

【第 28 話】低雑音増幅器 (LNA) のインピーダンスマッチング (その 3・NF マッチ)

濱田 倫一

第 27 話までのお話で、増幅器で取り扱う「雑音」とは何か、ならびに「雑音指数 (NF)」の概念についてご理解頂けたかと思います。低雑音増幅器 (LNA) とは雑音指数 NF が特に小さくなるように設計された増幅器の事です。NF を小さくする為には、増幅器の入力回路を NF が小さくなる設計にする必要があります。具体的には入力整合回路の設計を「NF マッチ」と呼ばれる設計にします。第 28 話では、この「NF マッチ」についてご説明します。

■ 1. トランジスタのノイズパラメータ

トランジスタ (FET を含む) の NF はデバイス構造で一意に決まるものではなく、動作点 (コレクタ電流 / ドレイン電流) や信号源のインピーダンスで変化します。この特性を示すのが「ノイズパラメータ」です。ノイズパラメータはその使い方が単純な割に理論は少々難解なので、まずは結論からお話します。低雑音増幅器の設計に際しては、入力回路のインピーダンス整合を NF が最小となる条件 (関係) にする必要があります。この整合設計を NF マッチと呼びます。

NF マッチを行うために必要なデバイスパラメータを「ノイズパラメータ」と呼び、通常デバイスメーカーから提供されるのは以下に示す 3 種類のパラメータです。

- ① NF、または F_{min} : そのデバイスの最小雑音指数 [dB]
- ② Γ_{OPT} : F_{min} となる信号源インピーダンス
- ③ R_n : 等価雑音抵抗 [Ω]

上記以外に G_n : 等価雑音コンダクタンス [S] という諸元もあるのですが、他のパラメータから導出できるため、デバイスメーカーから提供されることはありません。察しの良い方はお判りになったのではないかと思います、「NF マッチ」とはデバイスから見た信号源インピーダンスが Γ_{OPT} になるようにインピーダンス変換する設計のことを示します。

■ 2. ちょっと困ったことが …

ここで実際のデバイスのノイズパラメータの例として、これまで本連載の題材として取り上げてきた 2SC3356 のノイズパラメータをご紹介する予定だったのですが、2SC3356 のデータシートには $NF (=F_{min})$ 以外のノイズパラメータは掲載されていません。ノイズパラメータは S パラメータ同様、メーカーのホームページからダウンロードできることになっているのですが、先日 Renesas のホームページを見たところ 2020 年 11 月 28 日付けで整理されており (図 1)、S パラメータやノイズパラメータがダウンロードできなくなっていました。まだ流通しているのに … と思いつつも EOL 品なので文句は言えません。と思いつつも EOL 品なので文句は言えません。

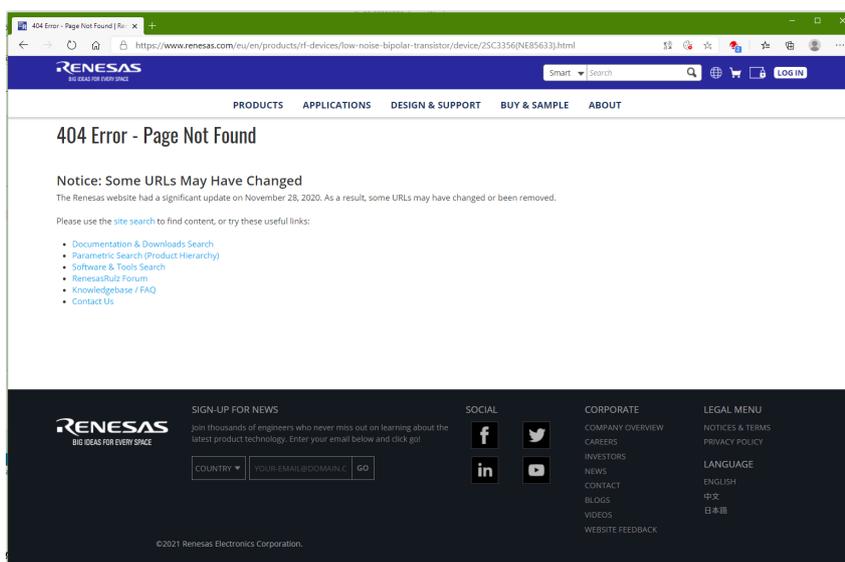


図 1 困ったことに …

セカンドソースを供給しているメーカーはデバイスパラメータまで提供していないようなので、代替になるデバイスを探しました。今回はオランダ NXP 社製の SiGe バイポーラ NPN トランジスタ BFU725/N1 を題材としてご説明することにします。このトランジスタは Digi-key 他で扱われており、¥50 程度で入手できるようです (図 2)。SiGe デバイスだけあって低電圧動作で高周波特性が非常に優れており、MSG のグラフを見ても使いやすいようなトランジスタです。但し $I_c > 10\text{mA}$ の領域では出力インピーダンスが負性抵抗を示しており、あまり出力を出そうとすると不安定になりそうです。

このトランジスタのデータシートと S パラメータ / ノイズパラメータは下記 URL からそれぞれダウンロードすることが可能です。

【データシート】

https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BFU725F_N1.pdf

【S パラメータ / ノイズパラメータ】

<https://www.nxp.com/products/radio-frequency/rf-discrete-components-low-power/rf-wideband-transistors/6-18-ghz-wideband-transistor/npn-wideband-silicon-germanium-rf->

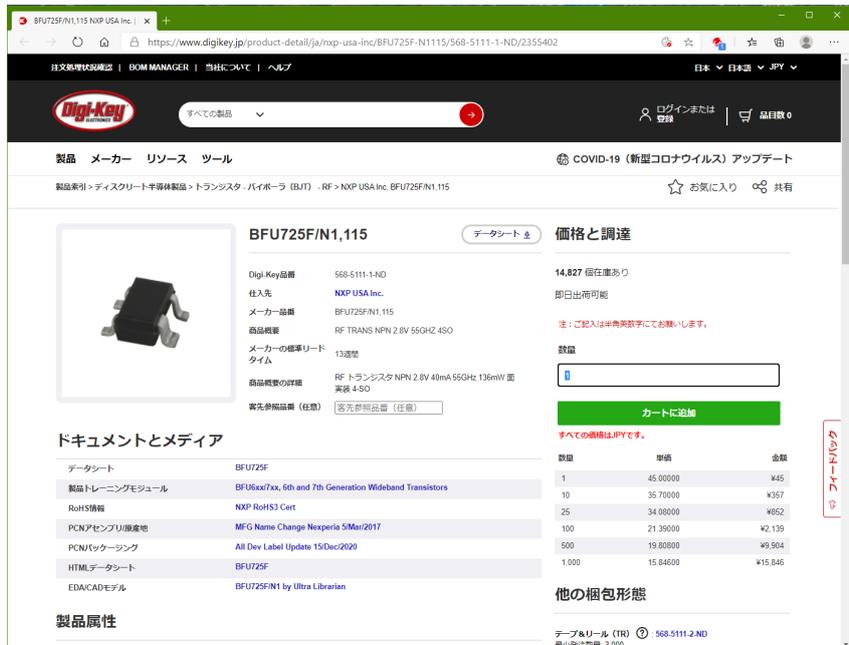
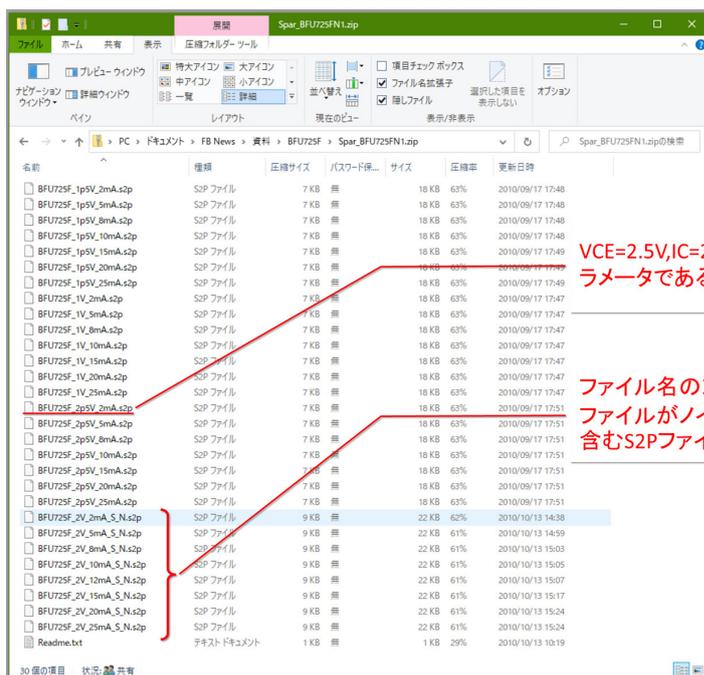


図 2 SiGe NPN 低雑音トランジスタ BFU725F/N1 (NXP)

■ 3. BFU725F のノイズパラメータ

ここから先は BFU725F を題材にして話を進めます。NXP のサイトから提供された S パラメータ / ノイズパラメータのアーカイブファイルを開くと、実に多くの動作条件で取得されたパラメータファイルが含まれていました (図 3)。



VCE=2.5V, IC=2mAの時のSパラメータであることを示す。

ファイル名の末尾が"N"のファイルがノイズパラメータを含むS2Pファイル

日本のメーカーが提供する設計データと比較すると、(たかだか数十円のデバイスなのに) 正に至れり尽くせりで、日本メーカーの凋落ぶりを肌で感じた気分です。このうちファイル名の末尾が "_N" となっているものに、ノイズパラメータが含まれています。

図 3 ダウンロードした S パラメータ / ノイズパラメータファイル

ここでは $VCE=2V, IC=5mA$ を動作点に選ぶこととし、BFU725F_2V_5mA_S_N.s2p を使用して設計を進めます。

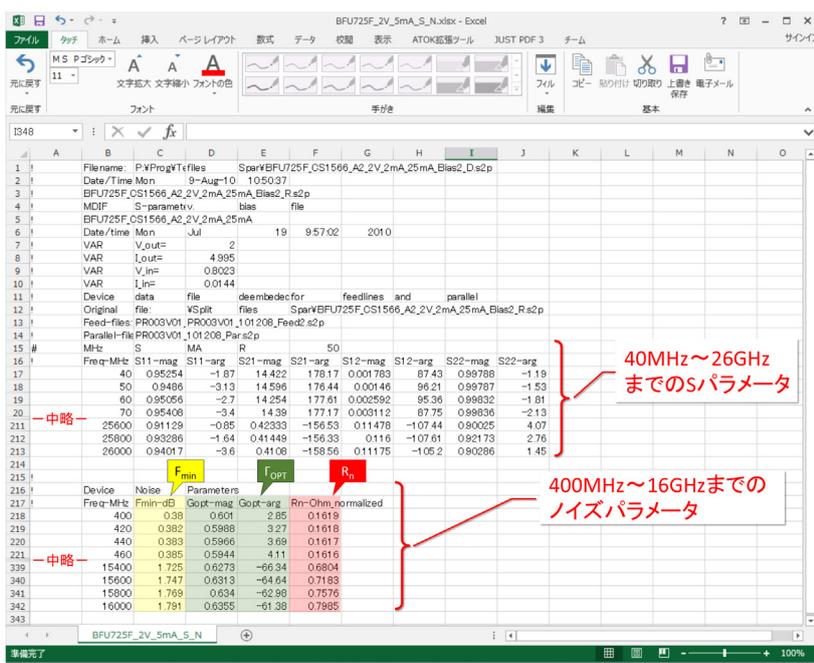


図4は第10話でご紹介した手順でMicrosoft Excel®に読み込んだBFU725F_2V_5mA_S_N.s2pファイルです。

図4 BFU725F_2V_5mA_S_N.s2pの中身

216行目以降がノイズパラメータで、C列がFmin、D列とE列が Γ_{OPT} (振幅と位相角)、F列が50ΩでノーマライズされたRnです。Sパラメータほど広帯域のデータは提供されていませんが、400MHz~16GHzまでのパラメータが提供されています。このトランジスタは信号源のインピーダンスが Γ_{OPT} の時、最も小さなNFになり、そのときのNFはFminとなる・・・というのがノイズパラメータの直接的に示す情報です。例えば

さい値になり、その大きさは0.38dBになることを示しています。では Γ_{OPT} とS11はどのような関係にあるのでしょうか。両者をMr.Smith※1にプロットした結果を図5に示します。表示方法はSパラメータを表示させる方法の応用なので、第10話を参考にしてください。

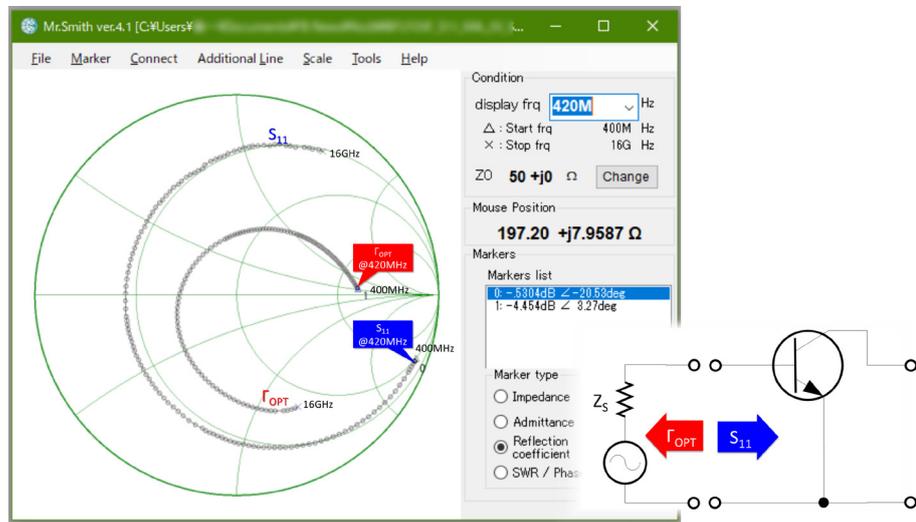


図5 Γ_{OPT} をMr.Smithに表示させる

S11と Γ_{OPT} を比べると、周波数が上昇したときの軌跡の回転方向が逆になっています。これは図の右下に示す通り、S11がトランジスタ側の反射係数を観測・表記しているのに対して Γ_{OPT} は電源(信号源)側を観測・表記している為です。イメージを掴みやすくするために、図6にS11、 Γ_{OPT} に加えて Γ_{OPT} のConjugate(複素共役)マーカを表示させた図を示します。 Γ_{OPT}^* (Γ_{OPT} のConjugate)というのは実体の無い軌跡ですが、この軌跡を見るとNFマッチとは、このトランジスタの入力インピーダンスS11の軌跡の内側にNFが最小となるインピーダンス(整合対象)のようなもの(Γ_{OPT}^*)が存在していて、それと共役整合させる操作である・・・とも考えられます。

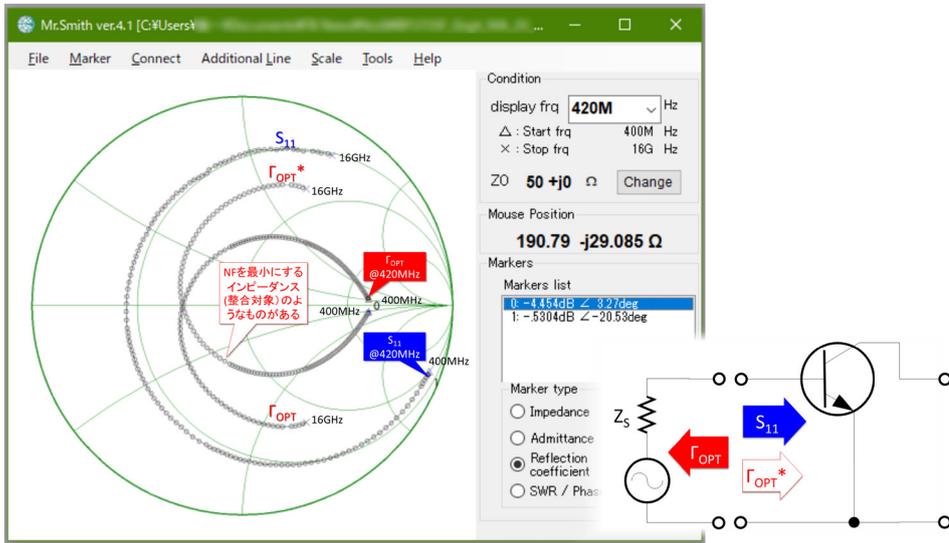


図6 仮に Γ_{OPT}^* を想定してみると...

■ 4. LNA を設計してみる

では BFU725F を用いて 400 ~ 440MHz 帯の低雑音増幅器 (LNA) を設計してみましょう。入出力端子のインピーダンスはこれまでと同様 50 Ω で設計することとします。デバイスの動作点は冒頭で述べたとおり $VCC=2V, IC=5mA$ とします。LNA の設計の基本は入力整合回路を NF マッチとし、出力整合回路は入力に Γ_{OPT} が接続されたときの S_{22}' に対する共役整合となります。

(1) Mr.Smith で NF マッチを行う

入力回路を共役整合させるときの考え方は、第 16 話でご説明したとおり、トランジスタの S_{11} (または S_{11}')... 負荷インピーダンスに相当を入力端子のインピーダンス... 信号源インピーダンスに相当の複素共役に変換する (平たく言えば S_{11} を 50 Ω (の複素共役) に変換する) でした。これに対して NF マッチは信号源インピーダンスを Γ_{OPT} に変換する... 今回の場合は 50 Ω を Γ_{OPT} に変換するという設計になります。最初の手順はインピーダンス変換のゴールである Γ_{OPT} をスミスチャート上にプロットする作業ですが、実際に整合設計を行うに際しては 400MHz から 16GHz までのデータを全て読み込むとインピーダンス軌跡がぐるぐる

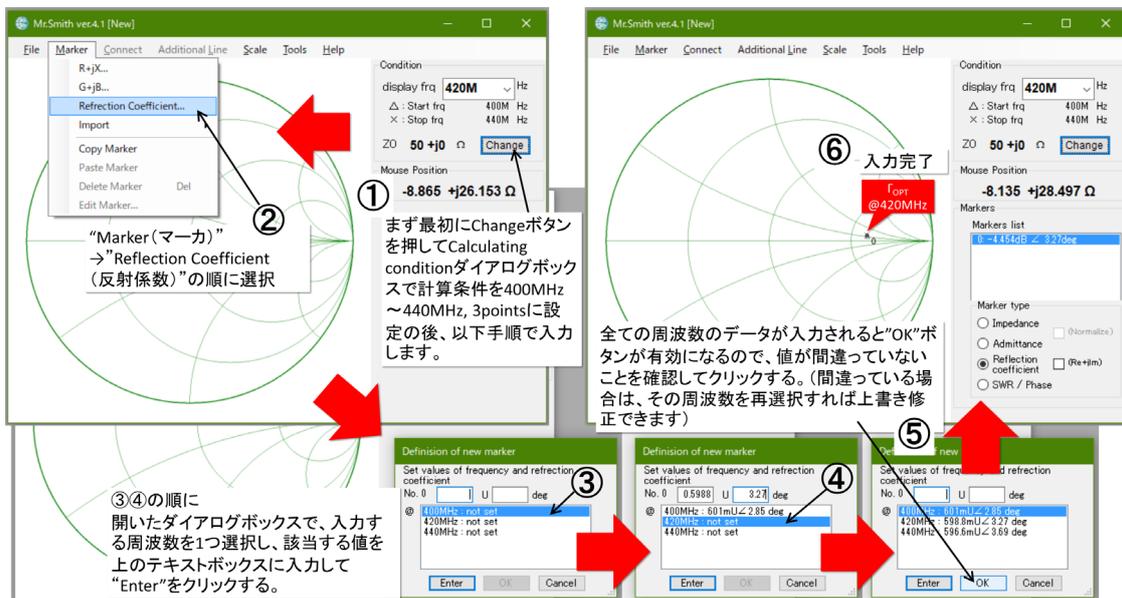


図7 Γ_{OPT} を手打ちで入力する

次の手順は 1 番マーカに信号源インピーダンス $Z_S(50 \Omega)$ を設定し、ここから中心周波数 420MHz で先に設定した 0 番マーカの値に向かって変換してゆきます。設計結果の一例を図 8 に示します。

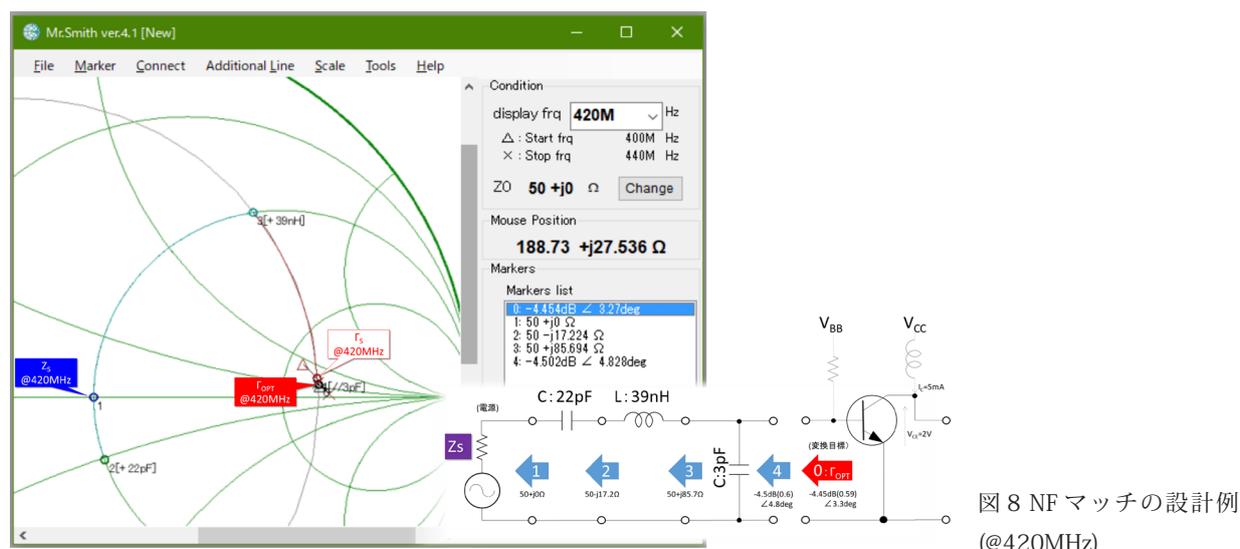


図 8 NF マッチの設計例 (@420MHz)

第 27 話で解説したとおり、入力のインピーダンス整合回路の損失は増幅器の NF を、その損失分だけ劣化させます。従って余程の事情が無い限り、NF マッチの回路はシンプルな構成を選ぶべきです。入力にはベースバイアス回路 (図 8 の V_{BB} と書かれた部分) が存在するので、入力に直流が加えられた時の事を考慮して入力に結合キャパシタを挿入し 1 段の Low pass 型の変換回路で構成しました。中心周波数においては、信号源インピーダンスは概ね Γ_{OPT} に変換できていますが帯域端では少々外れた結果になりました。

(2) 出力整合回路の設計

入力側を NF マッチとしたときのトランジスタの出力インピーダンスは、入力に Γ_{OPT} が接続されたときの S_{22}' となります。入力に Γ_{OPT} が接続されたときの S_{22}' は、第 17 話の (式 2-4) の Γ_S (信号源反射係数) に Γ_{OPT} を代入することで算出できます。第 17 話の最後に「第 16 話の図 7、図 8 の計算に用いた Excel シート」と書かれたリンクからダウンロードできる Excel シートが参考になると思います。 S_{22}' が導出できたら、トランジスタ側が「信号源」、出力端子 (50Ω) 側が「負荷」となりますので、負荷 (50Ω) を信号源 (S_{22}') の複素共役に変換する設計を行います。

既に第 16 話で解説した内容の応用になりますので、ここでは省略します。

■ 5. NF マッチの問題点

次に今設計した LNA の入力端子におけるインピーダンスがどうなったかを調べてみましょう。図 8 と同じ回路を、今度はトランジスタ側から入力端子に向かって辿り、インピーダンスの変化を調べてみます。結果を図 9 に示します。 Γ_{OPT} はあくまで「NF を最小にする信号源インピーダンス」であって、その複素共役 Γ_{OPT}^* が

トランジスタの入力インピーダンスを表している訳ではありません。実際には負荷インピーダンスも 50Ω ではなく共役整合を行っているので、第 16 話～第 17 話で解説したとおり非常に複雑なのですが、図 9 ではとりあえず S_{11} をトランジスタの入力インピーダンスとして計算しました。この時の入力端子のインピーダンスは約 5Ω 、VSWR は 10 を超えています。NF を小さくしようとすると入力の整合状態は悪くなるのです。

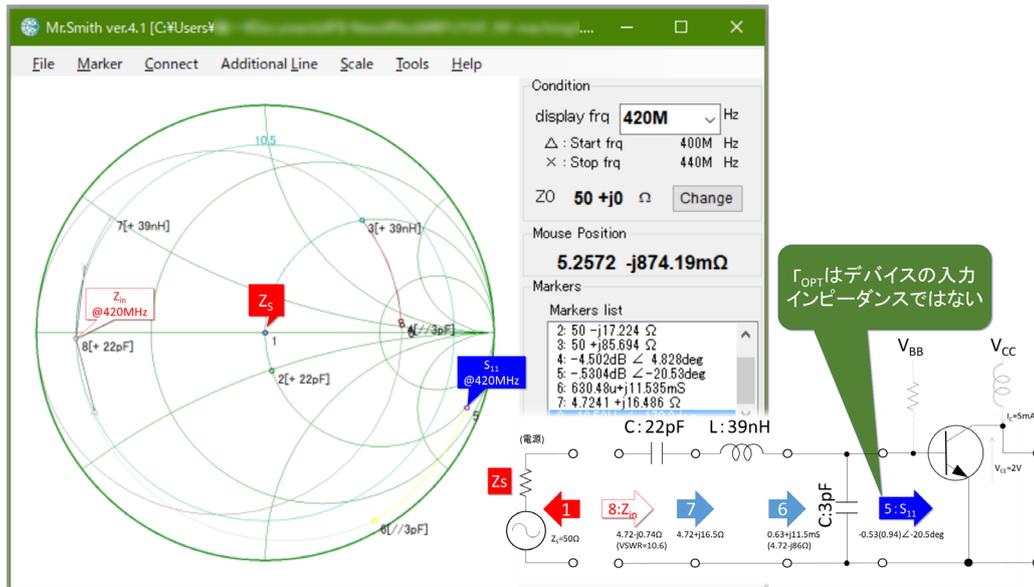


図9 NF マッチを行ったときの入力インピーダンス

増幅器にとって入力の整合状態が悪いと言うことは、発振リスクが高いということになります。今回は割愛しましたが、中和等の単方向化 (S12 をキャンセルする設計) が困難な場合は、NF マッチの前に Γ_{OPT} が入力側のスタビリティサークルの安定領域に入っている事を確認する必要があります。→第 20 話～第 21 話参照。また入力の整合状態が悪い、つまりリターンロスが大きいと言うことは、増幅器の入力損失が大きい事と同じになるので、NF マッチを行った結果生じる入力損失の増加と NF マッチを採らない結果発生する NF の劣化が拮抗する場合は NF マッチを行う意味が無くなる場合があります。さらに (良くある話ですが) 設計仕様として入力インピーダンス 50Ω 、 $VSWR \leq 2$ などの要求がある場合は、アイソレータなどの挿入が必要になってしまい、これまた損失増加で NF マッチを行う意義がなくなってしまう場合があります。

また NF マッチの設計は接続される信号源インピーダンスが実際に存在する事が前提なので、第 24 話、第 25 話で述べたように、ここにフィルタなどの影像インピーダンスが接続されたりすると、相手方の回路も含め双方の特性が乱れる場合があります。

筆者も駆け出しの頃、NF マッチを行って LNA を試作してみたものの、結局調整過程で 50Ω に共役整合させてしまった経験があります。このように LNA の設計の難しさは NF マッチで暴れる入力インピーダンスとどのように折り合いをつけるかというところにあります。

■ 6. 第 28 話のまとめ

第 28 話では、デバイスのノイズパラメータについてご紹介し、その意味には深く触れずに、とりあえず「NF を最小にする "NF マッチ" とはどのようなものか」について解説しました。

要約すると以下の通りです。

- (1) トランジスタや FET 等のデバイスには、S パラメータと別にノイズパラメータというものが存在する
- (2) 低雑音増幅器 (LNA) を設計する際は入力のインピーダンス整合を NF マッチとする。
- (3) NF マッチとは信号源インピーダンスをデバイスの Γ_{OPT} に変換する事である。
- (4) 基本的に NF マッチを行うと入力のインピーダンス整合状態は悪くなる。

通常の増幅器と LNA での設計方法の違いと難しさについてご理解頂けたのではないかと思います。実際にこの難しさを克服するための設計ノウハウについては、メーカー各社で色々な手法を講じているのですが、筆者の知る知識は当然筆者の勤務先のノウハウとなりますので、残念ながらご紹介することができません。とはいえ、この問題に折り合いをつけるための一般的な手法・・・例えば、NF マッチを採るのと共役整合を行うのとどちらが有利か 等の判断を行うための一般的な手法はありますのでご紹介したいと思います。が、そのためには今回ご紹介したノイズパラメータについて、もう少し知っておく必要があります。次回はノイズパラメータとは何かについて、ご説明したいと考えます。

※ 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>