

# 集積回路設計特論(後半)

テーマ アナログ機能回路  
デジタル信号処理回路

テキスト <http://www.awcc.uec.ac.jp/yamaolab>  
> 授業の連絡 > 集積回路工学  
user: download  
password: gettxtic

参考文献 モバイル通信の無線回路技術  
(電子情報通信学会編)

## <教官紹介>

---

担当教官 山尾 泰(やまお やすし)

所属 **AWCC**(先端ワイヤレスコミュニケーション  
研究センター) 教授

着任日 2005年12月1日

専門 移動通信システム、無線回路、無線信号伝送

居室 東10号館-313

メールアドレス yamao@awcc.uec.ac.jp

研究室 Web <http://www.awcc.uec.ac.jp/yamaolab/>

電話 0424-43-5870

# 集積回路工学(後半)の内容

1. ミクサと無線信号
2. 変調器
3. 受信機
4. RFスイッチとMEMS
5. デジタル信号処理回路
6. FPGA, その他

# ミクサと無線信号

ミクサの原理

ミクサへの要求条件

代表的な回路構成

# ミクサとは

- ミクサは2つの信号の掛け算(乗算)結果を得るためのものである

信号が正弦波の場合

$$x(t) = \cos(2\pi f_1 t) \quad y(t) = \cos(2\pi f_2 t)$$

$$\begin{aligned} x(t)y(t) &= \cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \underbrace{\cos(2\pi(f_1 + f_2)t)}_{\text{和周波数}} - \underbrace{\cos(2\pi(f_1 - f_2)t)}_{\text{差周波数}} \right\} \end{aligned}$$

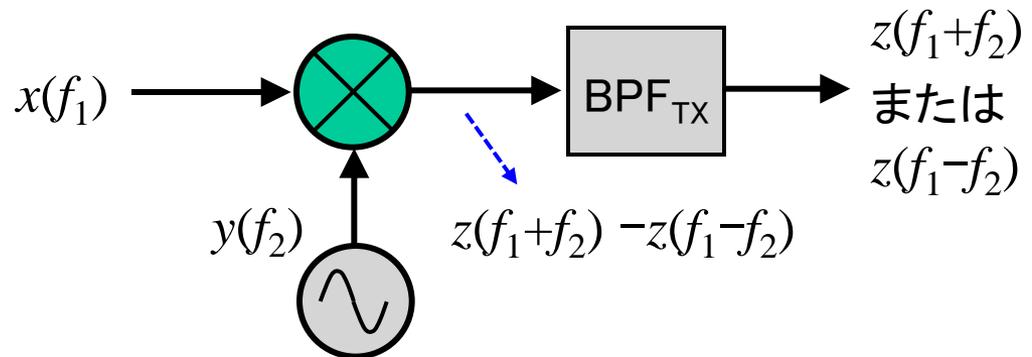
時間領域での信号の積は、周波数領域では畳込みになる  
結果の2つの成分のうちどちらを使うかは用途に依存する

例) 変調、周波数変換、検波

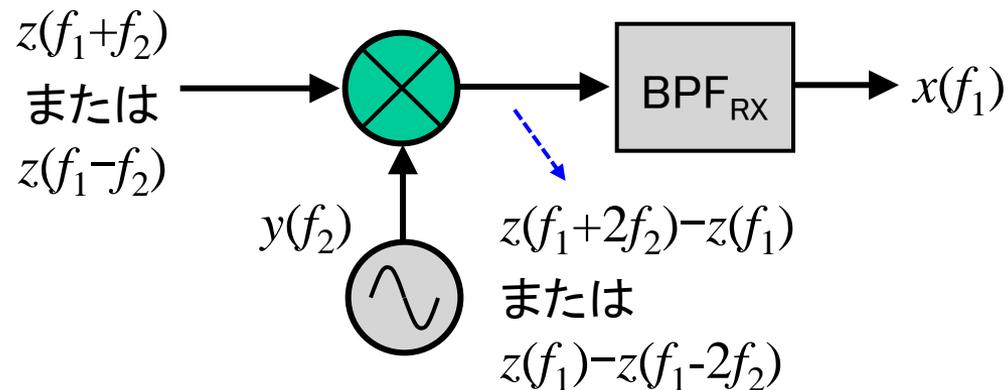
# ミキサの利用箇所(1)

- ミキサは信号周波数を変換する用途に使われる

## アップコンバータ



## ダウンコンバータ



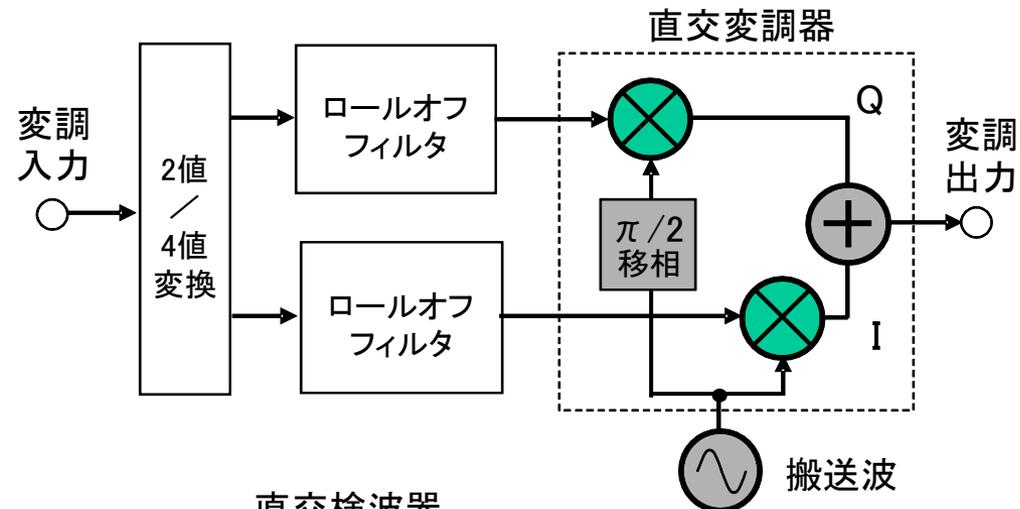
$f_1$ はベースバンドまたは中間周波数  
 $f_2$ は局部発振周波数

# ミクサの利用箇所(2)

- ミクサは信号を変調・検波する用途にも使われる

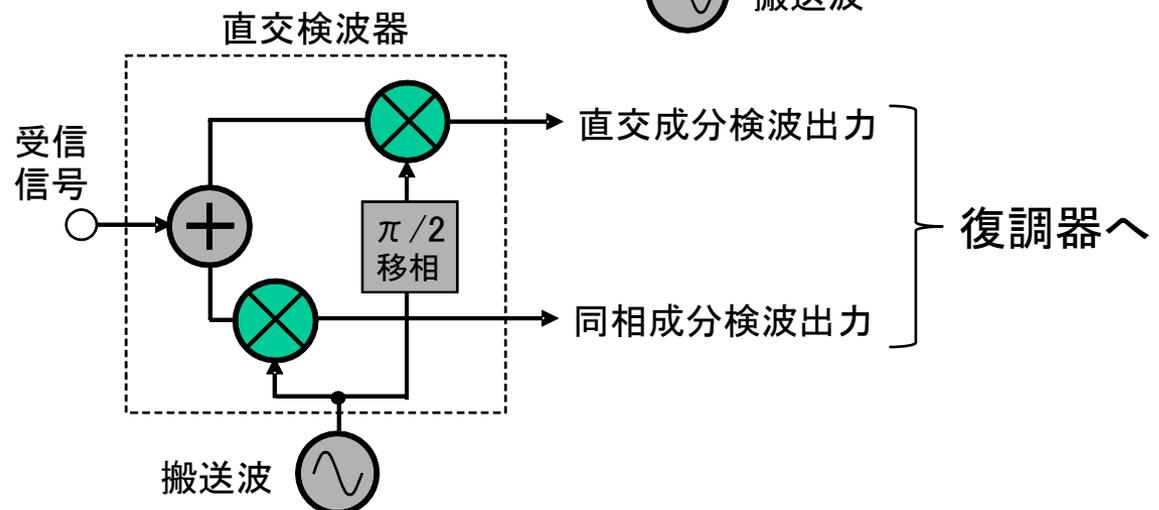
## 直交変調器

I/Qベースバンド信号と搬送波との掛け算に用いられる



## 直交検波器

受信した変調波と搬送波との掛け算に用いられる



# ミクサの原理(1)

- 2つの信号の掛け算(乗算)結果を得る方法はいくつかある

デバイスの二乗特性を用いる

$$\begin{aligned}
 (x(t) + y(t))^2 &= \cos(2\pi f_1 t)^2 + \cos(2\pi f_2 t)^2 \\
 &\quad + \underline{2 \cos(2\pi f_1 t) \cdot \cos(2\pi f_2 t)} \\
 &= 1 + \frac{1}{2} \cos 2\pi(2f_1)t + \frac{1}{2} \cos 2\pi(2f_2)t \\
 &\quad + \boxed{\cos(2\pi(f_2 + f_1)t) + \cos(2\pi(f_2 - f_1)t)}
 \end{aligned}$$

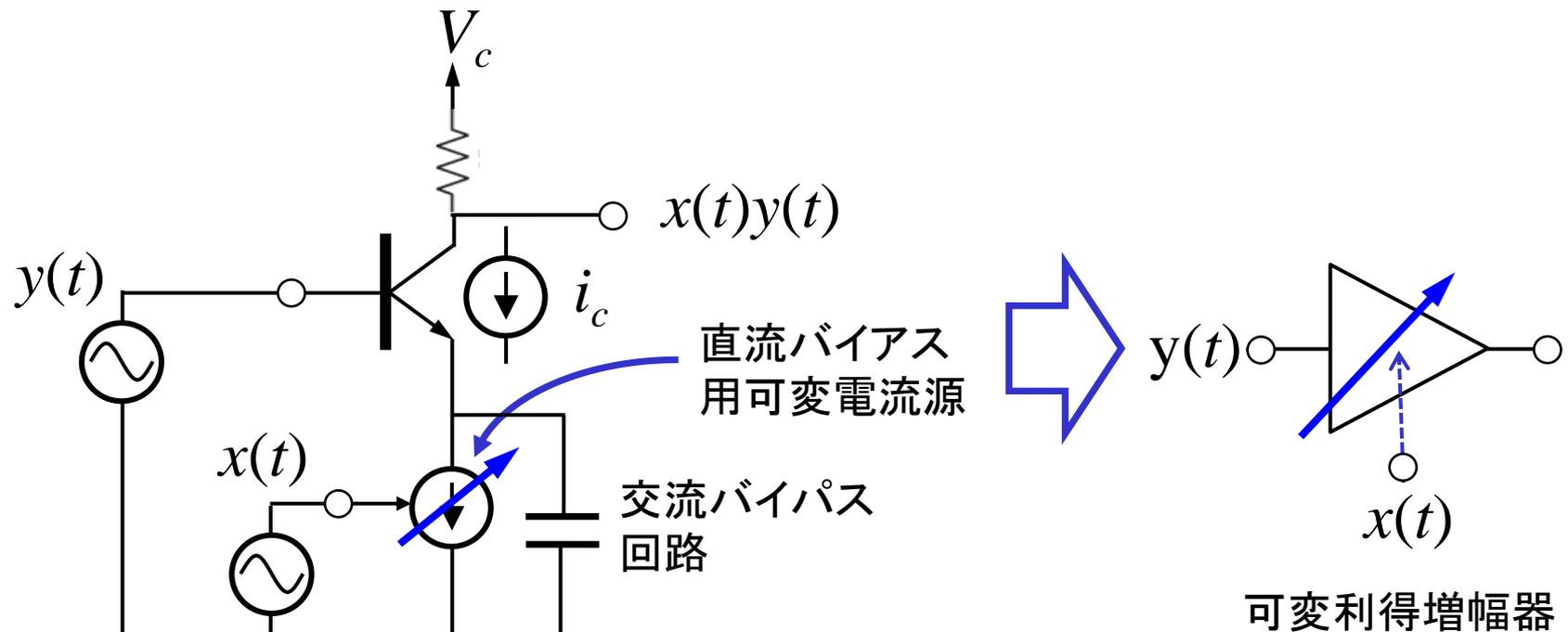
乗算結果に一致

例) FETミクサ(理想FETでは $V_{gs}$ 対 $I_{ds}$ 特性が二乗特性)

注意点)  $f_1 \sim f_2$ の場合,  $2f_1, 2f_2$ 成分との分離が困難になる

# ミクサの原理(2)

デバイスの可変利得特性を用いる



例) ギルバート乗算器 (バイポーラトランジスタの相互コンダクタンスがバイアス電流に比例することを利用)

# ミクサの原理(2)

- 1つの信号が搬送波のような一定振幅の場合, 高周波スイッチでミクサを実現することが可能

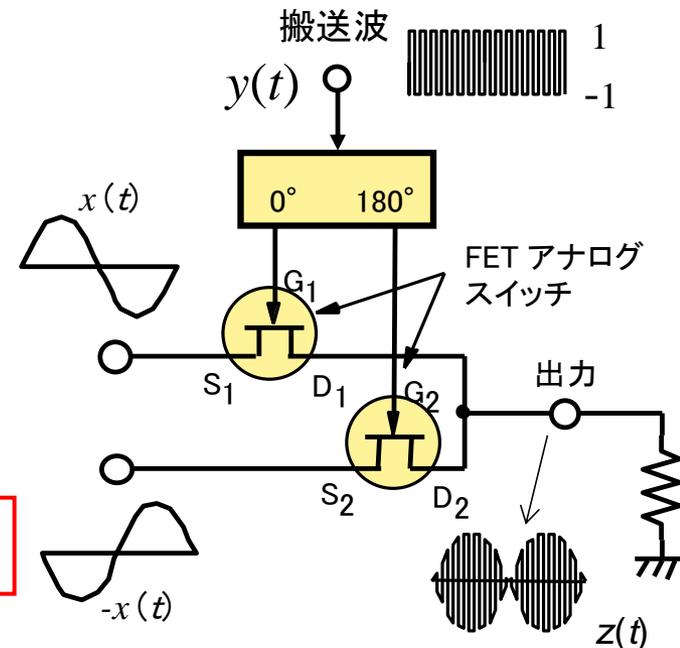
正負符号の信号 ( $x(t)$ ,  $-x(t)$ ) を用意し, これらを  $y(t)$  の符号でスイッチング

$$y(t) = \text{sgn}[\cos(2\pi f_1 t)]$$

$$z(t) = \begin{cases} x(t) & (y(t) > 0) \\ -x(t) & (y(t) < 0) \end{cases}$$

$$= x(t) \sum_{i=1}^{\infty} K_i \cos\{2\pi(2i-1)f_1 t\}$$

$z(t)$  から基本波 ( $i=1$ ) 成分をLPFで取り出す



例) ダイオードミクサ, リング変調器, ダブルゲートFETミクサ

# ミクサへの要求条件

## 線形性(送信、受信共通)

入出力の変換利得  $G$  が入力レベルによらず一定であること

## 不要成分の発生

出力において2信号の積成分以外の成分が小さいこと

## 雑音指数

ミクサで発生する熱雑音が少ないこと

## 消費電力

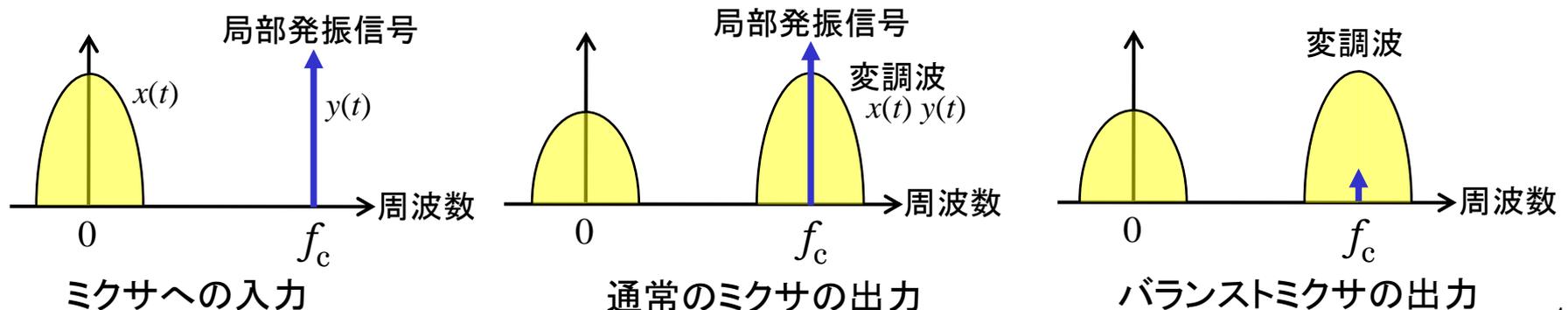
# バランスストミクサ

- バランスストミクサは局部発振信号のミクサ出力への漏えいを抑圧する機能を有する

高周波ではデバイスや回路素子間の浮遊容量によって局部発振信号が漏えいするが、これを打ち消すために、局部発振信号を平衡信号としてミクシングを行う。

これによって、ミクシング出力に重畳する不要な局部発振信号による影響を回避できる。

特に、ベースバンドから搬送波周波数帯へ**直接周波数変換**を行う変調器ではこの機能が必須である。



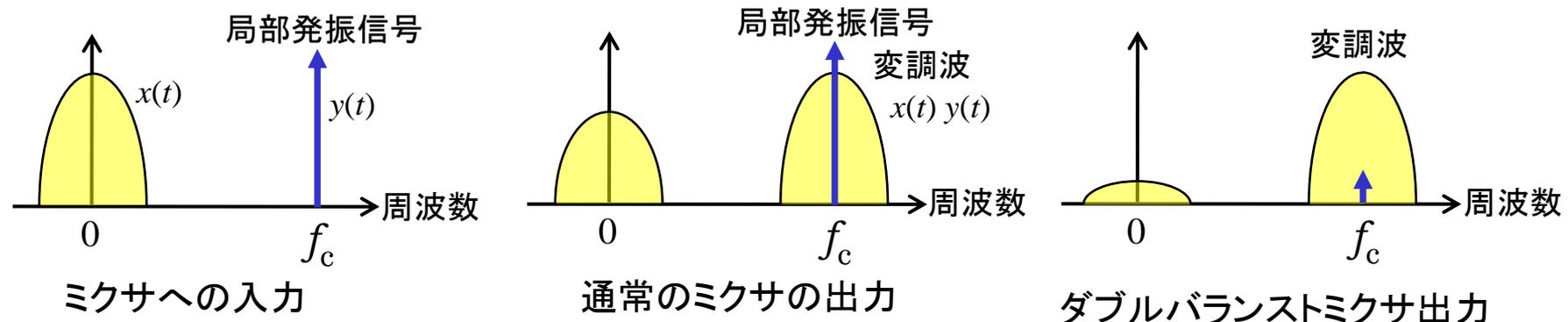
# ダブルバランスストミクサ (DBM)

- ダブルバランスストミクサ (DBM) は局部発振信号に加えて、入力信号のミクサ出力への漏えいを抑圧する機能を有する

入力信号に対しても平衡信号を用いることでミキシング出力への漏えいを抑圧することができる

これによって、ミクシング出力に重畳した不要な入力信号による影響を回避できる。

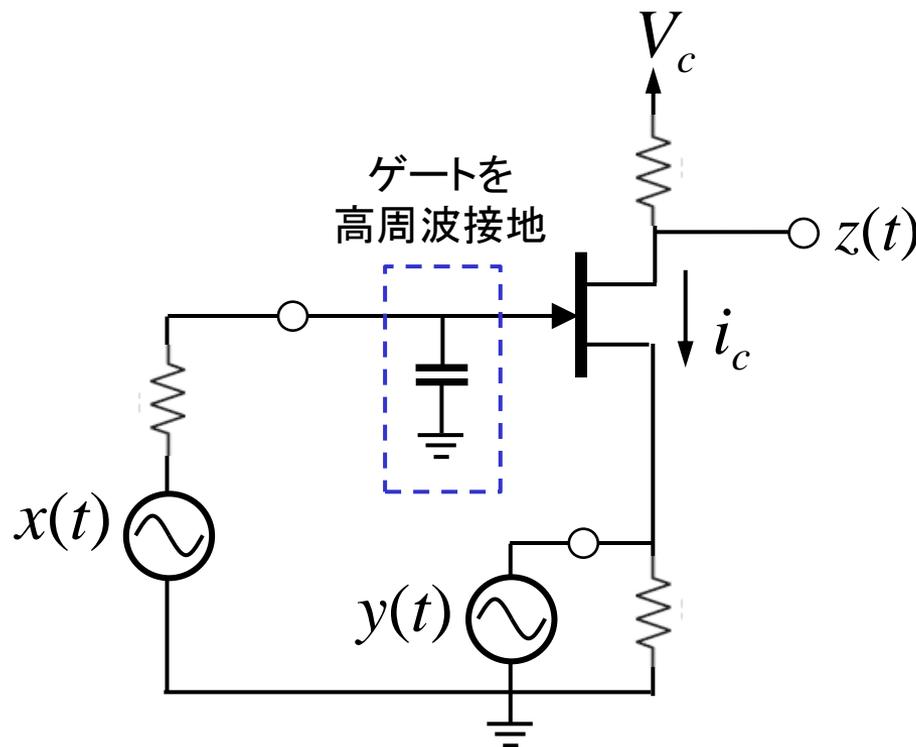
ミクシング出力に重畳する不要な入力信号成分は、ミクサデバイス等の動作点を乱して混変調ひずみが発生させることがあるので、無いことが望ましい。



# ミクサの代表的な回路構成(1)

## シングルFETミクサ

$x(t)$ が変調信号のようにベースバンド帯の場合に、FETのゲートとソースを入力ポートとした例を示す



$x(t)$ ; 低周波信号

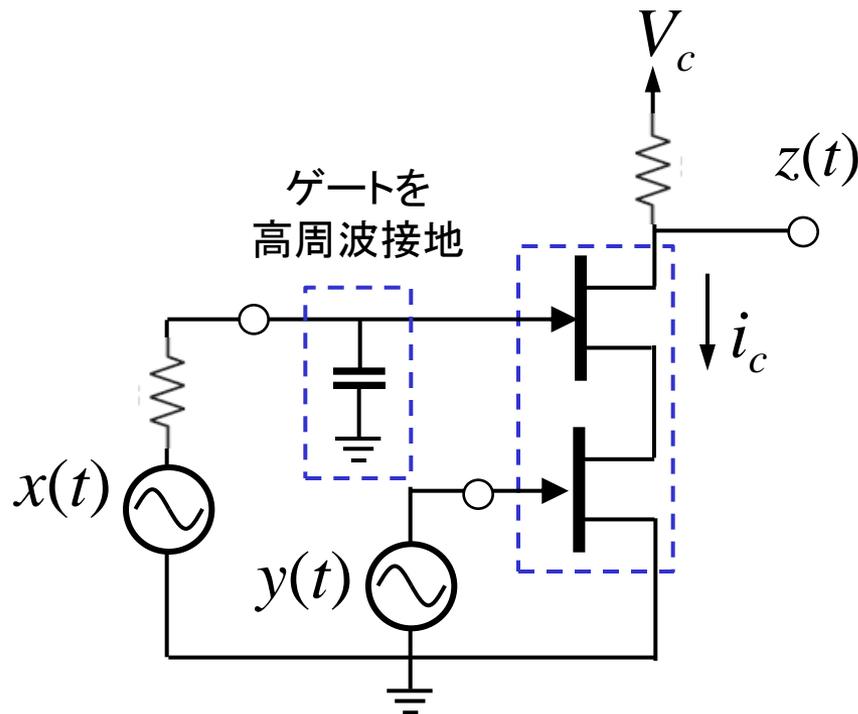
$y(t)$ ; 局部発振信号

ミクサ出力には $x(t)y(t)$ 以外の成分が多数含まれるので、BPFによって必要な成分を取り出す必要があることが多い。

# ミクサの代表的な回路構成(2)

## デュアルゲート FETミクサ

デュアルゲートFETを用いると、2つの入力ポート  
が選択できる



$x(t)$ ; 低周波信号

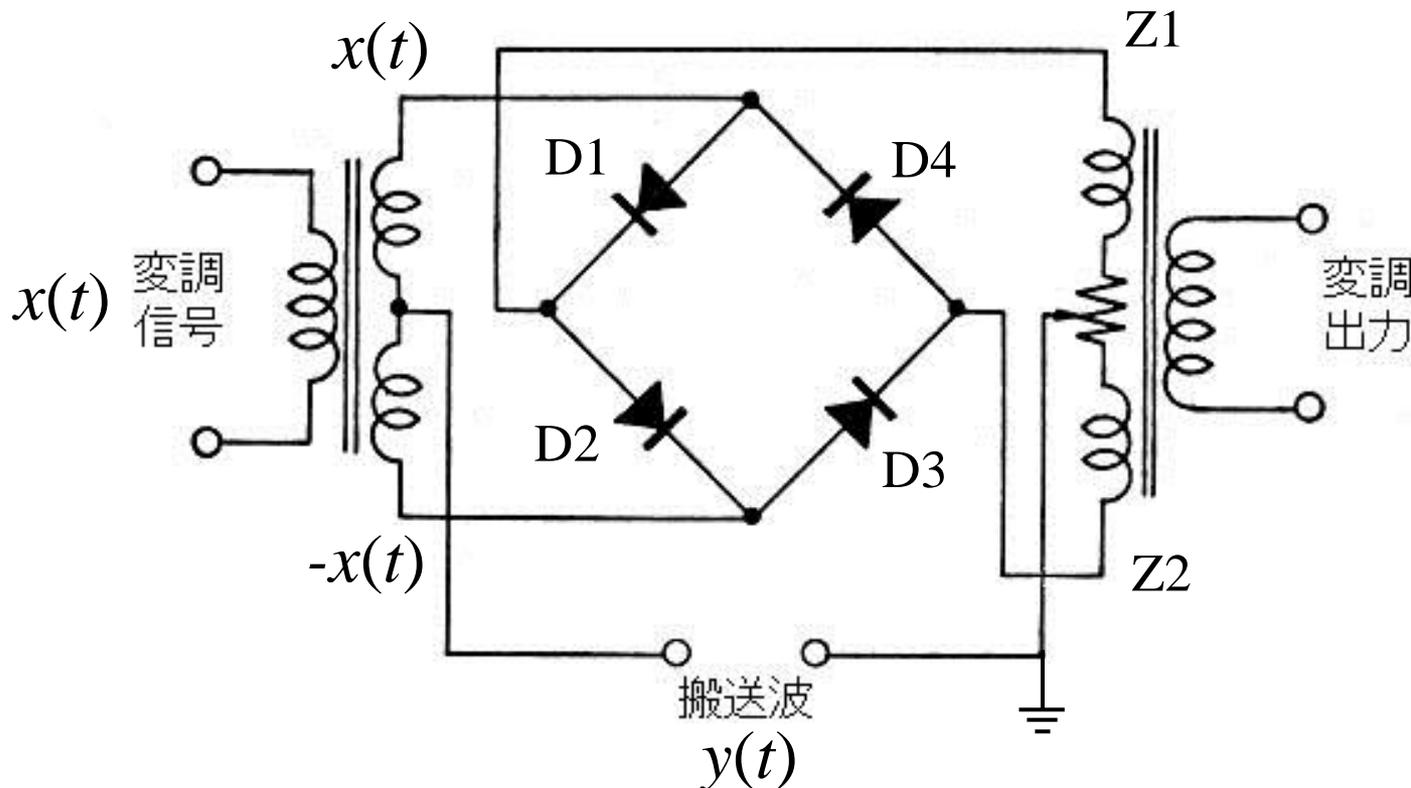
$y(t)$ ; 局部発振信号

ミクサ出力には $x(t)y(t)$ 以外の  
成分が多数含まれるので、BPF  
によって必要な成分を取り出す

# DBMの代表的な回路構成(1)

## リング変調器

ショットキーバリアダイオード(SBD)など高周波スイッチングが可能なダイオードスイッチを平衡搬送波で駆動し、平衡変調信号とのミクシングを行うDBMの古典的回路  
トランスを用いるため、低周波信号を扱う場合の集積化は困難



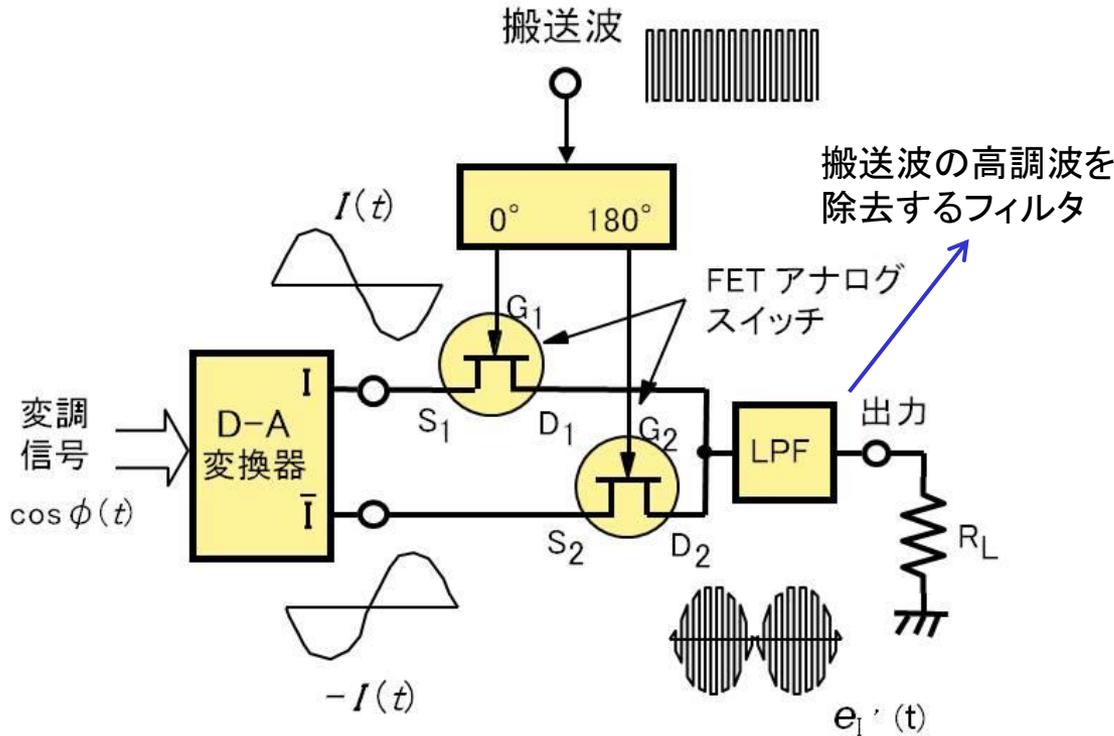
$x(t) > 0$  のとき  
D1, D2 が導通  
Z1 の振幅が大  
→ Z は正相

$x(t) < 0$  のとき  
D4, D3 が導通  
Z2 の振幅が大  
→ Z は逆相

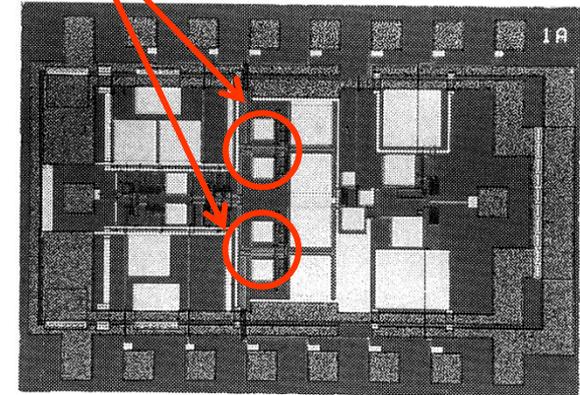
# DBMの代表的な回路構成(2)

## FETスイッチ型 DBM

SBDの替りにFETスイッチペアを平衡搬送波で駆動  
 平衡変調信号は予めベースバンドで高精度に発生  
 コイルを用いないのでIC化に適する



FETスイッチ型DBM



1.5mm

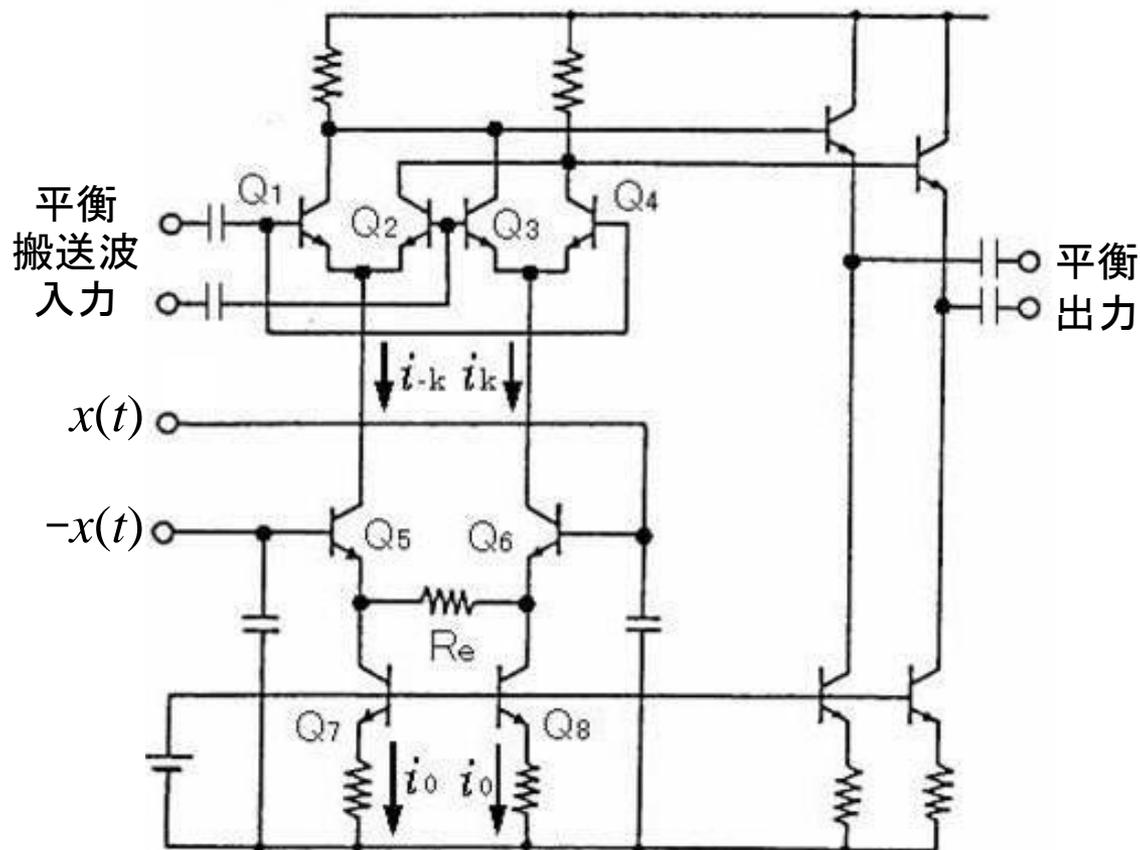
2mm

GaAs ICによる800MHz帯  
 高精度直交変調器  
 (山尾他, 1990)

# DBMの代表的な回路構成(3)

## ギルバート乗算器

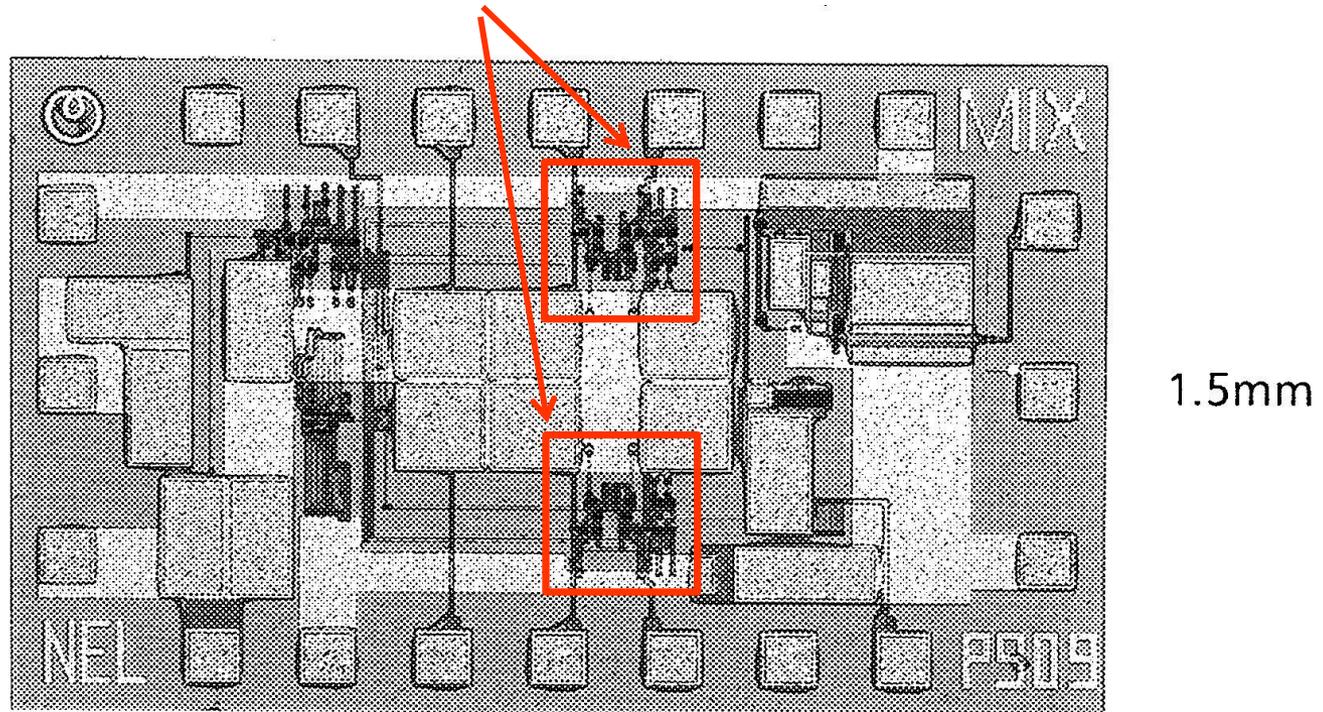
上部の2組(Q1とQ2, Q3とQ4)の差動増幅器ペアが搬送波を平衡信号として増幅するが, それぞれのコレクタ出力は互いに逆相の信号と加算されているので, これら2つの差動増幅器の利得が等しい場合には, 出力は無信号となり, 搬送波はキャンセルされる。



差動増幅器の利得はトランジスタの動作点における相互コンダクタンスに依存し, バイポーラトランジスタの相互コンダクタンスはバイアス電流に比例する. 下部の差動増幅器(Q5とQ6)において, 差電流( $i_k - i_{-k}$ )が入力信号 $x(t)$ に比例したバイアス電流ペア $i_k, i_{-k}$ を発生すると,  $i_k > i_{-k}$ の場合には, Q3とQ4による差動増幅器の利得は上がり, かつQ1とQ2による差動増幅器の利得は下がる. このためQ3とQ4による差動増幅出力が優勢となって $x(t)$ に比例した平衡搬送波が出力される. このようにして乗算結果が得られる。

# ギルバート乗算器の実現例

Gilbert Multiplier



2.5mm

Si Bipolar ICによる200MHz帯  
高精度直交変調器  
(山尾他, 1989)