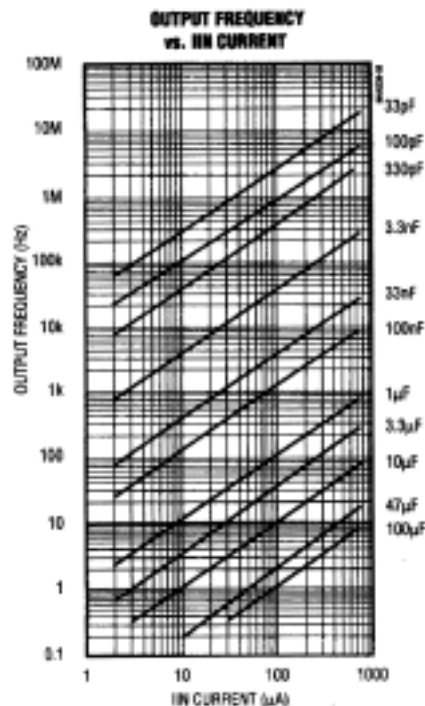
また、位相比較器を内蔵しているため、簡単に PLL を構成する事も可能である。

C_F 、 I_{IN} を一定にしても、FADJ 電圧 V_{FADJ} を変化させることにより、出力周波数を可変することが出来る。その関係は

$$V_{FADJ} = -2V \sim +2V \quad F_o = 1.6 \text{ 倍} \sim 0.4 \text{ 倍}$$

DADJ 電圧 V_{DADJ} を変化させることにより、出力波形のデューティ比を変える事が出来る。その関係は

$$V_{DADJ} = -2.3V \sim +2.3V \quad 10\% \sim 90\% \\ (V_{DADJ} = 0V \text{ で } 50\%)$$



$$V_{DADJ} = V_{FADJ} = V_{PDI} = V_{PDI} = 0V$$

図 14 MAX038 の周波数特性

5-1. MAX038 による VCO

MAX038 による VCO の基本回路は図 15 に示す様に僅かな周辺部品を用いることにより構成することが出来る。

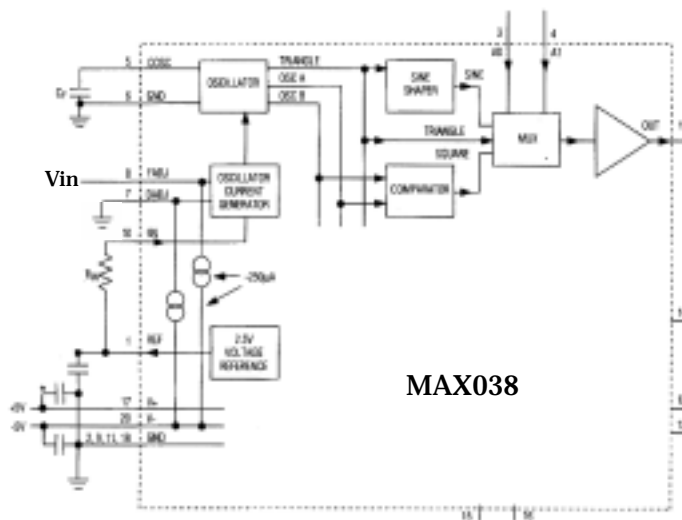


図 15 MAX038 による VCO 基本回路

5-2. MAX038 による PLL

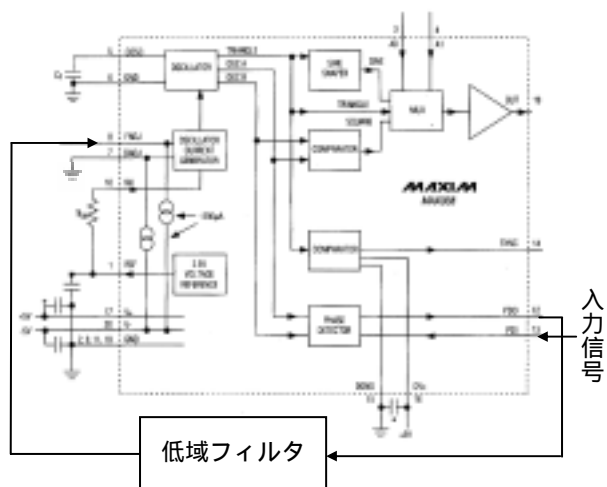


図 16 MAX038 による PLL 回路