

## 第2章 低雑音増幅器

### 2.1 低雑音増幅器の入出力回路の設計

初段に低雑音トランジスタを用いて低雑音増幅器を作る場合、その増幅器の雑音は後段の増幅器の雑音の影響も受ける。しかしながら増幅器の雑音は初段の増幅器の影響が強い。そこで初段は低雑音トランジスタを用いて最も低雑音が得られる設計をしなければならない。

さて低雑音トランジスタは図 2.1 のような入出力整合回路で整合され、これらの回路で雑音指数や利得が変化する。

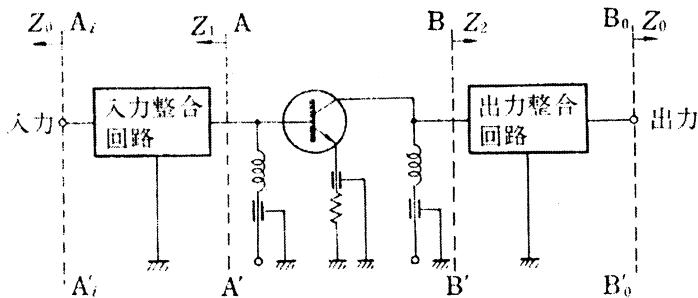


図 2.1 低雑音トランジスタ増幅回路設計の説明図

いま図 2.1 において AA'端子に負荷  $Z_o$  を接続したときの雑音指数を  $F_o$  とする。次に端子 AA' に図 2.1 のような入力整合回路を挿入した場合の雑音指数を  $F$  とすると、 $F$  は同図の  $Z_1$  の値によって変化する、その値は次式となる[1]。

$$F = F_o + \frac{4R_n |\Gamma_1 - \Gamma_o|^2}{Z_o |1 + \Gamma_o|^2 (1 - |\Gamma_1|^2)} \quad (2.1)$$

$$\text{ただし, } R_n = \frac{|1 + \Gamma_{op}|^2 (F_o - F_{op})}{4|\Gamma_{op}|}$$

$$\Gamma_1 = (Z_1 - Z_o) / (Z_1 + Z_o)$$

$\Gamma_{op}$  は  $F$  の最小値を与える  $\Gamma_1$  の値、 $F_{op}$  は  $\Gamma_1 = \Gamma_{op}$  における  $F$  の値 (最小雑音指数)

# 見本

従って  $F$  は  $Z_1$  の関数, すなわち  $\Gamma_1$  の関数となる。(ここで  $\Gamma_2$  の関数とならないのは, 出力から入力への帰還量  $S_{12}$  が小さいと考えられるからである。ただし  $S_{12}$  は  $S$  パラメータ要素)。

次に図 2.1 の AA' および BB' に  $Z_0$  を接続して, このトランジスタの  $S$  パラメータを測定することができる。この  $S$  パラメータというのは, 図 2.2 に示すように, AA' および BB' 端子に入射波 (トランジスタに向かう方向)  $a_1$  および  $a_2$  を加えた場合, AA' および BB' 端子に現れる反射波 (トランジスタから外部回路の方向に出る波)  $b_1$  および  $b_2$  が,

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{11}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{21}a_2 \end{cases} \quad (2-2)$$

の関係で与えられるものである。

ところで, 図 2.1 のように入出力

整合回路を挿入した場合の電力利得は,

(2-2) 式の  $S$  パラメータを用いて,

$$G = \frac{|S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_1|^2) \cdot (1 - |\Gamma_2|^2)}{|(1 - \Gamma_1 S_{11})(1 - \Gamma_2 S_{22}) - \Gamma_1 \Gamma_2 S_{12} S_{21}|^2} \quad (2-3)$$

で表せる。一般に  $|S_{12}| \ll |S_{21}|$  (出力からの帰還が少ない条件) があり, このとき (2-3) 式は,

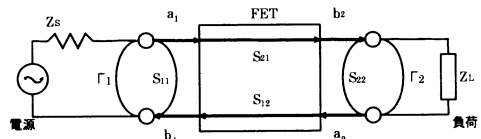
$$G; |S_{21}|^2 G_1 G_2 \quad (2-4)$$

$$G_1(\Gamma_1) = \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_1 S_{11}|^2}, \quad G_2(\Gamma_2) = \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{|1 - \Gamma_2 S_{22}|^2}$$

となる。

まず(2-1)式において,  $F$  一定の  $\Gamma_1$  の軌跡は円形となる。また, (2-4)式において  $G_2$  が最大となる状態に保ち,  $G$  一定の  $\Gamma_1$  の軌跡を求めると, これも円形になる。これらの模様の一例を示すと図 2.3 のようになる。このように利得最大の  $\Gamma_1$  と雑音指数最小の  $\Gamma_1$  とは異なった値をとる。

さてこの利得最大を与える  $\Gamma_1$  や, そのときの利得は(2-4)式からわかるように  $S$  パラメータの測定値から計算で求めることもできる。



$a_1, a_2$ : 入射電圧  
 $b_1, b_2$ : 反射電圧  
 $Z_s$ : 電源インピーダンス,  $\Gamma_1$ : 電源側反射係数  
 $Z_L$ : 負荷インピーダンス,  $\Gamma_2$ : 負荷側反射係数

図 2.2  $S$  パラメータ  
測定の説明図

# 見本

次に  $F$  の最小値を求める簡単な方法は[2]に述べられており以下それを説明する。  
 まず(2-1)式はもともと、

$$F = F_{0p} + \frac{R_n}{G_1} \left[ (G_1 - G_{0p})^2 + (B_1 - B_{0p})^2 \right] \quad (2-5)$$

ただし、 $\frac{1}{Z} = G_1 + jB_1$ 、 $G_{0p}$  および  $B_{0p}$  は  $F_{0p}$  を与える  $G_1$  および  $B_1$  の値から導かれたものである。

そこでまず  $G_1$  を一定にして、 $B_1$  の値だけ変化すると  $F$  の最小点ができる。これを繰り返すと、(2-5)式の[ ]内はゼロの状態になり、このとき(2-5)式により  $G_{0p}$  と  $B_{0p}$  がわかる。次に、

$$x = \frac{1}{G_1} \left[ (G_1 - G_{0p})^2 + (B_1 - B_{0p})^2 \right] \quad (2-6)$$

とおくと

$$F = F_{0p} + R_n x \quad (2-7)$$

となる。そこで任意の  $Z_1$  にしたとき、その  $Z_1$  に対する  $x$  の値が当然求まり、その  $x$  に対する  $F$  の値が測定できる。色々の  $Z_1$  の値を選ぶことにより、 $x$  と  $F$  との関係が(2-7)式に示すように直線で描かれる。したがってその直線の傾きから(2-7)式の  $R_n$  の値が得られる。

以上のことからトランジスタが与えられると、任意の  $Z_1$  に対する雑音指数が求まる。

さて最初に述べたように初段は図 2.1 の  $Z_1$  を低雑音特性をうるように図 2.3 の P 点のインピーダンスになるように設計する。

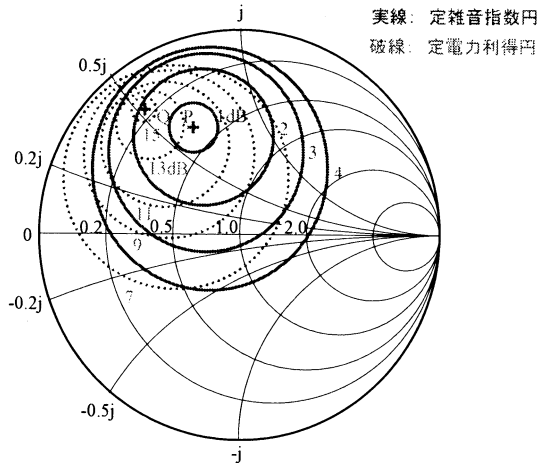


図 2.3 定雑音指数円 (実線) と定電力利得円 (破線) の信号源インピーダンス面上での表示

次に 2 段目の増幅器は、低雑音増幅器全体の利得をうるように図 2.1 の  $Z_1$  は  $Q$  点になるように設計する。この  $Q$  点のインピーダンスは 2 段目のトランジスタの入力インピーダンスと共役値になっており、1 段目と 2 段目のトランジスタは共役整合をして最大電力利得が得られるということである。

## 2.2 低雑音増幅器の種類

低雑音増幅器は帯域幅が 2 オクターブまでは通常反射整合形[3]で設計され、帯域幅が 2 オクターブを越えると負帰還[4]、抵抗整合形[5]、分布形[6]が用いられる。帯域幅が 2 オクターブ以下でも回路の安定化を図るために、負帰還または抵抗整合形が用いられる場合もある。反射整合形を用いた狭帯域増幅器において、雑音整合をとる場合は、前節で述べたように、トランジスタの雑音パラメータの測定または計算結果を用いて雑音指数が最小になるように設計される。一方、利得整合をとる場合は、トランジスタの  $S$  パラメータの測定結果または小信号等価回路モデルを用いて利得が最大になるように設計する。反射整合形を用いた広帯域増幅器においては、帯域内で平坦な利得が得られるように設計する。この場合、反射信号はバランス形に構成して、終端抵抗に吸収させる場合が多い。一方、負帰還、抵抗整合形、分布形増幅器では、抵抗を用いて広帯域にわたって平坦な利得、低い  $VSWR$  が得られるように設計する。通常、利得と反射特性を優先し、雑音特性は犠牲にされる。負帰還、抵抗整合形、分布形増幅器の雑音特性については、雑音モデルを用いて理論的に検討されているが[7]、[5]、[8]、広帯域にわたって低雑音化を図った設計例は少ない。

## 2.3 反射整合形増幅器

反射整合形増幅器は、増幅したい周波数で整合をとり、それ以外の周波数では信号を反射させる増幅器である。正確に述べると、利得を最大にしたい周波数では、入出力ともに利得整合をとり、雑音を最小にしたい周波数では、入出力ともに雑音整合をとる。反射整合形増幅器の入出力には、図 2.1 に示すように、リアクタンス素子から構成される入出力整合回路が接続されている。反射整合形増幅器の動作原理の理解を容易にするために、2.1 節で述べたようにトランジスタの  $S_{12}$  がゼロの場合を考える。

# 見本

トランジスタから見た入出力整合回路の反射係数をそれぞれ  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  とすると、増幅器の利得  $G$  は(2.4)式で示されるように、 $G_1$ ,  $G_2$  および  $|S_{21}|^2$  の積で表現できる。

反射整合形増幅器において利得を最大にする場合は、 $\Gamma_1 = S_{11}^*$ ,  $\Gamma_2 = S_{22}^*$  となるように  $\Gamma_1$  および  $\Gamma_2$  を決定する。この場合の利得  $G$  および雑音指数  $F$  は、(2.1)式から(2.6)式より

$$G = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \quad (\text{利得整合}) \quad (2.8)$$

$$F = F_{op} + \frac{4R_n |S_{11}^* - \Gamma_{op}|^2}{(1 - |S_{11}^*|^2) |1 + \Gamma_{op}|^2} \quad (\text{利得整合}) \quad (2.9)$$

で与えられる。

反射整合形増幅器において雑音を最小にする場合は、 $\Gamma_1 = \Gamma_{op}$ ,  $\Gamma_2 = S_{22}^*$  となるように  $\Gamma_1$  および  $\Gamma_2$  を決定する。この場合の利得および雑音指数は、(2.3)式および(2.4)式より、次式で与えられる。

$$G = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_{op}|^2)}{|1 - S_{11}\Gamma_{op}|^2 (1 - |S_{22}|^2)} \quad (\text{雑音整合}) \quad (2.10)$$

$$F = F_{op} \quad (\text{雑音整合}) \quad (2.11)$$

## 2.4 負帰還増幅器

負帰還増幅器は出力の一部を入力にフィードバックをかけ、増幅器の反射特性の改善、利得の平坦化を図る増幅器である。電界効果トランジスタを用いた負帰還増幅器では、ゲート・ドレイン間に抵抗を装荷する並列帰還形 (parallel feedback) とソースと接地間にリアクタンス素子を装荷する直列帰還形 (series feedback) がある。以下、2.4.1 で直列帰還増幅器、2.4.2 で並列帰還増幅器を紹介する。

### 2.4.1 直列帰還増幅器

# 見本

直列帰還増幅器は、電界効果トランジスタのソースと接地間にリアクタンス素子を装荷し、出力の一部を入力にフィードバックをかけ、反射特性の改善、利得の平坦化を図る。ここでは電界効果トランジスタのソースにインダクタを装荷し、反射特性の改善を図る例を示す。低雑音増幅器の雑音を最小にする場合、入出力ともに雑音整合をとる。一般に、雑音を最小にする負荷インピーダンスと利得を最大にする負荷インピーダンスは異なる。従って、入力側を雑音整合にすると反射特性が劣化する問題がある。この問題を解決

する方法として、電界効果トランジスタのソースにインダクタを装荷し、雑音を最小にするインピーダンスと利得を最大にするインピーダンスを近づける方法がある[9]。ゲート幅が  $200\mu\text{m}$  の GaAs HEMT について、或るソースインダクタンスを接続した時の小信号  $S$  パラメータと最小雑音指数を与える  $\Gamma_{\text{op}}$  を測定し、等価回路および雑音パラメータを求めた後、ソースインダクタンス ( $L_s$ ) の値を変化させて、利得が最大になる負荷インピーダンス  $S_{11}^*$  と雑音が最小になる負荷インピーダンス  $\Gamma_{\text{op}}$  を計算した。これを図 2.4 に示す。  $L_s$  が  $0.4\text{nH}$  の時に  $S_{11}^*$  と  $\Gamma_{\text{op}}$  が最も接近している。周波数は  $10\text{GHz}$ 、バイアス条件は  $V_d=3\text{V}$ 、 $I_{ds}=10\text{mA}$  である。ソースインダクタを装荷することにより、利得の劣化が生じるものの、雑音整合と利得整合を同時にとることができ、反射特性の改善を図ることができる。

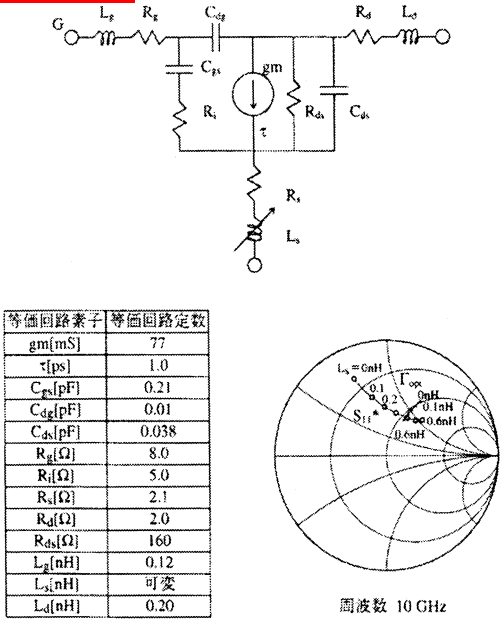


図 2.4 ソースインダクタ装荷  
電界効果トランジスタの  $S_{11}$  及び  $\Gamma_{\text{op}}$

## 2.4.2 並列帰還増幅器

並列帰還を用いた負帰還増幅器の等価回路を図 2.5 に示す。図 2.5 (a) に高周波での