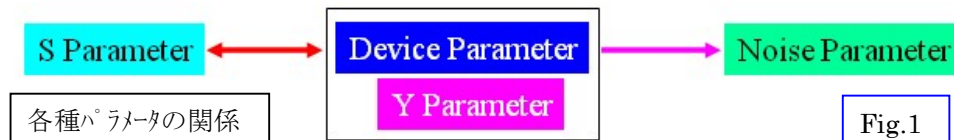


# S-NAP を活用した増幅素子の各種パラメータの変換と導出

copyright©  
MEL Inc. 2019

## 1. 序 文

分布増幅器等の広帯域アンプの設計に際して、アンプに適用する増幅素子 [HEMT 等] のデバイスパラメータ(入出力抵抗/容量、相互コンダクタンス、寄生インピーダンスを含めた素子の等価回路定数)、又素子のデータシートに記載されている周波数範囲を越えた[特に高域]パラメータ(SパラメータやNoiseパラメータ)が必要になる。そこでこのレポートでは SNAP の多面的な機能を活用してアンプ等の回路設計に必要な各種パラメータを適切に導出する方法を説明する。



基本的には、S Parameter  $\leftrightarrow$  Device Parameter / Y Parameter  $\rightarrow$  Noise Parameter 間の変換・導出について具体的事例で説明する。

## 2. 概 要

- (1) ライブラリにある S パラメータを利用する [ライブラリに該当するデータが無い場合には、メーカーの Web サイトから所要のデータシートを見つけてそれを元に新しく S パラメータのライブラリを作成してもよい: 具体策については割愛]。具体的には Example 回路にある FET のデバイスモデルを使用し、SNAP の最適化機能の一つである Curve Fit 法を適用して増幅素子のデバイスパラメータ [装置定数] を求める。
- (2) SNAP のパラメータ変換機能を利用して、先ずライブラリにある S パラメータのデータを 2ポートパラメータ回路に適用して、所要の周波数範囲で S パラメータ解析を行う。次いでそのデータを Y パラメータに変換してライブラリの所定のホルダに保存する。この Y パラメータを回路解析或いは雑音解析に適用することができる。
- (3) 前記のデバイスモデルで得られた HEMT の等価回路定数を、独自に開発したノイズパラメータ自動計算シート [Excel ファイル] に記入して、ノイズパラメータの  $NF_{min}$  (最小雑音指数) /  $\Gamma_{opt}$  (最小雑音指数を与える最適電源インピーダンス) /  $R_n$  (等価雑音抵抗) を導出する。この計算値と測定値をグラフで比較し計算の精確さを評価する。
- (4) 最後に、前記のデバイスパラメータの回路を利用して、所要の周波数範囲で S パラメータを行い、データシートに記載された周波数を越える周波数帯での S パラメータを近似的に求める。

## 3. 各パラメータを導出する具体的な手法

### [1] S パラメータからデバイスパラメータを導出する方法

- ① Cir¥Example¥Manual から OptEx7 の FET のモデル等価回路 [デバイスパラメータ] を選択する。

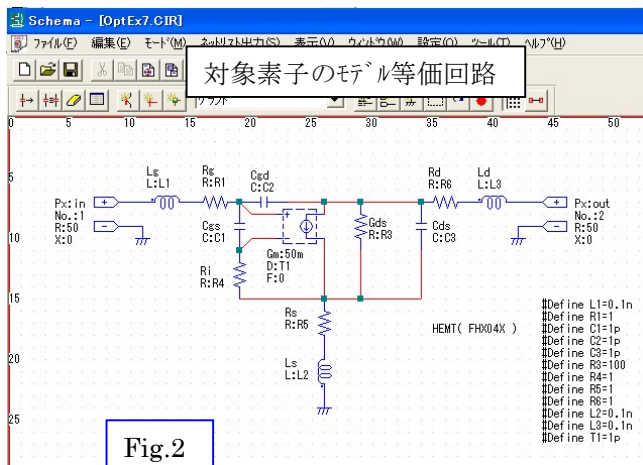


Fig.2

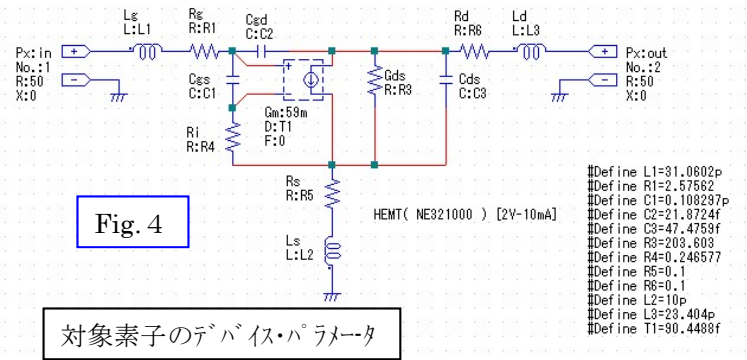
② HEMT の名称を適用素子名 NE321000 に変更し、相互コンダクタンス Gm の値をデータシートから読み取ってプロパティで変更 [後述の S パラメータ→ Y パラメータ変換で得た下限周波数における Y21 の実数部から Gm を決めると精度が向上する]、ファイル名称を付して保存する。

③ この回路のネット出力をして SNAP の最適化を開く。「カーブフィット」を選んで参照から対象素子の S パラメータをライブラリから引っ張ってくる。OK ボタンを押して、モデル等価回路 [デバイス・パラメータ] から計算した S パラメータを、対象素子の S パラメータに近づけるように最適化計算が行われる。

Fig.3

④ FET モデル等価回路に戻って、[Define 値を SNAP から読み込む] と各デバイスパラメータに最適値が書き込まれる。この結果が対象素子 NE321000 [NEC\_Chip\_HEMT] のデバイス・パラメータの近似値となる。

⑤このようにして導出したデバイス・パラメータは、Chip HEMT に対して素子の実際の性能に比べて高い精度を得ているように思われる。それはこのデバイスモデルを使用して計算したノイズ・パラメータ [後述] が、実測値にかなり近い特性を表すことなどから推察される。



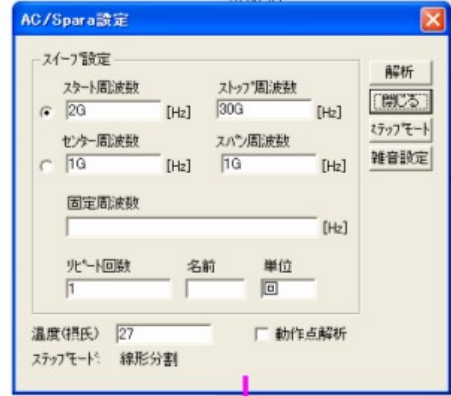
対象素子のデバイス・パラメータ

Fig. 4

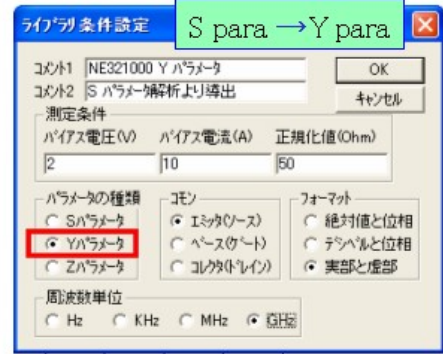
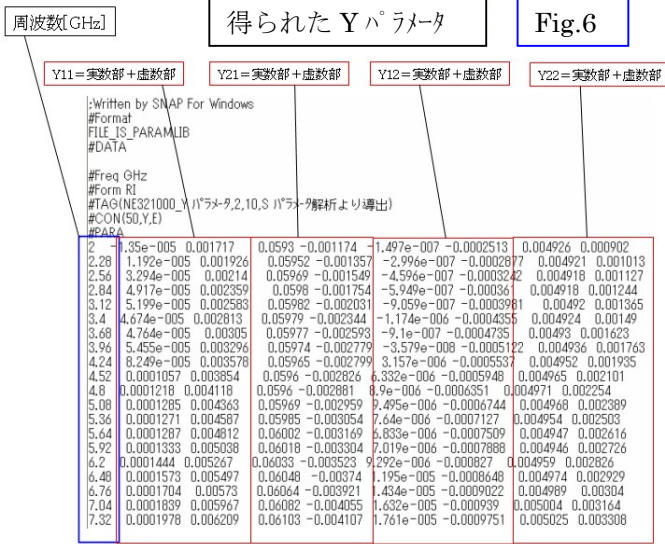
[2] SパラメータをYパラメータに変換する方法

- ① 2ポートパラメータ回路に参照から対象素子NE321000のSパラメータを取り込み、ネットリストを出力してSNAPのSパラメータ解析を所定の周波数領域で行う。
- ② Sパラメータの解析結果をファイル→「Sパラをライブラリに保存」に選んで、ライブラリの条件設定をYパラメータに選定し、諸条件を設定する。
- ③ 得られたYパラメータのデータをライブラリの所定のフォルダに保存する。

Fig.5 対象素子のデバイス・パラメータ



ファイル→Sパラライブラリに保存を選ぶ



[3] デバイス・パラメータを使用したノイズ・パラメータ関係式の導出方法

(A) ノイズ・パラメータを導出する理論解析

M.W. Pospieszalski, "Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.37, no.9, pp130-1350, Sept. 1989 を引用して、その FET モデル等価回路のデバイス・モデルとゲート雑音温度:  $T_g$ 、ドレイン雑音温

Noise Parameter 自動計算シート [Chip\_HEMT]

Fig.7

| Production No. [Name]                       | $V_{GS}$ [V] : Bias                                      | $I_D$ [mA] : Bias   | $t_a$ [C deg.] : Ambient Temp           | $T_g$ [K deg.] : Ambient Temp       | $f_t$ [GHz] = $10^{10} \times g_m / (C_{gs} \times C_{gd})$                                       |
|---|--|---|---|-------------------------------------|---|
| NE321000 [HEMT]                             | 2  | 10  | 27                                      | 300.000                             | Corrected Transition Frequency<br>140.852   |
| $f_L$ [GHz] : NF calculated freq            | $f_L$ [GHz] : Lower Freq Limit                           | $f_H$ [GHz] : Higher Freq Limit                           |   |                                     | $F_{min}$ (dB) : Fokui Formula<br>$F_{min} = 1 + 2.5 \times (DF)^2 \times (g_m \times R_g)^{1/2}$ |
| 20  | 2  | 18  |   |                                     | 1.147<br>NF min. $F_1$ (dB) at $f_L$<br>0.596   |
| $R_F$ [Ω] = $R_1 + R_2 + R_3$               |  | $L_F$ [nH] = $L_1 + L_2$                                  |   |                                     | $C_{gs}$ [pF]<br>0.100  |
| 2.910                                       |  | 0.041   |   |                                     | 0.005   |
| $\pi$                                       | $g_m$ [S] : transconductance                             | $\omega_c = 2\pi f_c$ [f. cutoff freq] by (511)           | $w$ : Param by (337) at $f_c$           | $v$ : Parameter by (630)            |   |
| 3.142                                       | 0.859  | 546296296296.296  | 0.230                                   | 0.014                               |   |
| $F_n$ [dB] : Minimum NF                     | $F_n$ [dB] : Minimum NF                                  | A : Parameter by (333)                                    | B : Parameter by (334)                  | $K_g = 10$ : Gate N Temp            |   |
| 0.596                                       | 1.147  |   |   | 0.70                                |   |
| $K_1$ : Drain N Temp by (340)               | $T_g$ : Gate N Temp [T <sub>g</sub> , T <sub>g,K</sub> ] | $T_d$ : Drain N Temp [T <sub>d</sub> , T <sub>d,K</sub> ] |   |                                     |   |
| 8.463                                       | 210  | 2539  |   |                                     |   |
| $g_m$ [S] : transconductance                | $R_T$ [ohm] : Total Resistance                           | $L_F$ [nH] : Input Inductance                             | $g_s$ [S] : Output Conductance          | $\pi$                               |   |
| 0.039                                       | 2.910  | 0.041   | 0.005                                   | 3.142                               |   |
| $\omega_c = 2\pi f_c$ [f. cutoff frequency] | $K_g$ : Gate Noise Temp Co                               | $K_d$ : Drain Noise Temp Co                               | $C_{gs}$ [pF] : Input Capacitance       | $R_{n,50}$ : Normalized $R_n$       |   |
| 546296296296.296                            | 0.70   | 8.463   | 0.100                                   | 0.164                               |   |
| $f$ [GHz] : Calculation Freq                | $\omega$ [rad/s] : Calc Angular Freq                     | $X_{Lp}$ [ohm] : Calc by (520)                            | $w$ : Calculation by (537)              | $v$ : Calculation by (600)          |   |
| 40  | 251327300000.000   | 26.537  | 0.460                                   | 0.014                               |   |
| $R_{n,p}$ [ohm] : Calc by (522)             | $Z_{in}^*$ [ohm] : Calculation                           | $G_n$ [S] : Calculator by (510)                           | $R_n$ [ohm] : Calc by (523)             | $R_n$ [S] : Calculation by (527)    |   |
| 15.510                                      | 944.772  | 0.009   | 8.293                                   | 8.218                               |   |
| $F_n$ : Calculation by (529-2)              | $F_n$ [dB] : NF minimum                                  | $n_g = R_g / S$   | $n_d = X_{Lp} / S0$ [always $n_d > 0$ ] | D calculated by (403)               |   |
| 1.323                                       | 1.217  | 0.310   | 0.531                                   | 1.998                               |   |
| A calculated by (404)                       | B calc by (405) [always = 0]                             | $IF_{opt}$ : $F_{opt}$ (dBAG) by (406)                    | $\Gamma_{opt}$ (ANG) by (407)           | $F_{opt}$ (ANG) (A - 8, LANG = 100) |   |
| -0.622                                      | 1.061  | 0.616   | -59.627                                 | 120.373                             |   |

度： $T_d$  の関係式を導き、ノイズ・パラメータを定量的に表す関係式を導出した。

(B)ノイズ・パラメータを導出する自動計算シートの作成

Chip HEMT に対するNoise Parameter の実測値と計算値の比較(1)

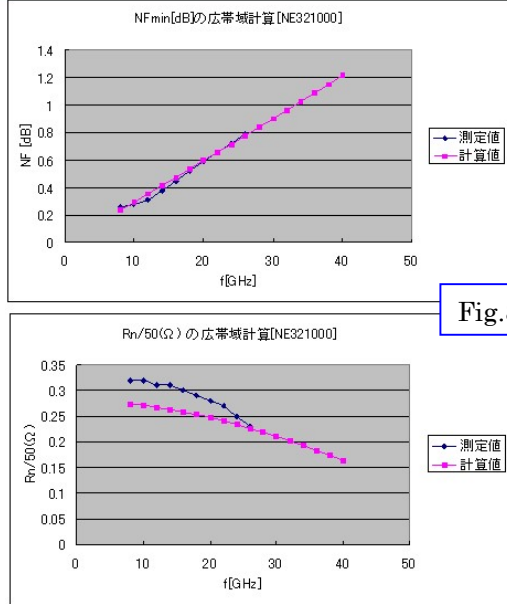


Fig.8

このノイズ・モデルに Fukui の式「雑音指数 NF を導く近似式」を改良した関係式を組合・融合して、前記のデバイス・パラメータを該当欄に記入すると、各周波数に対する Noise Parameter [NF<sub>min</sub> (最小雑音指数) /  $\Gamma_{opt}$  (最小雑音指数を与える最適電源インピーダンス) の MAG(大きさ)、ANG (角度) / R<sub>n</sub> (等価雑音抵抗)]を導出する Excel を使用した自動計算シートを独自開発した。

(C)Chip HEMT に対するノイズ・パラメータの導出

[1]で求めたデバイス・パラメータを適用して Chip HEMT NE321000 に対するノイズ・パラメータを、周波数 8GHz-40GHz の広帯域に亘って導く自動計算シートを(図 7)に紹介する。この計算結果とデータシートに記載された実測値を比較すると夫々のノイズ・パラメータは良好な近似を示すことが判る。

Chip HEMT に対するNoise Parameter の実測値と計算値の比較(2)

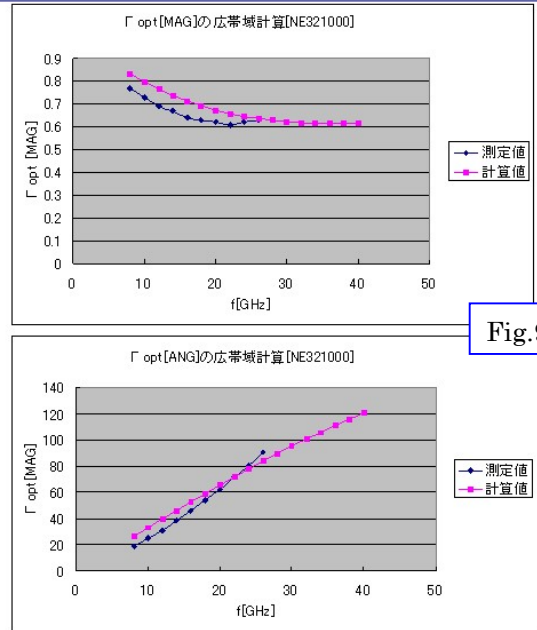


Fig.9

Yパラメータを適用してデバイス・パラメータを近似計算する(2)

$Y_{11}$  の導出  $Y_{11} = \left( \frac{I_1}{V_1} \right)_{V_2=0}$  :DS端子間を短絡  $C_{gs} \approx 20 \text{ fF} \times 10^{-14} \text{ F}$ ,  $R_g = 1 \Omega$ ,  $R_s = 1 \Omega$ ,  $L_s = 0.01 \text{ nH} \times 10^{-9} \text{ H}$ ,  $L_g = 0.7 \text{ nH}$  とすると、 $f = 20 \text{ GHz}$  で  $|X_{gs}| = |j\omega C_{gs}| = 400 \Omega$ ,  $|X_{gs}| = 1 \Omega$ ,  $|X_{gs}| = 8 \Omega$  と  $C_{gs}$  に対してそれに適当に調整される  $R_g, R_s, L_s, L_g$  の影響を無視することが出来る ..... (102)

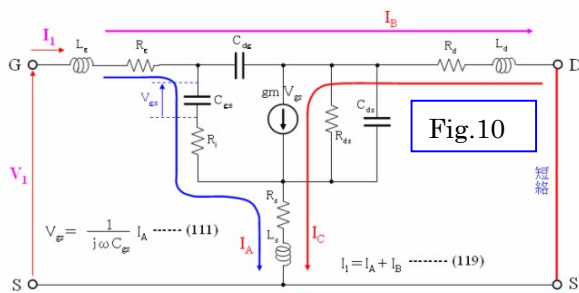


Fig.10

[Fig.2]  $Y_{11}$  を導出する等価回路

$I_C = gm V_{gs} = \frac{gm}{j\omega C_{gs}} I_A$  ..... (112)

(112)から、 $\frac{I_C}{I_A} = \frac{gm}{j\omega C_{gs}}$  ..... (113)

$gm = gm_0 e^{-j\omega \tau}$  ..... (118)

$e^{-j\omega \tau} = (\cos \omega \tau - j \sin \omega \tau)$  ..... (115)

$gm_0 \approx 5 \times 10^{-4} (\Omega^{-1})$  ..... (117)

(118)に(115)を代入して  $gm = gm_0 (\cos \omega \tau - j \sin \omega \tau)$  ..... (200)

(D)Package HEMT に対するノイズ・パラメータの導出

(1)Package HEMT NE 3210S01 について [2]と同様の方法で求めた Y パラメータを適用

して、パッケージの寄生インダクタンスをより正確に計算し、デバイスパラメータを導出する理論解析を(図10)に示す。この解析では従来の理論解析に加えて、[ゲート容量  $C_{gs}$  に印加されたゲート電圧  $V_{gs}$  によって相互コンダクタンス  $g_m$  の働きで誘起される]ドレイン電流  $I_d$  とゲート入力抵抗  $R_i$  を流れるゲート電流  $I_g$  の位相差を考慮して、特にゲート入力抵抗  $R_i$  が [ソースインダクタンス  $L_s$  の影響で見かけ上増大する影響を取り除いて] 正確に求められるよう

Noise Parameter 自動計算シート [Package\_HEMT]

| Production No. [Name]                    | $V_{DS}$ [V] Bias                            | $I_D$ [mA] Bias  | $t_a$ [C. deg] Ambient Temp                              | $T_0$ [K. deg] Ambient Temp      | $f_t$ [GHz] $= 10^{10} \cdot g_{m0} / (2\pi C_{gs} \cdot 2.0)$  |
|--|--|--|--|----------------------------------|---|
| NE3210S01 [HEMT]                         | 2  | 10   | 27   | 300.000                          | 78.928  |
| $f_0$ [GHz] : NF-calculated freq         | $f_0$ [GHz] : Lower Freq Limit               | $f_0$ [GHz] : Higher Freq Limit                            |  |                                  | $F_{min}$ [dBA] : Faked Formula                                 |
| 10                                       | 2  | 18   |  |                                  | $F_{min} = 1 + 2.5 \cdot (DF)^2 \cdot (g_{m0} \cdot R_i)^{1.2}$ |
|  |  |  |  |                                  | NF <sub>min</sub> : $F_0$ [dB] at $f_0$                         |
|  |  |  |  |                                  | 1.143   |
|  |  |  |  |                                  | 0.581   |
| $R_i$ [Ω] = $R_1 + R_2 + R_3$            |  | $L_i$ [nH] = $L_1 + L_2$                                   |  |                                  | $C_{gs}$ [pF]   |
| 3.535                                    |  | 0.541  |  |                                  | 0.233   |
|  |  |  | $g_o$ [S] = $1/R_o$                                      | $C_{gs}$ [pF]                    |   |
|  |  |  | 0.006  | 0.108                            |   |
| $\pi$                                    | $g_{m0}$ [S] : transconductance              | $\omega_c = 2\pi f_c$ [cutoff freq] by (511)               | $w$ : Parameter by (537) at $f_0$                        | $v$ : Parameter by (538)         |   |
| 3.142                                    | 0.058  | 247639484978.541   | 0.254  | 0.020                            |   |
| $F_0$ [dB] : Minimum NF                  | $F_0$ [Mag] : Minimum NF                     | A : Parameter by (533)                                     | B : Parameter by (534)                                   | $k_{gs} = 1.0$ : Gate N Temp     |   |
| 0.581                                    | 1.143  |  |  | 0.65                             |   |
|  | $K_4$ : Drain N Temp by (540)                | $T_{gs}$ : Gate N Temp [T <sub>0</sub> , T <sub>gs</sub> ] | $T_0$ : Drain N Temp [T <sub>0</sub> , T <sub>gs</sub> ] |                                  |   |
|  | 5.074  | 195  | 1522   |                                  |   |
| $g_m$ [S] : transconductance             | $R_T$ [ohm] : Total Resistance               | $L_T$ [nH] : Input Inductance                              | $g_o$ [S] : Output Conductance                           | $\pi$                            |   |
| 0.058                                    | 3.535  | 0.541  | 0.006  | 3.142                            |   |
| $\omega_c = 2\pi f_c$ [cutoff frequency] | $K_{gs}$ : Gate Noise Temp Co                | $K_d$ : Drain Noise Temp Co                                | $C_{gs}$ [pF] : Input Capacitance                        | $R_{n50}$ : Normalized $R_n$     |   |
| 247639484978.541                         | 0.65   | 5.074  | 0.233  | 0.215                            |   |
| $f$ [GHz] : Calculation Freq             | $\omega$ [Rad] : Calc Angular Freq           | $X_{gs}$ [ohm] : Calcula by (520)                          | $w$ : Calculation by (537)                               | $v$ : Calculation by (538)       |   |
| 1  | 6283180000.000                               | 679.670  | 0.025  | 0.020                            |   |
| $R_{gs}$ [ohm] : Calcul by (522)         | $Z_{in}^2$ [ohm <sup>2</sup> ] : Calculation | $G_{gs}$ [S] : Calculation by (510)                        | $R_n$ [ohm] : Calcula by (523)                           | $R_n$ [S] : Calculation by (527) |   |
| 354.443                                  | 387381.032                                   | 0.000  | 10.748   | 10.748                           |   |
| $F_0$ : Calculation by (529-2)           | $F_0$ [dB] : NF minimum                      | $\tau_{gs} = R_{gs}/50$                                    | $\tau_{gs} = X_{gs}/50$ (always: $\tau_{gs} \neq 0$ )    | D calculated by (403)            |   |
| 1.042                                    | 0.177  | 7.089  | 13.593   | 250.210                          |   |
| A calculated by (404)                    | B calcu by (405) (Always > 0)                | $\Gamma_{opt}$ [MAG] by (406)                              | $\Gamma_{opt}$ [ANG] by (407)                            | $F_{opt}$ [ANG] (A-B: ANG+100)   |   |
| 234.032                                  | 27.187                                       | 0.942  | 6.626  | 6.626                            |   |

Fig.11

Package HEMT に対する Noise Parameter の実測値と計算値の比較(1)

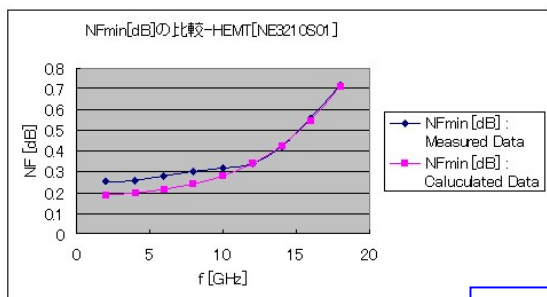
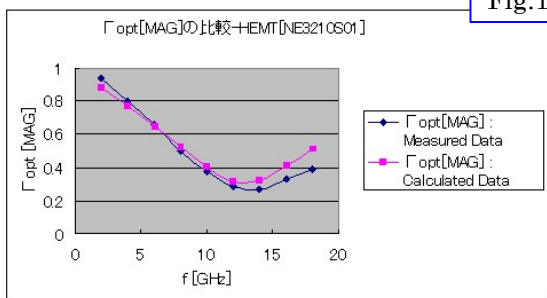


Fig.12



シートに記載された実測値とを対比してみると良好に近似されることが判る。特に高域側で各ノイズパラメータの計算値は実測値に相当に近い値を示すことが読み取れる。

に工夫している。

(2)上記の求めたデバイスパラメータを適用して、パッケージに伴って発生する寄生インダクタンスの影響を強く受けるノイズパラメータを、より正確に導出する自動計算シートを(図11)に示す。その計算結果とNE3210S10の

Package HEMT に対する Noise Parameter の実測値と計算値の比較(2)

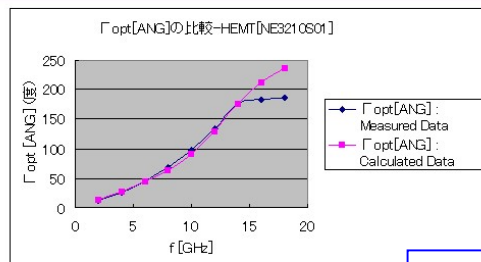
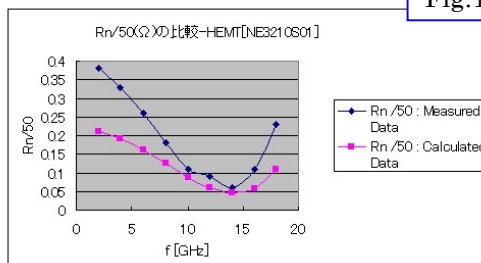


Fig.13



[4] デバイスパラメータを使用して高域の S パラメータを導出する方法

(1)シートに記載された S パラメータ周波数範囲を越えて、特に高域側の S パラメータを求める必要

デバイスパラメータ等価回路のSパラメータ解析を行う

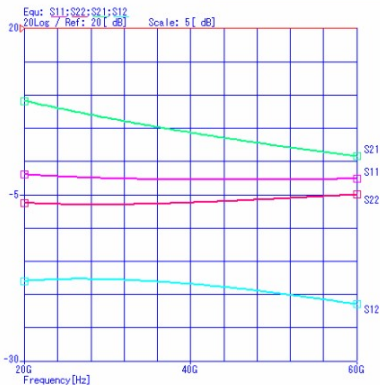
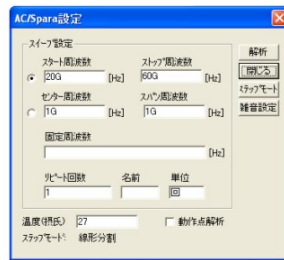


Fig.14



性が時々発生する。これは特に、マイクロ波からミリ波帯の超広帯域のゲインを達成する分布増幅器や負帰還増幅器の設計に際して高域を近似してくれるSパラメータが必要になる。

(2)先に[1]の最適化のカブフィットで導出したデバイス・パラメータ [FET モデル等価回路] を利用してそのSパラメータ

解析を所要の帯域 [高域] について行う。その結果をSパラのライブラリに保存すると、所要帯域のSパラメータを導くことが出来る。この新たなSパラメータを、ライブラリに登録されていた既存のSパラメータに付加し、データの配置を整頓することによって、中低帯域から高域に及ぶ広帯域のSパラメータのライブラリを完成することが出来る。

Fig.15

| 周波数[GHz] | S11 [MAG/ANG] | S21 [MAG/ANG] | S12 [MAG/ANG]  | S22 [MAG/ANG] |
|----------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 50       | 0.7302 -161.2 | 1.326 54.69   | 0.1033 -4.376  | 0.523 -126.3  |
| 50.4     | 0.7304 -161.7 | 1.315 54.19   | 0.1025 -4.481  | 0.5245 -126.8 |
| 50.8     | 0.7307 -162.2 | 1.305 53.69   | 0.1018 -4.577  | 0.526 -127.3  |
| 51.2     | 0.731 -162.7  | 1.294 53.2    | 0.101 -4.664   | 0.5276 -127.8 |
| 51.6     | 0.7313 -163.2 | 1.284 52.7    | 0.1003 -4.742  | 0.5291 -128.2 |
| 52       | 0.7317 -163.7 | 1.274 52.21   | 0.09954 -4.81  | 0.5307 -128.7 |
| 52.4     | 0.732 -164.2  | 1.263 51.73   | 0.09878 -4.869 | 0.5323 -129.2 |
| 52.8     | 0.7324 -164.7 | 1.253 51.24   | 0.09803 -4.919 | 0.5339 -129.6 |
| 53.2     | 0.7327 -165.2 | 1.244 50.76   | 0.09727 -4.958 | 0.5354 -130.1 |
| 53.6     | 0.7331 -165.7 | 1.234 50.28   | 0.09651 -4.988 | 0.5371 -130.6 |
| 54       | 0.7335 -166.2 | 1.224 49.8    | 0.09575 -5.007 | 0.5387 -131   |
| 54.4     | 0.7339 -166.7 | 1.215 49.33   | 0.09499 -5.016 | 0.5403 -131.5 |
| 54.8     | 0.7343 -167.2 | 1.205 48.86   | 0.09422 -5.015 | 0.5419 -131.9 |
| 55.2     | 0.7347 -167.6 | 1.196 48.39   | 0.09346 -5.003 | 0.5436 -132.4 |
| 55.6     | 0.7352 -168.1 | 1.187 47.92   | 0.0927 -4.98   | 0.5452 -132.8 |
| 56       | 0.7356 -168.6 | 1.178 47.46   | 0.09194 -4.945 | 0.5469 -133.3 |
| 56.4     | 0.7361 -169.1 | 1.169 47      | 0.09118 -4.9   | 0.5485 -133.7 |
| 56.8     | 0.7365 -169.5 | 1.16 46.54    | 0.09041 -4.843 | 0.5502 -134.2 |
| 57.2     | 0.737 -170    | 1.151 46.09   | 0.08966 -4.774 | 0.5519 -134.6 |
| 57.6     | 0.7375 -170.4 | 1.143 45.63   | 0.0889 -4.693  | 0.5536 -135.1 |
| 58       | 0.738 -170.9  | 1.134 45.18   | 0.08814 -4.6   | 0.5553 -135.5 |
| 58.4     | 0.7385 -171.4 | 1.126 44.73   | 0.08739 -4.495 | 0.5569 -135.9 |
| 58.8     | 0.739 -171.8  | 1.117 44.29   | 0.08664 -4.377 | 0.5586 -136.4 |
| 59.2     | 0.7395 -172.3 | 1.109 43.85   | 0.08589 -4.246 | 0.5604 -136.8 |
| 59.6     | 0.74 -172.7   | 1.101 43.41   | 0.08515 -4.102 | 0.5621 -137.3 |
| 60       | 0.7405 -173.1 | 1.093 42.97   | 0.08441 -3.945 | 0.5638 -137.7 |

#### 4. 考察

- ① SNAP のライブラリに登録されているSパラメータを活用して、デバイス・パラメータやYパラメータなどの新たなパラメータを導出し、さらにこれを利用してノイズ・パラメータを作成する。このようにSNAPは多様なパラメータをフレキシブル且つスピーディに実現できる優れたシミュレータである。
- ② 上記①を応用することによって、既存のライブラリの周波数範囲を超える広帯域のSパラメータやノイズ・パラメータを容易に且つ高精度に作成することが可能である。
- ③ その結果、マイクロ波からミリ波帯に亘る超広帯域 [分布増幅器/フィードバック増幅器他] の設計に適合する新たなライブラリを自由に創造することが出来る。
- ④ Sパラメータからデバイス・パラメータ [FET の等価回路の定数] を導く際に、パッケージが有する寄生インピーダンスの影響が殆どない Chip 型 HEMT のデバイス・パラメータの方が、Package 型 HEMT のデバイス・パラメータよりも高精度に求められることが、そのデバイス・パラメータから導いたノイズ・パラメータの計算結果を実測値と対比してみることによって判った。

- ⑤ 最適化の Curve Fit 機能を適用する際に、FET モデル等価回路にデータシートから読み取った相互コンダクタンス  $g_m$  を適用するよりも、S パラメータを一度 Y パラメータに変換して周波数下限における  $Y_{21}$  の実数部から求めた相互コンダクタンス  $g_m$  を適用する方が、得られたデバイスパラメータの精度が全般的に高いことが、文献等に記述されている等価回路定数と比べて、明らかになった。
- ⑥ 次回のアプリケーションレポート 11 で、今回の各種パラメータ変換の結果 [上記②] を活用して、マイクロ波からミリ波帯域に達する分布増幅器の設計方法を解説する。

—以上—