

2005年度秋期実用マイクロ波講座

無線機設計におけるRF技術のすべて

2005年 9月～12月

松下電器産業(株) 上野 伴希(工学博士)

研修アジェンダ

1. システム設計概要
2. 低雑音アンプ(LNA)その1
3. 低雑音アンプ(LNA)その2
4. ミクサ
5. ローカル発振器
6. 変復調その1
7. 変復調その2
8. パワーアンプ(PA)
9. その他の回路
10. ダイレクトコンバージョンRX / TX

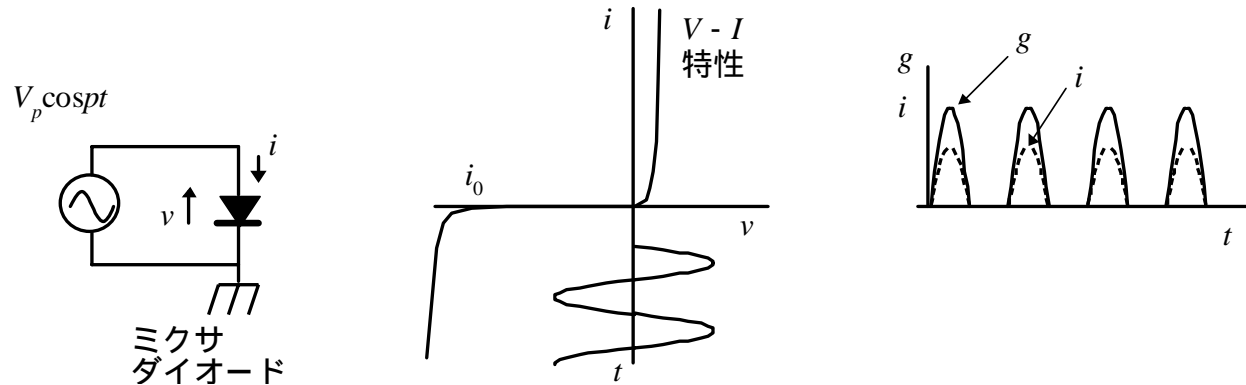
4. ミクサ

2005年 10月12日(水)

1. ダイオードの動作
2. ペアダイオード
3. ミクサ回路
4. インピーダンス整合
5. ギルバードセルミクサ
6. ミクシングプロダクト
7. アップコンバータ
8. 非線形2次歪み
9. スーパヘテロダイン受信機のNF

ダイオードの動作

ダイオードコンダクタンス



$$i = i_0(e^{\alpha v} - 1) \quad v = V_p \cos pt$$

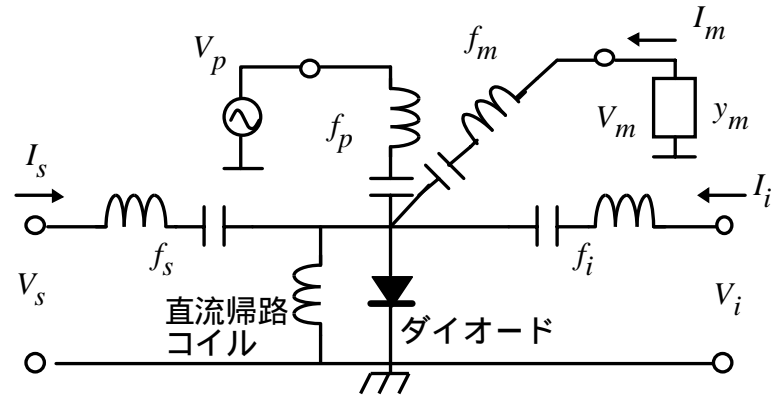
$$g = \frac{di}{dv} = g_0 + 2g_p \cos pt + 2g_{2p} \cos 2pt + \dots$$

$$\text{ただし} \quad g_{np} = \alpha i_0 \cdot I_n(\alpha V_p) \quad \alpha = \frac{q}{nkT} \approx 39$$

I_n : 第1種の n 次変形ベッセル関数

ダイオードの動作

ミキサ動作



$$\Delta v = v_s + v_i + v_m = V_s \cos 2\pi f_s t + V_i \cos 2\pi f_i t + V_m \cos 2\pi f_m t$$

$$\Delta i = I_s \cos 2\pi f_s t + I_i \cos 2\pi f_i t + I_m \cos 2\pi f_m t$$

$$\Delta i = g \cdot \Delta v$$

$$f_s - f_p = f_i \quad f_p - f_m = f_i$$

V_s, V_i, V_m と I_s, I_i, I_m の関係が求められる

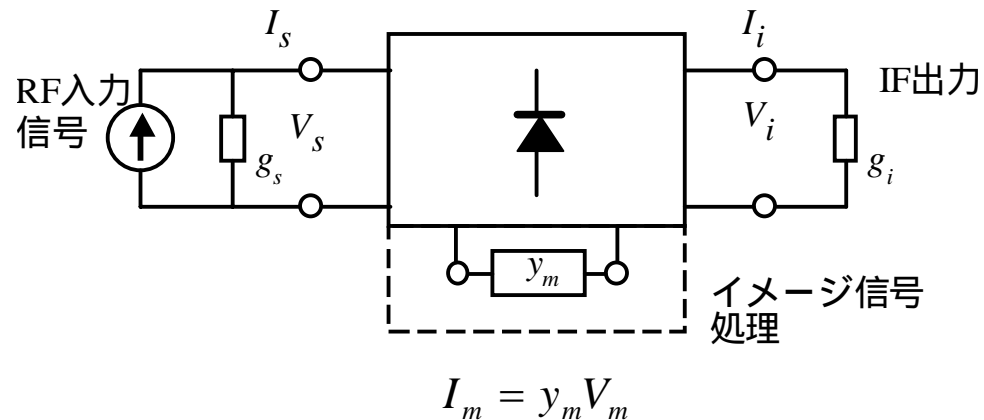
$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_i \\ I_m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 & g_p & g_{2p} \\ g_p & g_0 & g_p \\ g_{2p} & g_p & g_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_i \\ V_m^* \end{bmatrix}$$

ただし V, I はフェーザ表示

(*) は共役

ダイオードの動作

イメージ処理ミキサ動作



$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{si} \\ Y_{is} & Y_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_i \end{bmatrix}$$

ただし

$$Y_{ss} = g_0 - \frac{g_{2p}^2}{g_0 + y_m^*} \quad Y_{ii} = g_0 - \frac{g_p^2}{g_0 + y_m^*}$$

$$Y_{si} = Y_{is} = g_p - \frac{g_p g_{2p}}{g_0 + y_m^*}$$

これより変換利得, インピーダンスが求められる

ダイオードの動作

イメージ処理ミクサ特性

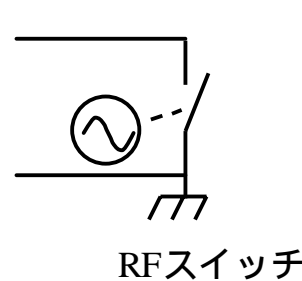
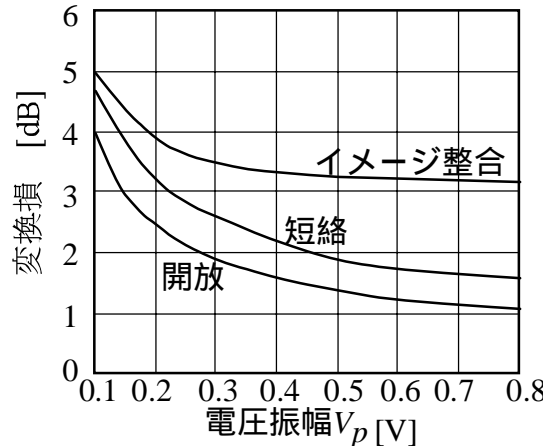
	変換損 L_c	RFコンダクタンス g_s	IFコンダクタンス g_i
イメージ 整合	$2 \frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon_2}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_2}}$	$g_0 \sqrt{(1 + \eta_2)(1 + \eta_2 - 2\eta_1^2)}$ *	$g_0 \sqrt{\frac{1 + \eta_2 - 2\eta_1^2}{1 + \eta_2}}$
イメージ 短絡	$\frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon_1}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_1}}$	$g_0 \sqrt{(1 - \eta_1^2)}$	$g_0 \sqrt{(1 - \eta_1^2)}$
イメージ 開放	$\frac{1 + \sqrt{1 - \varepsilon_3}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon_3}}$	$g_0 \sqrt{(1 - \eta_2^2)} \sqrt{\frac{(1 - \eta_2)(1 + \eta_2 - 2\eta_1^2)}{1 - \eta_1^2}}$	$g_0 \sqrt{\frac{(1 - \eta_1^2)(1 + \eta_2 - 2\eta_1^2)}{1 + \eta_2}}$

$$\varepsilon_2 = \frac{2\eta_1^2}{1 + \eta_2} \quad \varepsilon_1 = \eta_1^2 \quad \varepsilon_3 = \frac{\eta_1^2}{1 - \eta_1^2} \frac{1 - \eta_2}{1 + \eta_2}$$

* ミクサの入力コンダクタンスと異なる。

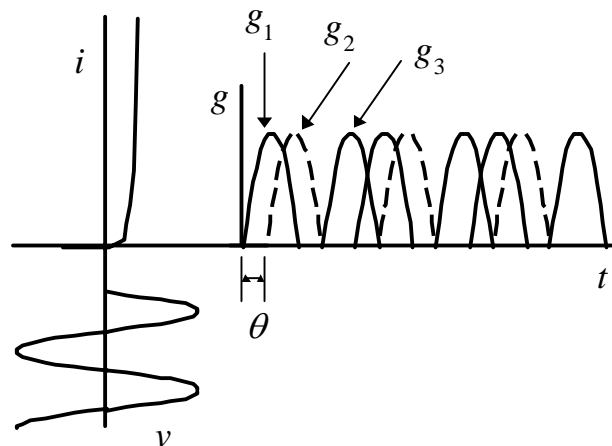
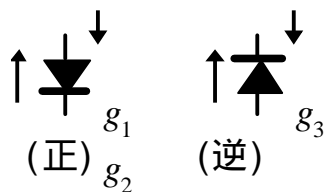
$$\eta_1 = \frac{g_p}{g_0} = \frac{I_1(\alpha V_p)}{I_0(\alpha V_p)}$$

$$\eta_2 = \frac{g_{2p}}{g_0} = \frac{I_2(\alpha V_p)}{I_0(\alpha V_p)}$$



ペアダイオード

ペアダイオードの電流位相



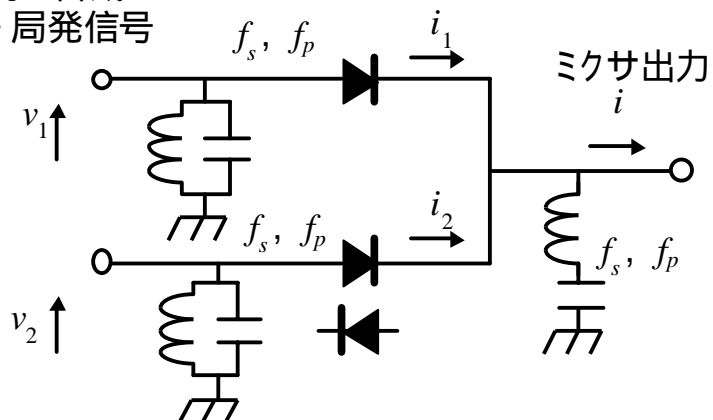
$$g_1 = g_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} g_{np} \cos npt$$

$$g_2 = g_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} g_{np} \cos n(pt - \theta)$$

$$g_3 = g_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} g_{np} \cos n(pt - \theta - \pi)$$

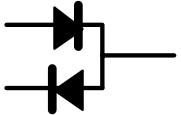
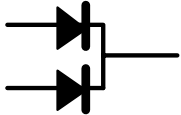
$$i = i_1 + i_2 = g_1 v_1 + g_2 v_2$$

2等分し合成した
RF+局発信号



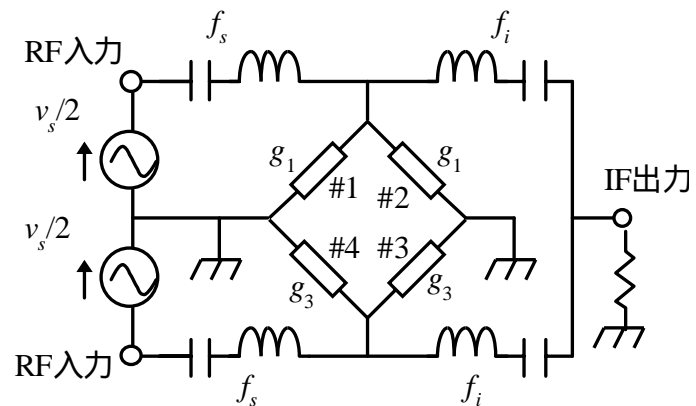
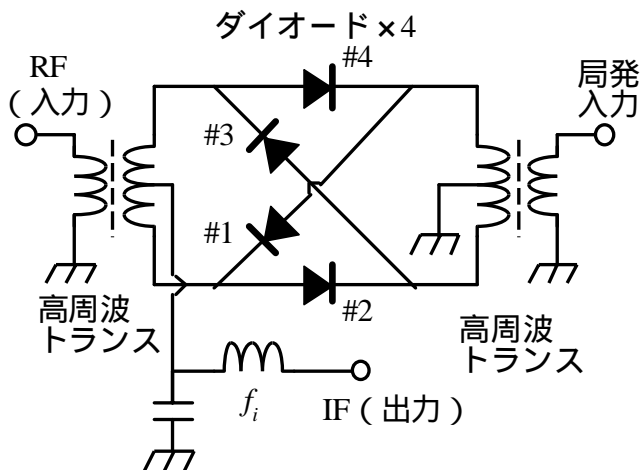
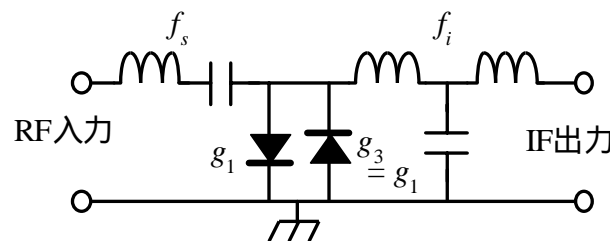
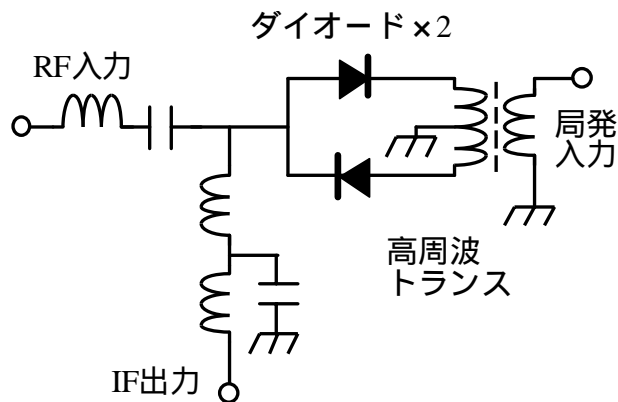
ペアダイオード

ダイオードペアと組み合わせ

局発(p) θ	R F (s) α	 逆方向	 正方向
0	0	$s, 2p \pm s, 4p \pm s, 2mp \pm s$ $p, 3p, 5p$	$s, p \pm s, 2p \pm s, np \pm s$ $p, 2p, 3p$
0	π	$p \pm s, 3p \pm s, (2m+1)p \pm s$ $p, 3p, 5p$	$p, 2p, 3p$
π	0	$s, p \pm s, 2p \pm s, np \pm s$	$s, 2p \pm s, 4p \pm s, 2mp \pm s$ $2p, 4p, 6p$
π	π	0	$p \pm s, 3p \pm s, (2m+1)p \pm s$
$\pm 90^\circ$	$\mp 90^\circ$	$s, p - s, 2p \pm s, 3p + s, 4p \pm s$ $p, 2p, 3p, 5p$	$s, p + s, 2p \pm s, 3p - s, 4p \pm s$ $p, 3p, 4p, 5p$

ミキサ回路

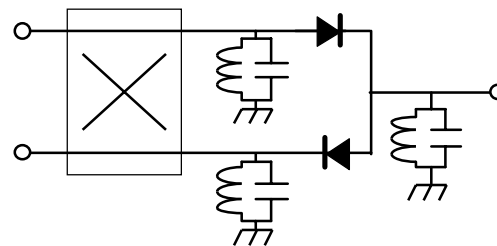
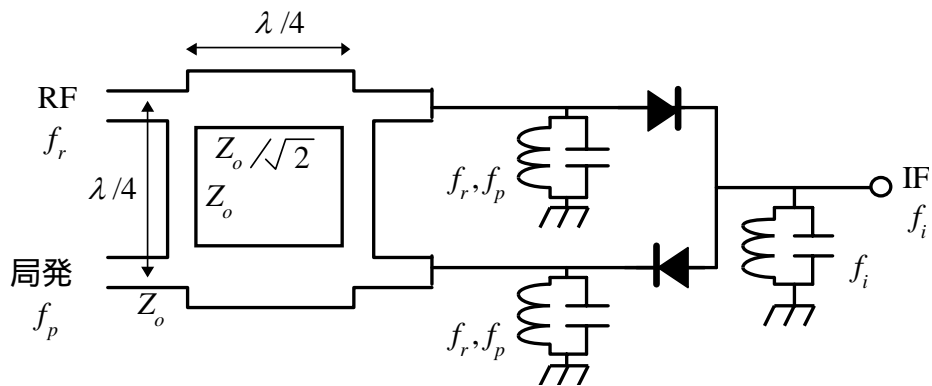
代表的なSBM, DBM回路



ミキサ回路

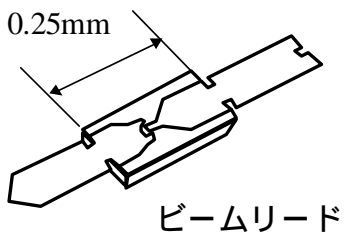
3dBハイブリッド回路

ストリップライン3dBハイブリッド

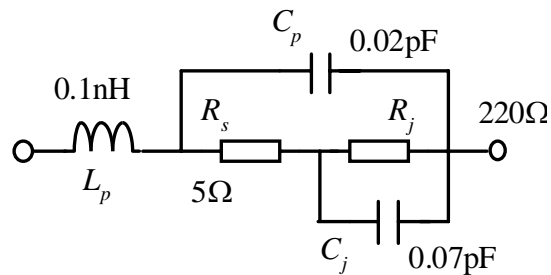


インピーダンス整合

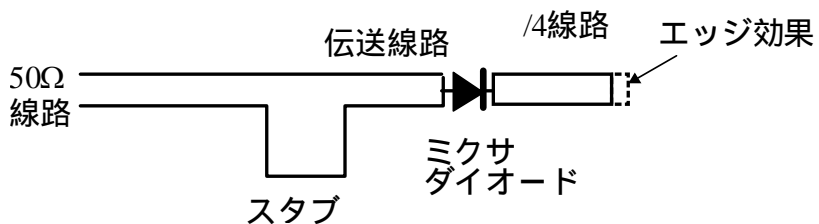
ミキサダイオードの整合



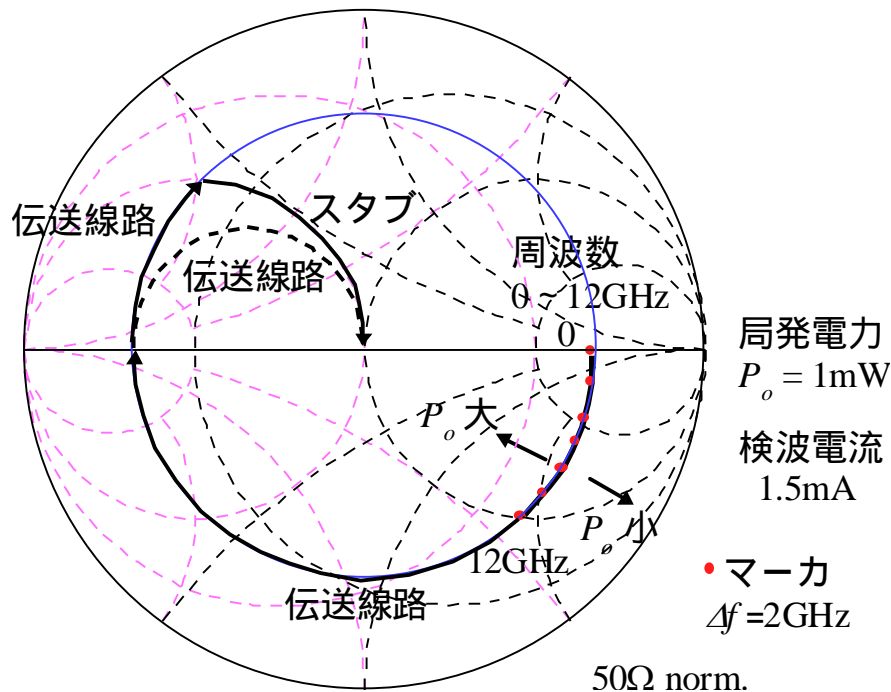
ダイオード形状



等価回路

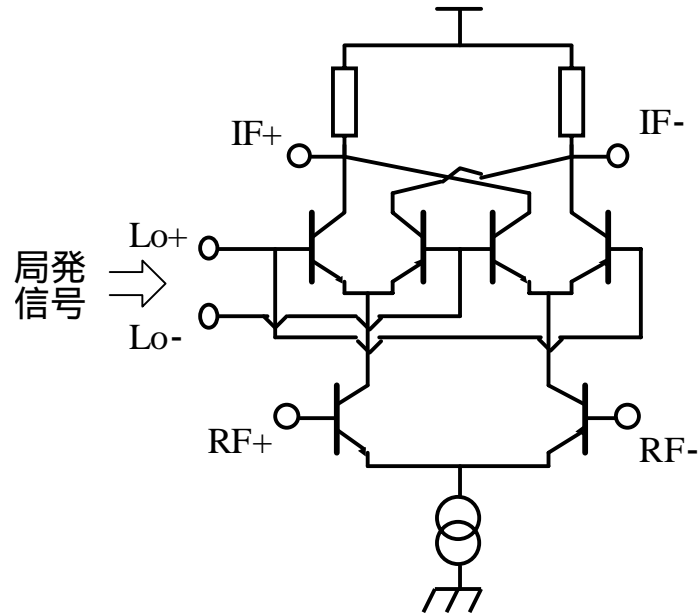


分布定数線路による整合

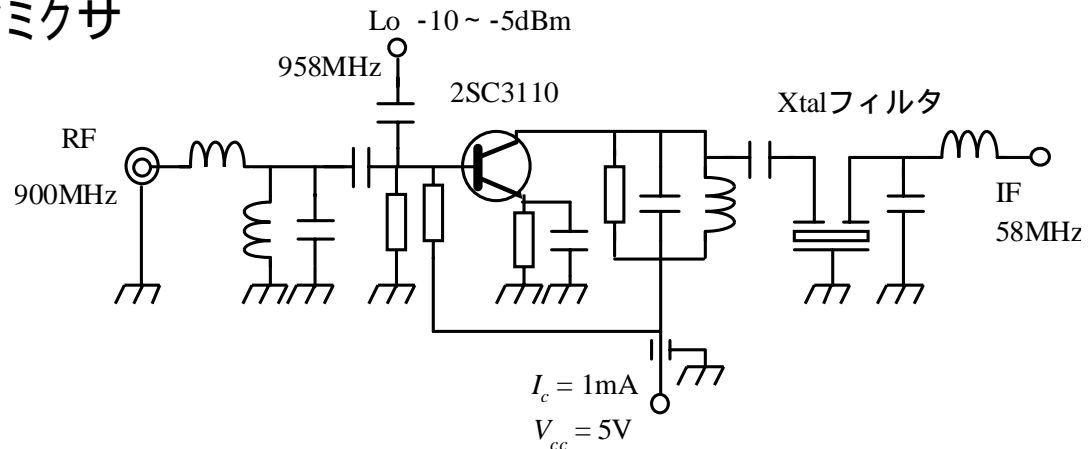


ギルバートセルミキサ

C-MOS DBM回路

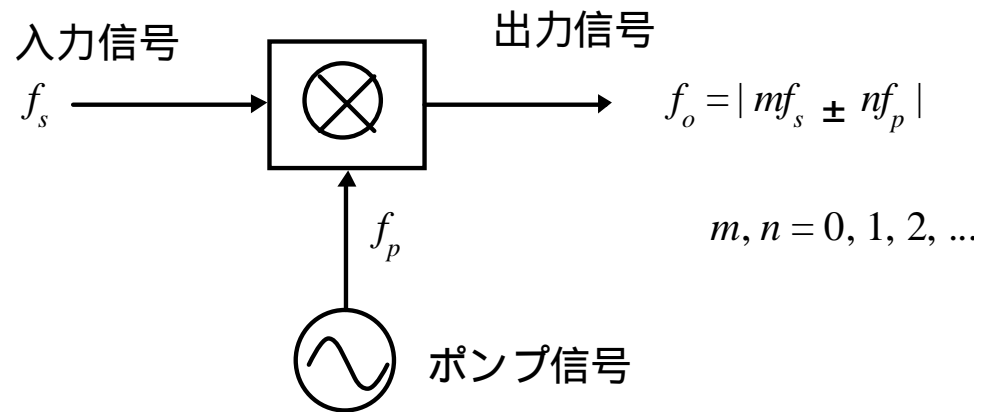


参考;トランジスタミキサ



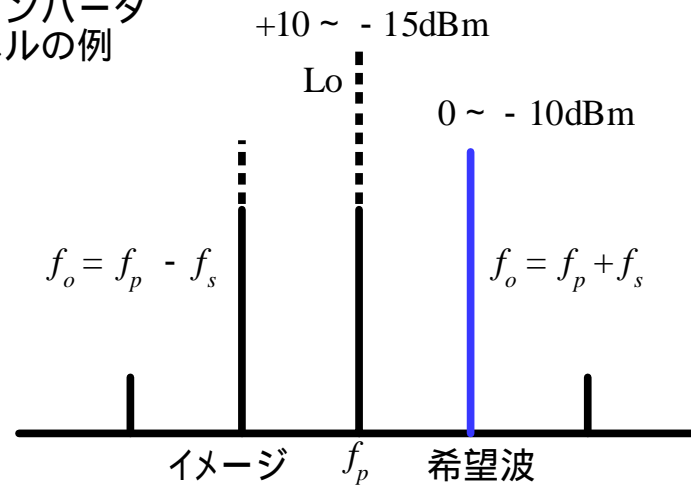
ミクシングプロダクト

不要スプリアス



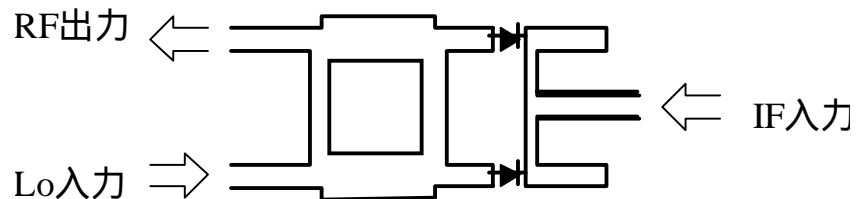
アップコンバータ

アップコンバータ
出力レベルの例





アップコンバータ

3dBハイブリッド回路



ダイオード順方向

逆方向ダイオードでは， にRFが出力される

局発(p) θ	R F (s) α	 逆方向	 正方向
0	0	$s, 2p \pm s, 4p \pm s, 2mp \pm s$ $p, 3p, 5p$	$s, p \pm s, 2p \pm s, np \pm s$ $p, 2p, 3p$
0	π	$p \pm s, 3p \pm s, (2m+1)p \pm s$ $p, 3p, 5p$	$p, 2p, 3p$
π	0	$s, p \pm s, 2p \pm s, np \pm s$	$s, 2p \pm s, 4p \pm s, 2mp \pm s$ $2p, 4p, 6p$
π	π	0	$p \pm s, 3p \pm s, (2m+1)p \pm s$
$\pm 90^\circ$	$\mp 90^\circ$	$s, p - s, 2p \pm s, 3p + s, 4p \pm s$ $p, 2p, 3p, 5p$	$s, p + s, 2p \pm s, 3p - s, 4p \pm s$ $p, 3p, 4p, 5p$

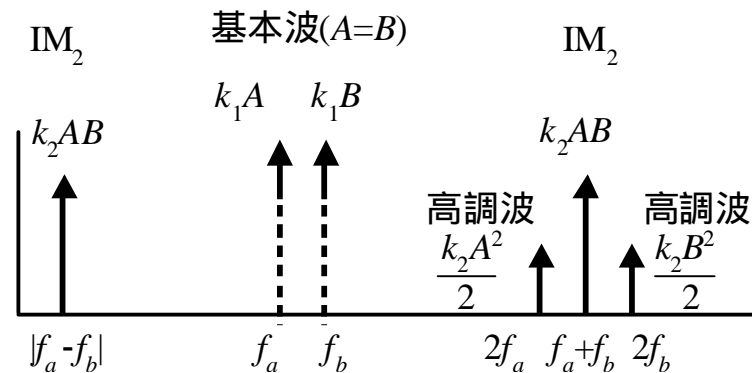
非線形2次歪み

2次歪みの発生

$$y_2 = k_2 x^2$$

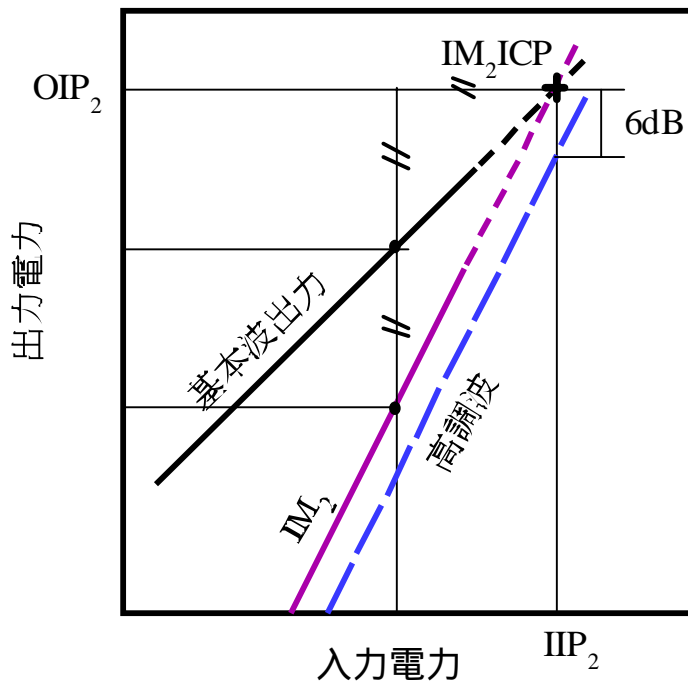
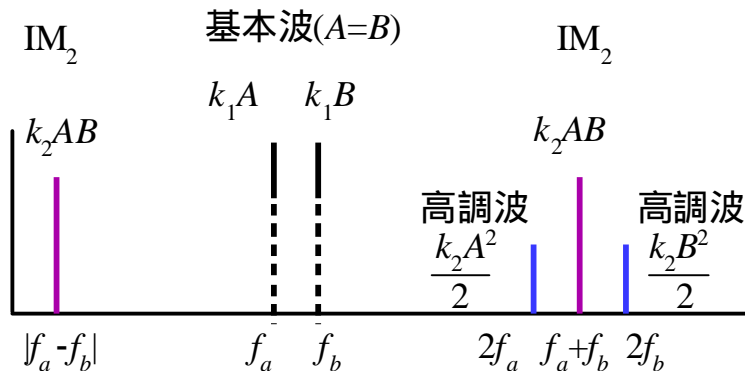
$$\text{入力 } x = A \cos \omega_a t + B \cos \omega_b t$$

$$y_2 = k_2 + k_2 \frac{A^2 \cos 2\omega_a t + B^2 \cos 2\omega_b t}{2} + k_2 AB \cos(\omega_a - \omega_b)t + k_2 AB \cos(\omega_a + \omega_b)t$$



非線形2次歪み

IM_2 ICP, IIP_2



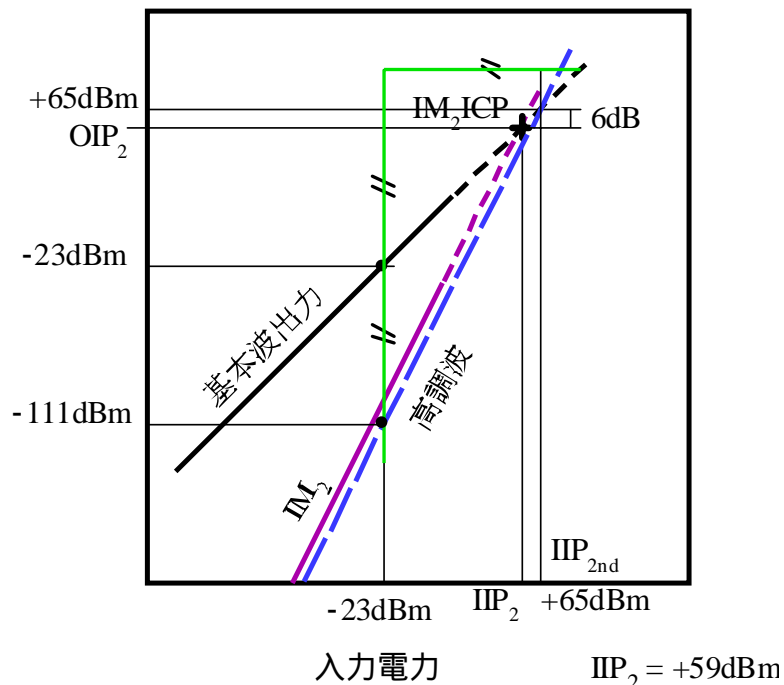
非線形2次歪み

スーパーヘテロダインミキサの1/2-IF歪み (ミキサは入出力が比例する線形回路)



$$IIP_{2nd} = -23 + (-23 - (111)) = +65[\text{dBm}]$$

出力電力 (利得1)



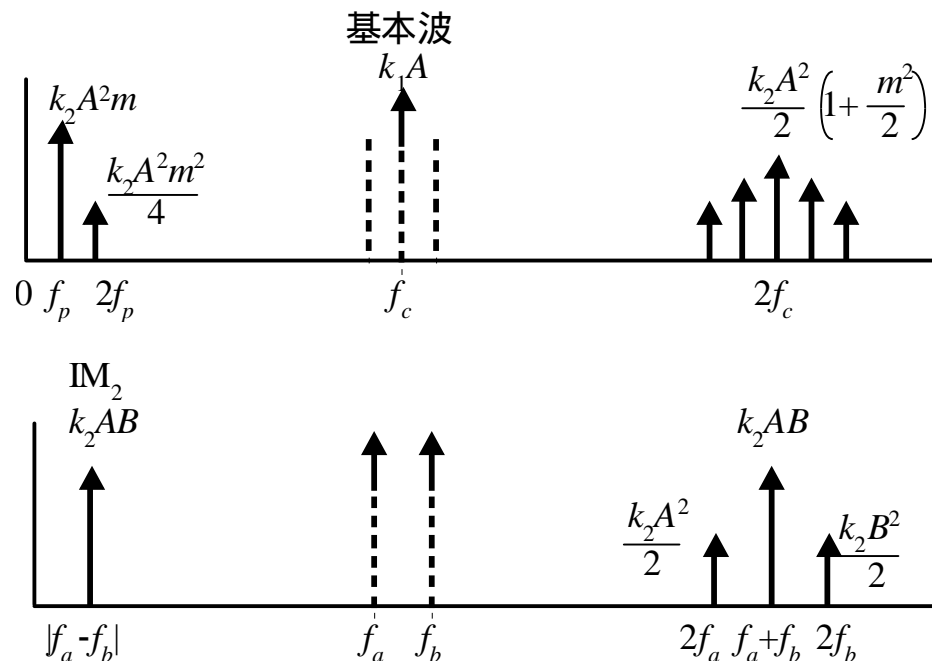
非線形2次歪み

二乗検波歪

$$y_2 = k_2 x^2$$

$$x = A(1 + m \cos \omega_p t) \cos \omega_A t$$

$$y_2 = \frac{k_2 A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} + 2m \cos \omega_p t + \frac{m^2}{2} \cos 2\omega_p t \right) + \dots$$



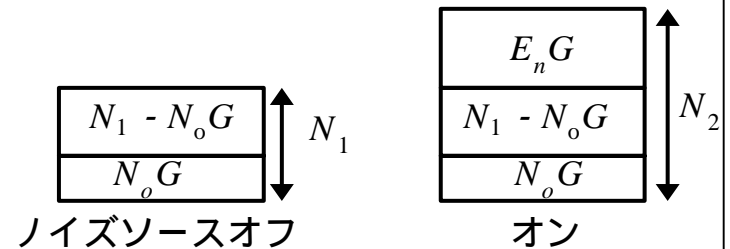
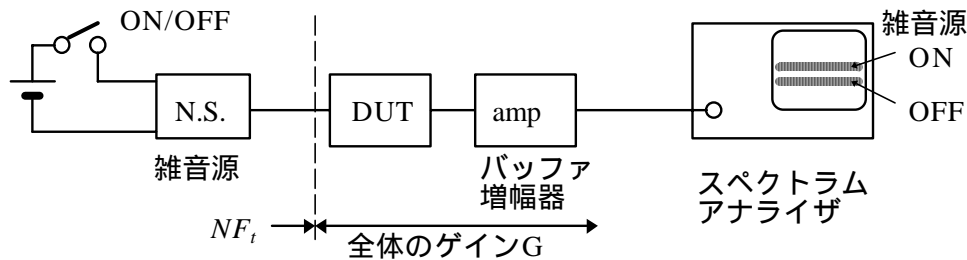
Review-NF測定

NFの測定原理

ノイズソースオフ $F = \frac{N_1}{N_o G}$

ノイズソースオン $\frac{N_2}{N_1} = \frac{N_1 + E_n G}{N_1}$

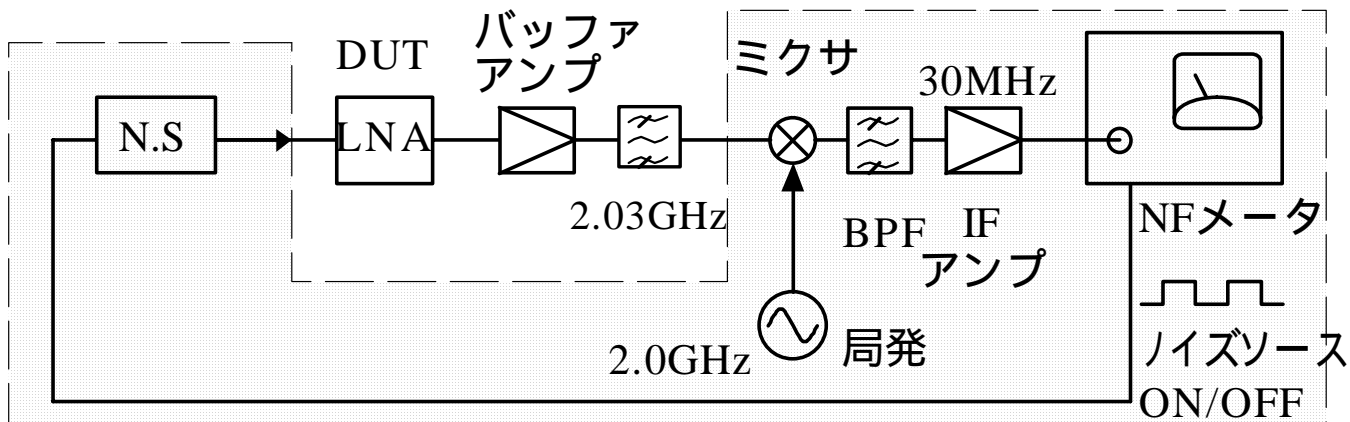
$$F[\text{dB}] = 10 \log \frac{E_n}{N_o} - 10 \log \left(\frac{N_2}{N_1} - 1 \right)$$



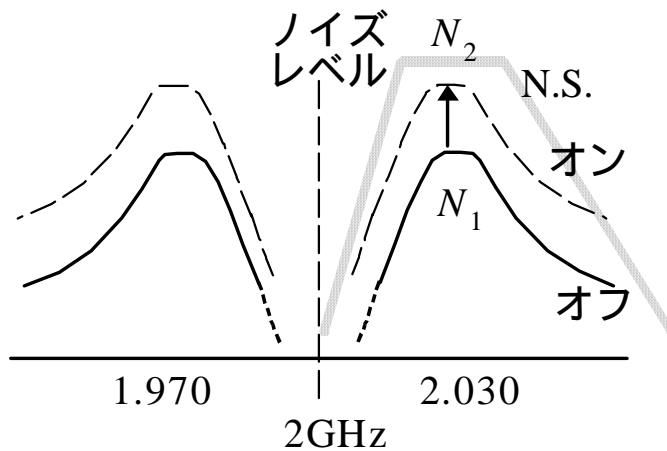
測定のセットアップ

Review-NF測定

NF測定 (DSB/SSB - NF)



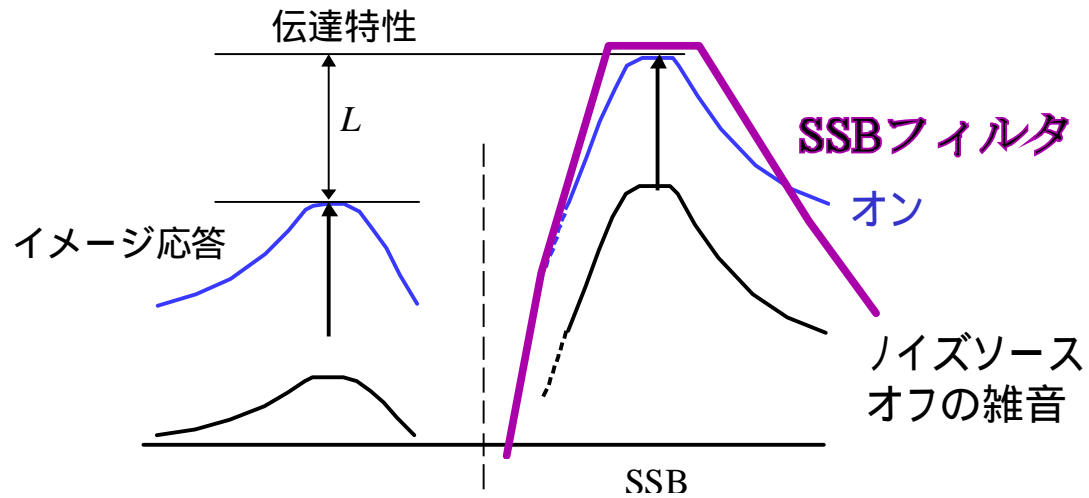
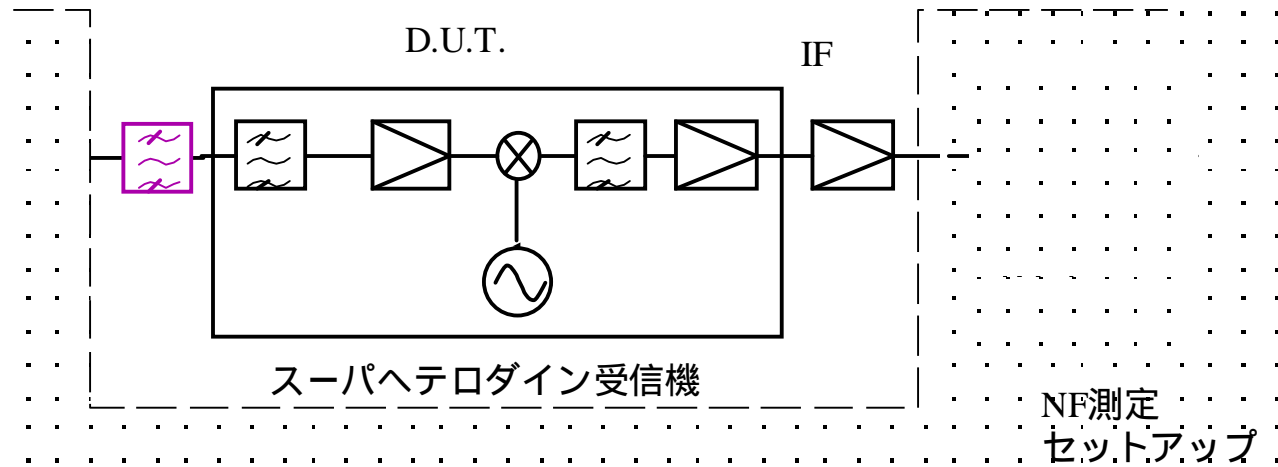
測定のセットアップ



SSB - NF

NF測定(スーパーヘテロダイン受信機)

“DUTがスーパーヘテロダイン受信機の場合”



NF測定

問題 イメージ応答のDSB - NF測定から, SSB - NFへ換算せよ。

NF測定のreview

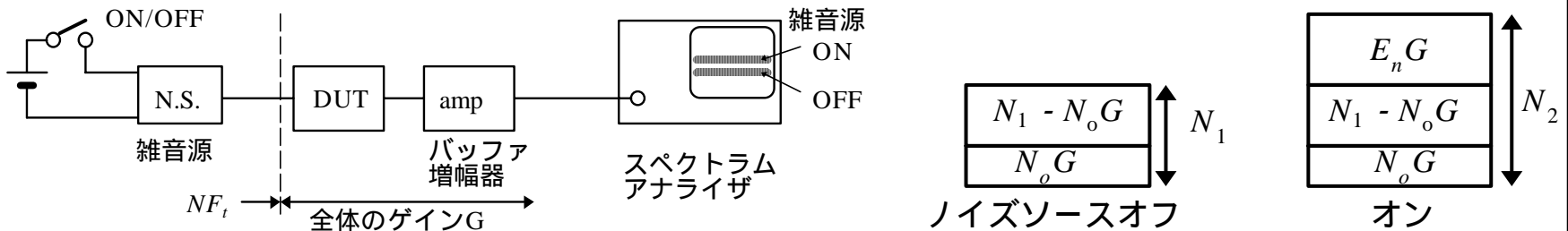
ノイズソースオフ

$$F = \frac{N_1}{N_o G}$$

ノイズソースオン

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{N_1 + E_n G}{N_1}$$

$$F[\text{dB}] = 10 \log \frac{E_n}{N_o} - 10 \log \left(\frac{N_2}{N_1} - 1 \right)$$



測定のセットアップ

For Instructor

NF測定

解答

イメージ応答のDSB - NF測定から, SSB - NFへ換算せよ。

E_n を加えたつもりが

$E_n(1+1/L)$ を加えている

E_n の補正として, $(1+1/L)$ [dB]を足す。

