



## 第7章 二つの周波数から 和と差の周波数を得る

# ミキサの動作原理と 実デバイスの特性

長澤 総  
Satoshi Nagasawa

ミキサ(mixer)は、日本語では混合回路、あるいは周波数変換回路などと呼ばれ、第1検波という呼びかたもありました。ミキサ、すなわち混合とはいっても、ただ信号を混ぜれば良いというものでもないでしょうが、通信の黎明期の真空管の時代では、そのような呼称で良かったのかもしれない。

ミキサの動作は、普通、二つの交流信号を入力し、それらの和もしくは差の周波数をもつ信号を出力します。

ミキサ回路としては、局部発振と周波数変換を一つのバイポーラ・トランジスタで行うもの、また高い1 dB利得圧縮レベルをもち、 $IP_3$ の高い耐ジャミング性を考慮した軍用のものなど、用途によって多くの種類があり、それぞれ興味深い技術的な内容をもっています。

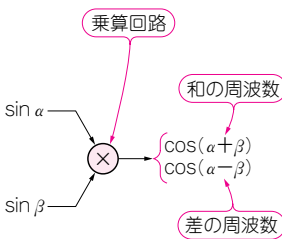
また、ミキサを評価する基準は、基本となる周波数変換の特性以外に、ノイズ・フィギュア、 $IP_3$ 、1 dB利得圧縮レベルなど、種々あります。ここでは、ミキサの動作のもっとも基本的な部分である周波数変換のよりどころとして、三角関数の性質の一部分について触れます。そして、数多くある回路のうちのいくつかを取り上げ、その動作を確認してみます。

### ミキサのふるまい

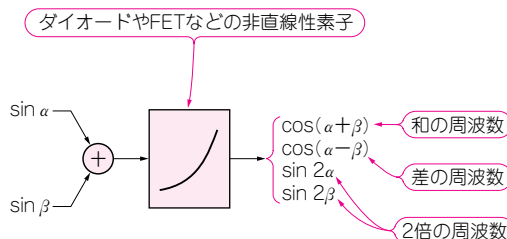
● 基本動作…二つの周波数から和と差の周波数を得る

▶ 乗算を利用する

以下に挙げる積和の公式がそれです。



(a) 三角関数の乗算を利用する



(b) ひずみを利用する

図1  
ミキサを通すと和や差の周波数が生成される

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \{-\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)\} \cdots (1)$$

ここで、 $\alpha$ を $2\pi f_1$ 、 $\beta$ を $2\pi f_2$ としてみると、各項に $f_1 + f_2$ 、 $f_1 - f_2$ として、和と差の周波数が発生することがわかります。

これを式にすると次のようになります。式(1)の角度に周波数を導入すると、 $\alpha \rightarrow 2\pi f_1$ 、 $\beta \rightarrow 2\pi f_2$ となりますから、

$$\begin{aligned} & \sin(2\pi f_1) \sin(2\pi f_2) \\ &= \frac{1}{2} \{-\cos(\underbrace{2\pi f_1 + 2\pi f_2}_{\text{和の周波数}}) \\ & \quad + \cos(\underbrace{2\pi f_1 - 2\pi f_2}_{\text{差の周波数}})\} \cdots \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

つまり式(2)のように、入力二つの信号の積を発生すれば周波数の変換ができます [図1(a)]。この動作を忠実に回路の一つがよく知られたギルバート・セルです。この回路については後述します。

▶ ひずみを利用する

回路の入力信号に対して、出力信号にはひずみが含まれることはよく知られています。この出力信号の成分は、一般に下記の式で表されます。

$$y = a_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \cdots + b_nx^n \cdots \cdots (3)$$

y: 出力

x: 入力

ここで、出力に入力xの2乗の項が含まれていることがわかります。

xに $\sin \alpha + \sin \beta$ を代入し、この2乗の項を計算す

ると以下ようになります。

$$\begin{aligned}
 x^2 &= (\sin \alpha + \sin \beta)^2 \\
 &= \sin^2 \alpha + \frac{2 \sin \alpha \sin \beta}{\text{積和の式}} + \sin^2 \beta \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

この式の2項目は、前出と同じ二つの信号の積であり、和と差の周波数の成分を含みます [図1(b)]。

この2乗の項を積極的に利用してミキサとして動作させる場合があります。ダイオードやFETなどの素子自体の特性に含まれる非直線性を利用したり、これらの素子でスイッチング動作をする場合がそうです。後ほど説明するダイオードを使ったDBMがその一例です。

ただし、この2乗の項の場合は $f_1$ の2倍、 $f_2$ の2倍の周波数成分も主な成分として出力に含まれます。

● 和か差の周波数だけを取り出す方法

さて、これまでに取り上げた例では、ミキサの出力には和と差の周波数のどちらも含まれていました。さらに式(3)の場合には、和と差の周波数以外にも高調波およびそれらとの和、差、その他の多くの周波数の成分を含みます。

ところが、ミキサを使うときは一般に和もしくは差の周波数のどちらかしか必要としません。したがって、フィルタなどの外部回路で、希望の周波数成分だけを

イメージ・リジェクト・ミキサの回路構成

主な出力が和だけ、もしくは差だけの周波数の成分となるイメージ・リジェクト・ミキサの回路構成例の一つを図Aに示します。

この回路で必要となる、位相差が $\pi/2$ の二つの局部発振回路の信号を発生するにはいくつかの方法がありますので、それらを図Bに挙げておきます。

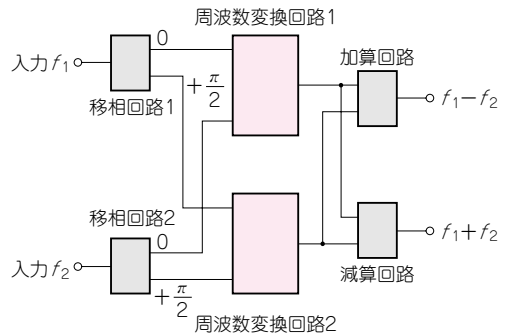
図B(a)は、抵抗とコンデンサで $+\pi/4$ と $-\pi/4$ の信号を発生させ、それらの間の位相差が $\pi/2$ となることを利用する方法です。周波数の変化範囲が比較的狭帯域の場合に使います。この回路は振幅変化が保存される必要がある場合に使います。90°ハイブリッドでも実現できます。

さらに、周波数範囲がオクターブに及ぶなどの広帯域の場合は、CRの素子数が多くなりますがポリフェイズ・シフト・ネットワーク(PPSN; Poly-Phase Shift Network)が使われます。これらも振幅変化が保存されます。

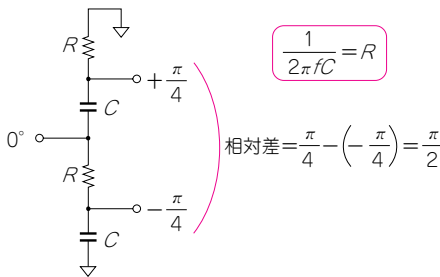
図B(b)は、必要な局部発振周波数の4倍の周波数を4分周し、それらから $\pi/2$ の位相差となる信号を合成する方法です。この回路は、局部発振な

どの振幅変化が保存されなくても支障がない回路に使います。

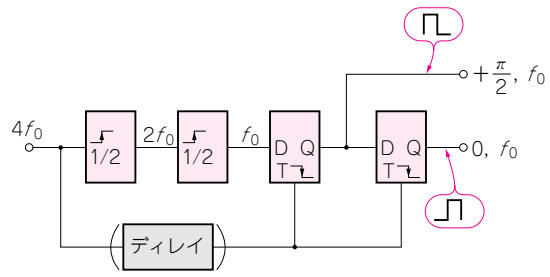
また、周波数がHF帯などのように比較的低い場合は、必要な局部発振周波数の2倍の周波数を2分周して、4分周より簡易な方法で $\pi/2$ の位相差の信号を得ることが可能です。これはロジック回路のディレイが、 $\pi/2$ に相当する時間より十分に短い場合に可能です。



図A イメージ・リジェクト・ミキサの構成例



(a) CRの位相差を利用する方法



(b) 分周回路を利用する方法

図B 位相差 $\pi/2$ の信号を発生させる方法の例