

【第 30 話】低雑音増幅器 (LNA) のインピーダンスマッチング (その 5・定 NF 円)

濱田 倫一

第 29 話ではトランジスタの雑音パラメータの意味するところを詳しく解説しました。書いた本人が言うのも何ですが、等価回路と計算式ばかりで、あまり面白くなかったのではないかと思います。好き嫌いせずに読んで頂いた方は、雑音パラメータがどういうものかについてご理解頂けたのではないかと思います。第 30 話からは、第 28 話で解説した「NF マッチ」の問題点を再度確認し、雑音パラメータを使用した実用的な LNA の設計について解説します。

■ 1. NF マッチの問題点

第 28 話では LNA の基本的設計手法として、信号源インピーダンスを「 Γ_{OPT} 」に変換する「NF マッチ」という設計手法をご紹介しました。信号源インピーダンスを「 Γ_{OPT} 」に変換してトランジスタに接続する (図 1) ことで、トランジスタの NF を最小にすることができました。例として取り上げたトランジスタ BFU725F の場合 420MHz での $F_{min}=0.38\text{dB}$ なので、概ねこの値に近い NF の低雑音増幅器が実現できる筈です。一方で「 Γ_{OPT} 」に整合をとると増幅器の入力 VSWR が大きく劣化しました (図 2)。

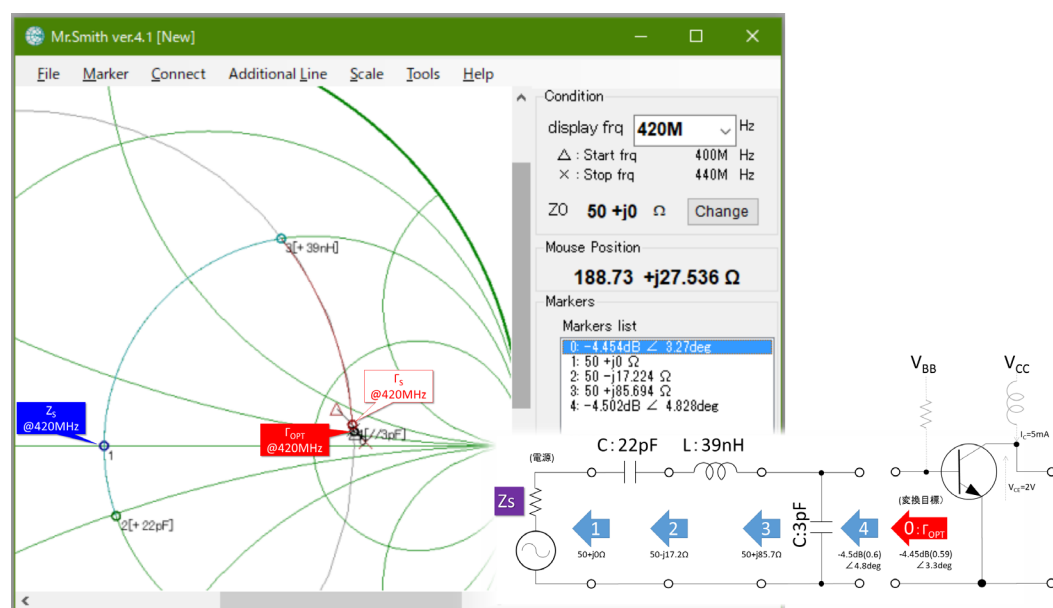


図 1 BFU725F の NF マッチ (@420MHz) (第 28 話の図 8 から再掲)

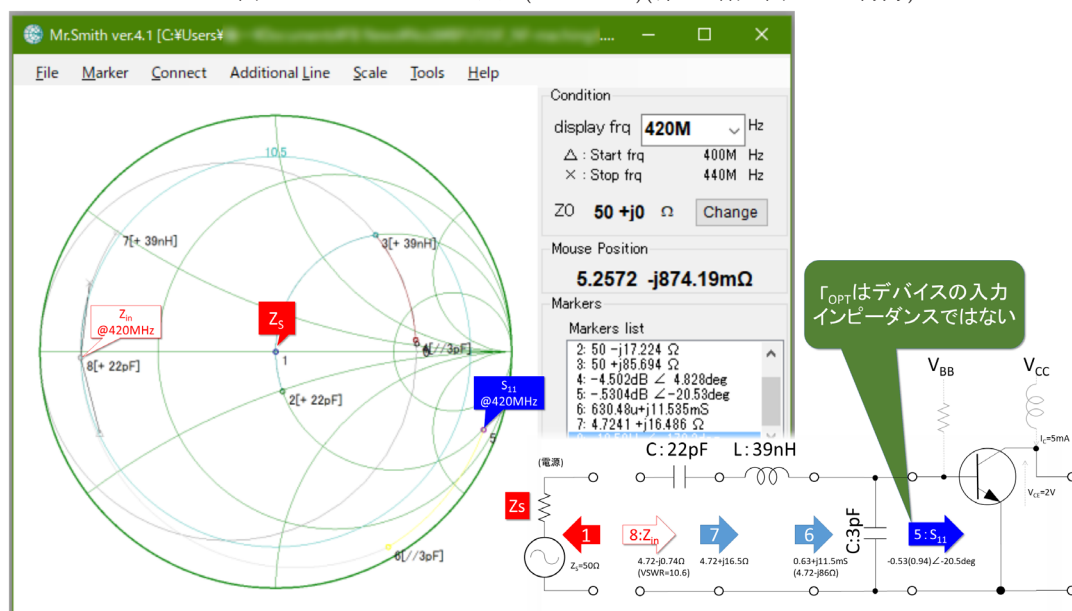


図 2 NF マッチを行ったときの BFU725F の入力インピーダンス (@420MHz) (第 28 話の図 9 から再掲)

図2の設計結果では入力 VSWR=10.5 となっています。リターンロスに換算すると -1.65dB になります。(図2の計算においては、Mr.Smith で 8 番マーカを選択し、Marker type ラジオボタンの選択を Reflection coefficient にすれば換算できます) 反射係数 Γ とリターンロス RL[dB] は $20\log$ の関係ですから $|\Gamma|$ は約 0.827 です。入射電力の反射による電力損失、すなわち整合損失 ML は、

$$ML = -10\log(1 - |\Gamma_L|^2) \text{ [dB]}^* \quad (\text{式 1-1})$$

なので、この式に 0.827 を代入すると

$$-10\log(1 - 0.827^2) = 5 \text{ [dB]} \quad (\text{式 1-2})$$

となって、なんと入力電力を 5dB も損失していることが判ります。NF の定義は第 26 話 (式 5-1) で述べた通り入力 SNR と出力 SNR の比であり、ミスマッチによる電力損失は折り込まれた値なので、デバイスの S_{11} と信号源のミスマッチで入力損失が 5dB 発生したからといって、第 27 話の 3 章で説明したように NF が 5dB 劣化するということはありませんが、利得には影響します。この様子は 第 23 話で解説した入力等利得円をプロットしてみるとよくわかります。図3は BFU725F の S パラメータを使って 420MHz における入力等利得円を Mr.Smith ※ 1 上にプロットしたものです。 Γ_{OPT} のポイントにおける G_1 は、 S_{11}^* (S_{11} に共役整合させたポイント) から、概ね 5dB 低くなっています。

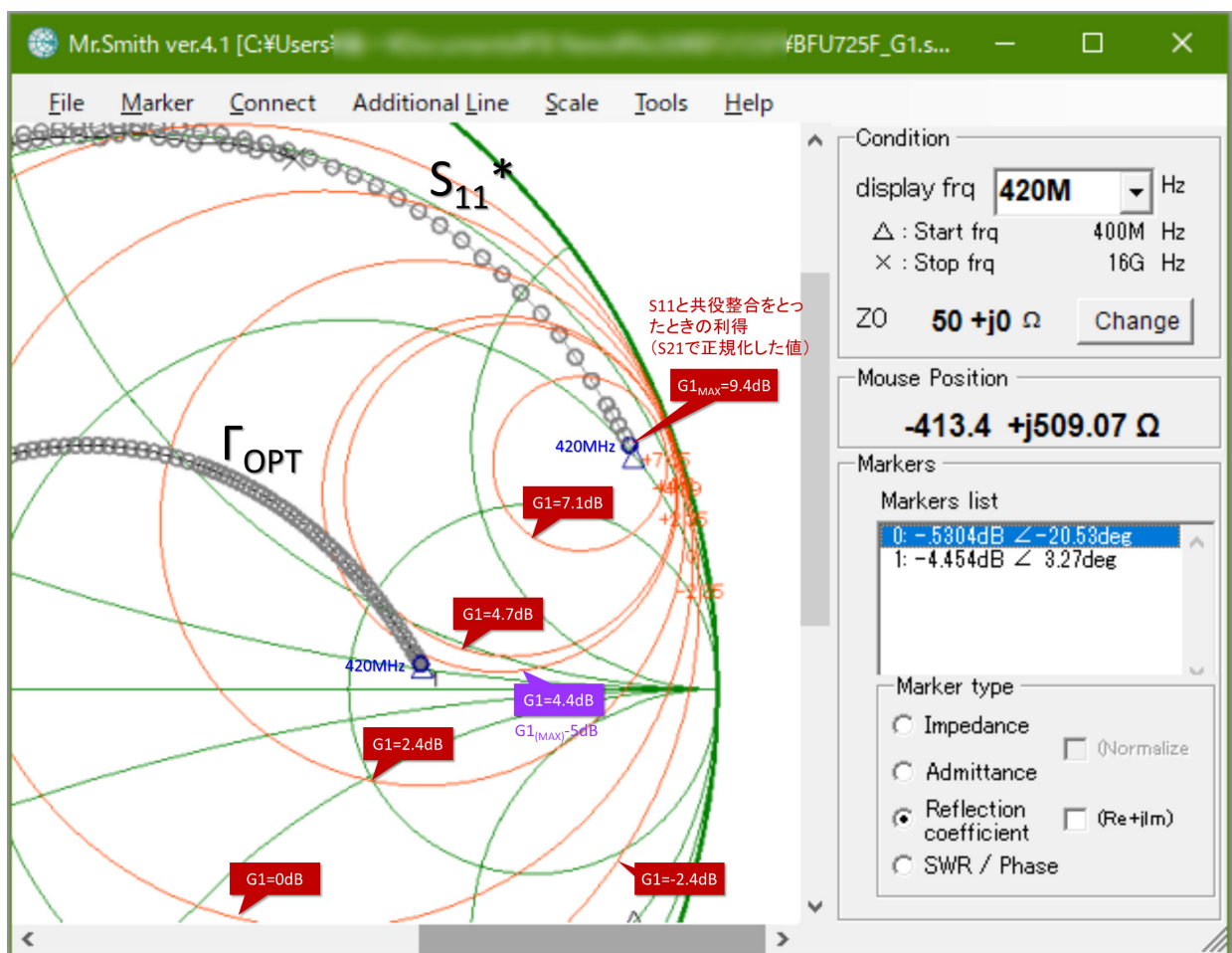


図3 BFU725F の入力等利得円 (@420MHz)：プロット方法は第 23 話参照

但し、これは信号源が負荷とのミスマッチで特性変化しない事が大前提です。LNA の前段がフィルタのようなイメージインピーダンスの信号源だったりすると、VSWR=10.5 は受け入れがたい反射係数になります。このような場合は第 24 話、第 25 話で説明したようなアイソレータやアッテネータを挿入して段間のインピーダンスを定める必要が生じてしまうのですが、一般的なアイソレータには 0.3 ～ 0.5dB 程度の挿入損失があり、折角 NF マッチを行って NF=0.38dB を達成しても、入力損失の影響で、増幅器全体の NF は結局 1dB 以上になってしまう場合が多々あります。またアイソレータは BFU725F が \40 程度なのと比較して桁違いに高価です。NF を少し犠牲にして、入力 VSWR を改善した方が得策だったりしないのでしょうか。このような課題を解くために有用なのが、これからご説明する「定 NF 円」です。

■ 2. 定 NF 円 (Constant NF circle)

雑音パラメータは信号源インピーダンスとトランジスタが発生する雑音の関係を示すパラメータです。 Γ_{OPT} と F_{min} が判れば、そのトランジスタが最も低雑音になる整合条件と、そのときの NF を知ることができるのですが、さらに等価雑音抵抗 R_n がわかれば、信号源インピーダンスと NF の関係を、スミスチャート上の等高線分布として把握することができます。この等高線の事を「定 NF 円 (Constant NF circle)」と呼びます。

すなわち、 Γ 平面 (スミスチャート) 上において、あるデバイス (トランジスタ) の雑音指数が F (真数値) となる信号源インピーダンスは円を描いて分布し、円はそのデバイスの F_{min} を頂点とする等高線状に分布します。雑音指数が F の定 NF 円は、中心座標を Ω_N 、半径を R_N とすると、(式 2-1)、(式 2-2) で表されます。

$$\Omega_N = \frac{\Gamma_{OPT}}{1 + N} \quad (式 2-1)$$

$$R_N = \frac{\sqrt{N^2 + N(1 - |\Gamma_{OPT}|^2)}}{1 + N} \quad (式 2-2)$$

但し

$$N = \frac{F - F_{min}}{4r_n} |1 + \Gamma_{OPT}|^2 \quad (式 2-3)$$

$$r_n = \frac{R_n}{R_0} \quad R_0 : \text{スミスチャートの中心の抵抗値} \quad (式 2-4)$$

では BFU725F の定 NF 円を計算してみましょう。計算には定利得円の計算の際と同様、Microsoft® Excel® ※ 2 を用いました。

この設計は第 28 話からの続きなので、デバイスの動作点等は第 28 話と同じ ($V_{CE}=2V, I_C=5mA$)、使用するパラメータファイルは、BFU725F_2V_5mA_S_N.s2p です。このパラメータファイルから定 NF 円の座標を計算する Excel 用ワークシート "NF circle BFU725F_2V_5mA_S_N*****.xlsx" (***** はファイルのバージョンを示します) を添付しますので、興味のある方は http://fbnews.jp/202104/mrsmith/images/NF_circle_BFU725F_2V_5mA_S_N20210215.zip ※ 3 からダウンロードしてください。

このファイルはいくつかのワークシートから構成されていて、

BFU725F_2V_5mA_S_N : S2P ファイルから読み込んだデータ

Ω N RN : 定 NF 円の中心座標を Ω N、半径を RN を計算するシート

NF circle : 指定した周波数の Ω N、RN から、円周の座標を計算するシート

NF1 ~ NF6 : Mr.Smith 用 csv ファイルデータ

となっています。(図 4 参照)

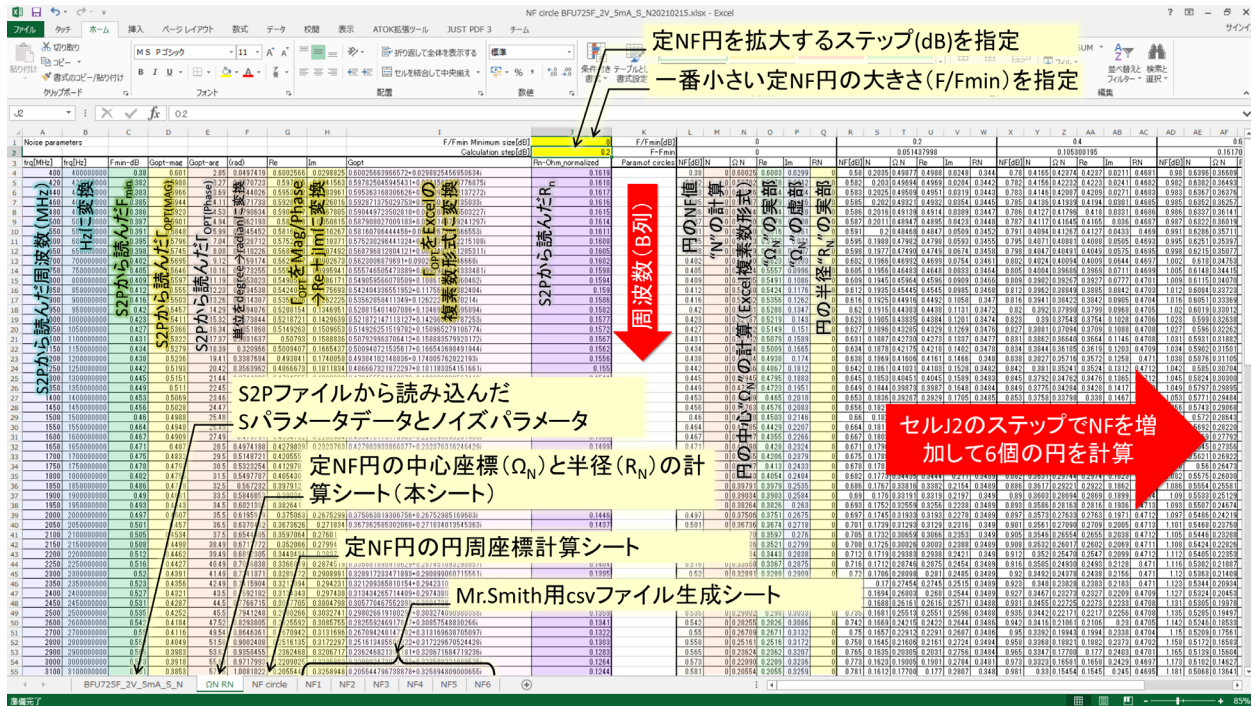


図 4 "NF circle BFU725F_2V_5mA_S_N*****.xlsx" の「Ω N RN」ワークシート

(1) Ω N RN シート

図 4 に Ω N RN シートを示します。このシートではメーカーが提供する S2P ファイルからパラメータを読み込み、(式 2-1) ~ (式 2-3) を用いて、周波数毎に 6 パターンの定 NF 円の中心座標 Ω N と半径 RN を計算しています。

図 2 の上中央部の黄色く網掛けされたセル J1、J2 はユーザが入力するセルで、計算範囲を指定します。具体的にはセル J1 に計算する定 NF 円の最小サイズを Fmin+ ○○ dB にするかを、○○の値で入力します。この値を OldB にすると、6 個計算される円のうちの最初の 1 個は、「OPT と重なる」点となりません。セル J2 には、最初の 1 個から何 dB ステップの円を計算するかを dB 値で指定します。例では J1 に 0dB が指定されているので最初の円は「OPT 上の点 (NF=0.38dB)」で、後は 0.2dB ステップで 5 個の円 (0.58dB, 0.78dB, 0.98dB, 1.18dB, 1.38dB) の中心と半径が L 列以降に計算されます。

A ~ B 列は周波数の換算、C ~ E 列は雑音パラメータの読み込みで、F 列で「OPT の位相を deg → rad に変換し G, H 列で Mag / Phase 形式から Re+Im 形式に変換、これを I 列で Excel® の複素数形式に変換しています。J 列の Rn は計算に際しては Z0 で正規化 (rn に変換) する必要がありますが、このデバイスの雑音パラメータは最初から 50 Ω で正規化した値として提供されていますので、単に「BFU725F_2V_5mA_S_N」シートから読み込むだけの処理となっています。

L 列以降は定 NF 円の中心座標 Ω N と半径 RN の計算で、6 列が円 1 個分の計算セル群になります。各セル群の最上部 1 行目に計算する円の NF 値 (Fmin で正規化)、2 行目に N の計算に必要な F-Fmin (真数) の値を計算しています。

以下、代表して L ～ Q 列で説明します。

L 列: Fmin の値と 1 行目の値から実際に計算する NF 値を計算

M 列: (式 2-3) による N 値の計算

N 列: (式 2-1) による円の中心座標 Ω_N の計算 (複素数形式)

O,P 列: N 列を実部、虚部に展開

Q 列: (式 2-2) による円の半径 R_N の計算

(2) NF circle シート

図 5 に NF circle シートを示します。このシートは $\Omega_N R_N$ シートから、B1 セルに入力された行番号の Ω_N と R_N を読み取って、6 個の円周座標 (Re+Im) を生成します。計算された円周座標は NF1 ～ NF6 シートにリンクされていて、各シートを個別に CSV ファイルとして保存し、これを Mr.Smith ※ 1 の「Scale」→「Imported scale」→「Add in Re+Im format…」メニューから読み込めば、Mr.Smith のチャート上に定 NF 円を表示させる事ができます。なお Excel シートをダウンロードして頂いた際の zip ファイルに 6 つの csv ファイルも作成して同梱しています。

座標を生成する周波数を、“ $\Omega_N R_N$ ”シートの行番号で指定する

選択した周波数が表示される

計算用の中間数値(変更しない)

5°刻みで360°分の座標を計算する。

計算結果は、Mr.Smith用の csv ファイルフォーマットで、各シートに保存される。

Frequency	Angle	Re	Im	NF-1	NF-2	NF-3	NF-4	NF-5	NF-6
0	0	0.597825	0.034156	0.841111	0.028393	0.89052	0.024129	0.916564	0.02085
5	0.087266	0.597825	0.034156	0.83988	0.058389	0.88873	0.064935	0.91444	0.068928
10	0.174533	0.597825	0.034156	0.83585	0.088157	0.88340	0.105431	0.90815	0.116639
15	0.261799	0.597825	0.034156	0.82935	0.11747	0.87456	0.145308	0.89776	0.163622
20	0.349066	0.597825	0.034156	0.82035	0.146105	0.86222	0.184263	0.88329	0.208518
25	0.436332	0.597825	0.034156	0.80886	0.173844	0.84665	0.221999	0.86488	0.253978
30	0.523599	0.597825	0.034156	0.79505	0.200476	0.82775	0.258229	0.8426	0.296664
35	0.610865	0.597825	0.034156	0.77886	0.225799	0.80584	0.292677	0.81680	0.337251
40	0.698132	0.597825	0.034156	0.76059	0.249619	0.78098	0.325082	0.78750	0.37543
45	0.785398	0.597825	0.034156	0.74039	0.271755	0.75338	0.355196	0.75499	0.41091
50	0.872665	0.597825	0.034156	0.7181	0.29204	0.72327	0.382791	0.71951	0.443421
55	0.959931	0.597825	0.034156	0.6943	0.310318	0.69086	0.407656	0.68133	0.472717
60	1.047198	0.597825	0.034156	0.66902	0.32645	0.6564	0.429602	0.6407	0.498574
65	1.134464	0.597825	0.034156	0.64239	0.340314	0.6201	0.448462	0.59806	0.520794
70	1.22173	0.597825	0.034156	0.61465	0.351804	0.58245	0.464093	0.55360	0.53921
75	1.309997	0.597825	0.034156	0.58602	0.360832	0.54349	0.476375	0.50770	0.553681
80	1.398263	0.597825	0.034156	0.55670	0.367331	0.50362	0.485216	0.46072	0.564097
85	1.48353	0.597825	0.034156	0.5268	0.37125	0.46312	0.490547	0.41301	0.570379
90	1.570796	0.597825	0.034156	0.49694	0.37256	0.42232	0.492329	0.36493	0.572478
95	1.658063	0.597825	0.034156	0.466948	0.37125	0.381514	0.490547	0.319859	0.570379
200	5.061455	0.597825	0.034156	0.614656	-0.29502	0.582454	-0.41584	0.553604	-0.49751
295	5.148721	0.597825	0.034156	0.642395	-0.28533	0.62019	-0.4002	0.598064	-0.47809
300	5.235988	0.597825	0.034156	0.669027	-0.26966	0.65642	-0.38134	0.64075	-0.45687
305	5.323254	0.597825	0.034156	0.69435	-0.25353	0.690869	-0.3594	0.681337	-0.43102
310	5.410521	0.597825	0.034156	0.71817	-0.23525	0.723273	-0.33453	0.719516	-0.40172
315	5.497787	0.597825	0.034156	0.740307	-0.21497	0.753387	-0.30694	0.754996	-0.36921
320	5.585054	0.597825	0.034156	0.760591	-0.19283	0.780982	-0.27682	0.787508	-0.33373
325	5.67232	0.597825	0.034156	0.778869	-0.16901	0.805847	-0.24442	0.816803	-0.29555
330	5.759587	0.597825	0.034156	0.795001	-0.14369	0.827793	-0.20997	0.84266	-0.25496
335	5.846853	0.597825	0.034156	0.808865	-0.11706	0.846653	-0.17374	0.864881	-0.21228
340	5.934119	0.597825	0.034156	0.820355	-0.08932	0.862284	-0.136	0.883297	-0.16782
345	6.021386	0.597825	0.034156	0.829394	-0.06068	0.874567	-0.09705	0.897768	-0.12192
350	6.108652	0.597825	0.034156	0.835882	-0.03137	0.883407	-0.05717	0.908183	-0.07494
355	6.195919	0.597825	0.034156	0.839801	-0.0016	0.888738	-0.01668	0.914465	-0.02723
360	6.283185	0.597825	0.034156	0.841111	0.028393	0.89052	0.024129	0.916564	0.02085

図 5 NF circle シート

今回使用した BFU725F_2V_5mA_S_N.S2P ファイルには 40MHz ～ 26GHz の S パラデータが収録されていますが、雑音パラメータは 400MHz ～ 16GHz となっていますので、本計算シートは雑音パラメータに合わせて、400MHz ～ 16GHz の範囲で計算しています。

なお細かい話ですが、このファイルの S パラメータには 15GHz のデータがあるのに、何故か雑音パラメータには 15GHz のデータが存在しません。従って 14.8GHz 以上の周波数については、S パラメータのセル参照が不連続になっています。本シートを加工して他のデバイスの定 NF 円を計算される場合はご注意ください。

■ 3. BFU725F の定 NF 円をプロットしてみる

では実際に定 NF 円をスミスチャート上にプロットしてみましょう。図 6 は BFU725F の S_{11}^* と Γ_{OPT} を表示させたチャートに 2 章で説明した Excel シートで計算した 6 つの定 NF 円を表示させたものです。

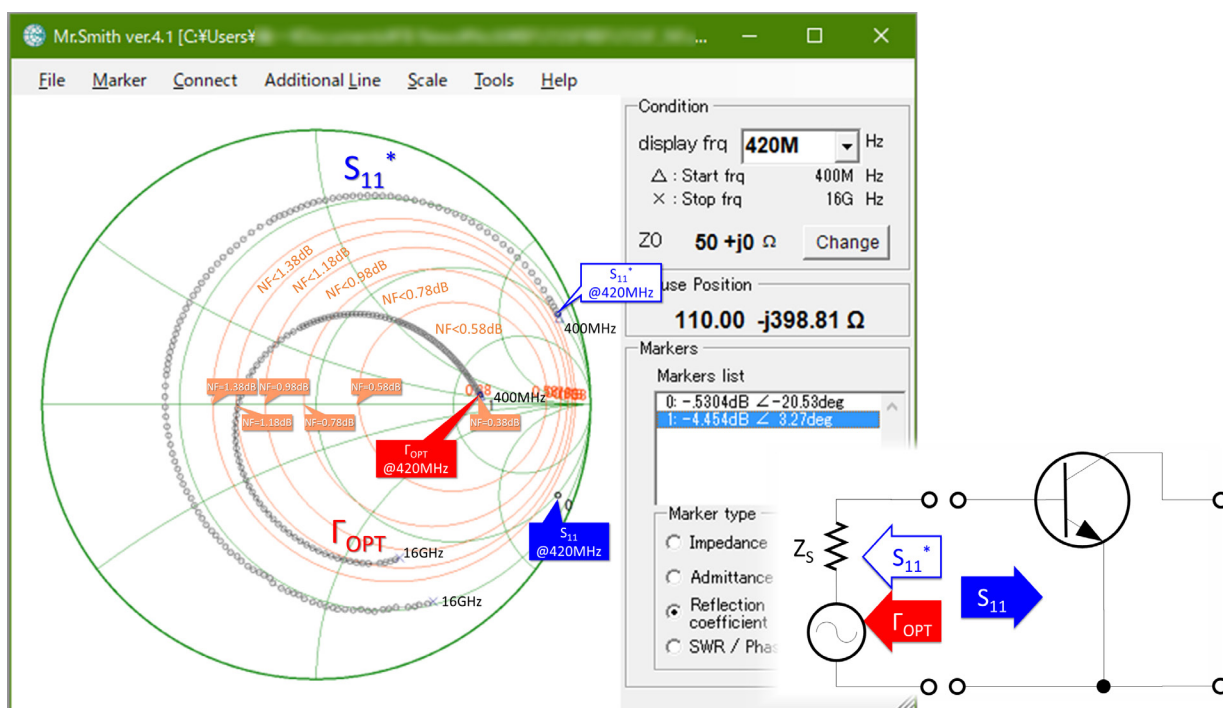


図 6 BFU725F の定 NF 円 (@420MHz)

S_{11}^* のローカスは、 S_{11} を S2P ファイルから変換して Mr. Smith ※ 1 に読み込ませた後、Additional Line → Conjugate point メニューで表示できます。また定 NF 円は 2 章で作成した 6 つの CSV ファイルを Mr. Smith の「Scale」→「Imported scale」→「Add in Re+Im format…」メニューで読み込みます。

2 章の計算シートでは、 Ω N RN シートの J1 セルを 0dB としたので、一つ目の円は 420MHz の Γ_{OPT} マーカに重なる “点” になっています。この点が NF=0.38dB のポイントです。二つ目の円は NF=0.58dB の円ですが、この円の内側に信号源インピーダンスがあれば、このトランジスタの NF は 0.58dB 以下の値になると言うことを、この図は示しています。今回、定 NF 円は 0.2dB 間隔で計算しましたが、プロットされた円は等間隔になっておらず、 S_{11}^* に近づくほど急速に NF が劣化していく様子がお判り頂けると思います。420MHz のマーカ付近を拡大した図を図 7 に示します。スミスチャートの拡大は、マウスカーソルをチャート上においてマウスホイールを回転すれば可能です※ 4。マウスカーソルの位置を中心に拡大する作りになっていない点はご了承下さい。

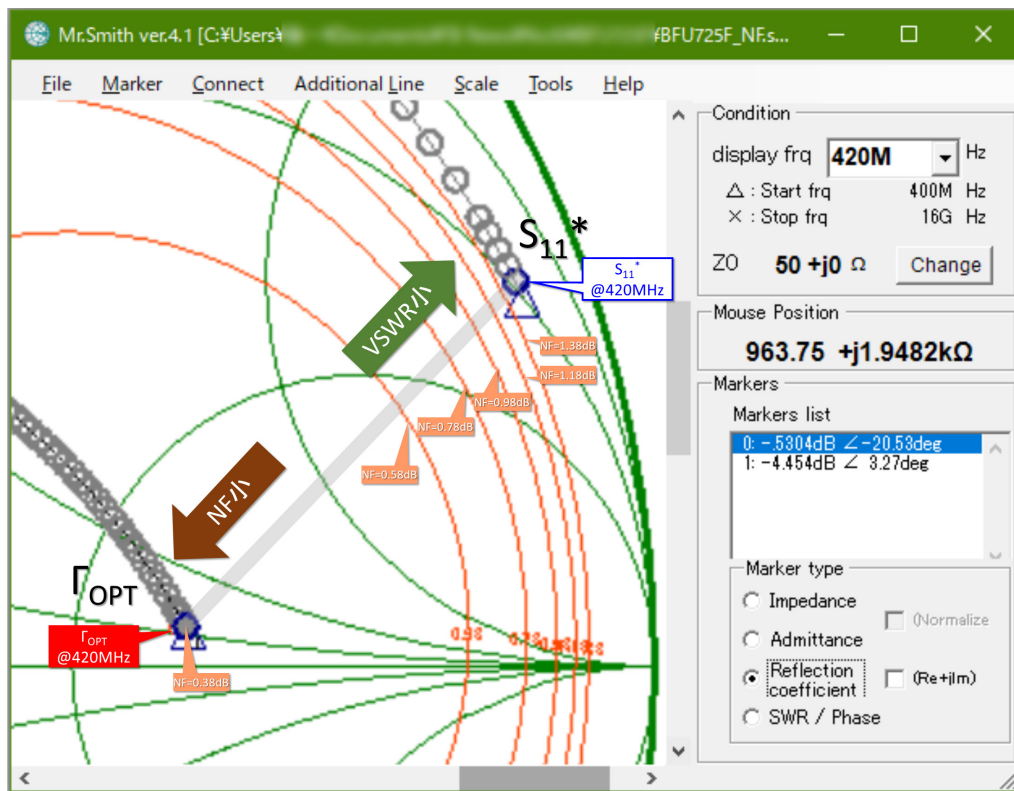


図7 BFU725Fの定NF円 (@420MHz、拡大)

図7をみると、 S_{11}^* のローカスはNF=1.38dBの円(「OPT」から1dB劣化)よりも外側にありますので、 S_{11} に共役整合(VSWRが最小となる条件)させると、少なく見積もってNFはカタログ値から1.2dB程度は悪くな

■ 4. NF と VSWR のトレードオフ

話を第1章で述べた問題点に戻しましょう。最終的にNFとVSWRのトレードオフは図7に引いたグレーの直線上の何処に信号源インピーダンスを変換するかという課題になります。

このトランジスタはNFマッチを行った時の整合誤差に対してはNFの劣化は小さい(等高線の間隔が疎)ですが、共役整合を行った時の整合誤差に対しては、NFは大きく変動することが予想されます。従って高級な回路構成が許されるのであれば入力に低損失のアイソレータを挿入し、精度良くNFマッチを行う事で、(アイソレータ込みの特性で)NF=1~1.5dB程度のLNAとするのが一つの設計解になります。入力のVSWRにあまり制約がなく、かつ信号源のインピーダンスが安定している(実態のあるインピーダンスである)場合は、VSWR=3~5になるように S_{11}^* 寄りのポイントに信号源インピーダンスを変換し、NF=1~2dB程度のLNAを実現するというのが、もう一つの設計解になります。

■ 5. 第30話のまとめ

今回は実用的なLNAの設計について一通りご説明しようと考えていましたが、定NF円とNFマッチ／共役整合のトレードオフについてご説明するので精一杯でした。要約すると以下の通りです。

- (1) トランジスタやFETのNFと信号源インピーダンスの関係は、スミスチャート上で「OPT」を頂点とした等高線グラフで表現できる。
- (2) この等高線一つ一つを「定NF円」と呼ぶ。定NF円はデバイスの雑音パラメータ R_n 、「OPT」、 F_{min} とSパラメータから計算することができる。
- (3) 実際のLNAの設計では、定NF円の分布を見て、NFマッチと共役整合のトレードオフを実施する。

今回は、定 NF 円の分布を確認した結果を踏まえ、BFU725F を用いた 420MHz 低雑音増幅器の設計を完成させたいと思います。

第 30 話は以下の文献を参考にさせていただきました。

Christian Gentili Microwave Amplifiers and Oscillators pp.52-57 McGraw-Hill 1987

※ 1: Mr.Smith ver4.1 のダウンロードはこちらから

<https://www.vector.co.jp/soft/winnt/business/se521255.html>

※ 2: Microsoft® ならびに Excel® は米国マイクロソフト社の登録商標です。

※ 3: これら Excel シートに関するご質問についてはご容赦ください。

これら Excel シートの内容に関する知的財産権その他一切の権利は筆者濱田倫一に帰属します。FB NEWS 編集部は筆者濱田倫一の許可を得て本件記事を掲載しております。

また筆者、ならびに FB NEWS 編集部は、これら Excel シートの二次使用に伴う一切の責任を負いませんので、あらかじめご了承ください。

※ 4: Mr.Smith ver4.1 のみの機能です。Ver3.3 では画面拡大はできません。