

マイクロ波増幅器設計の基礎

- マイクロ波増幅器設計の勘どころ -

Fundamentals of microwave amplifier design — Tips and hints for microwave amplifier design —

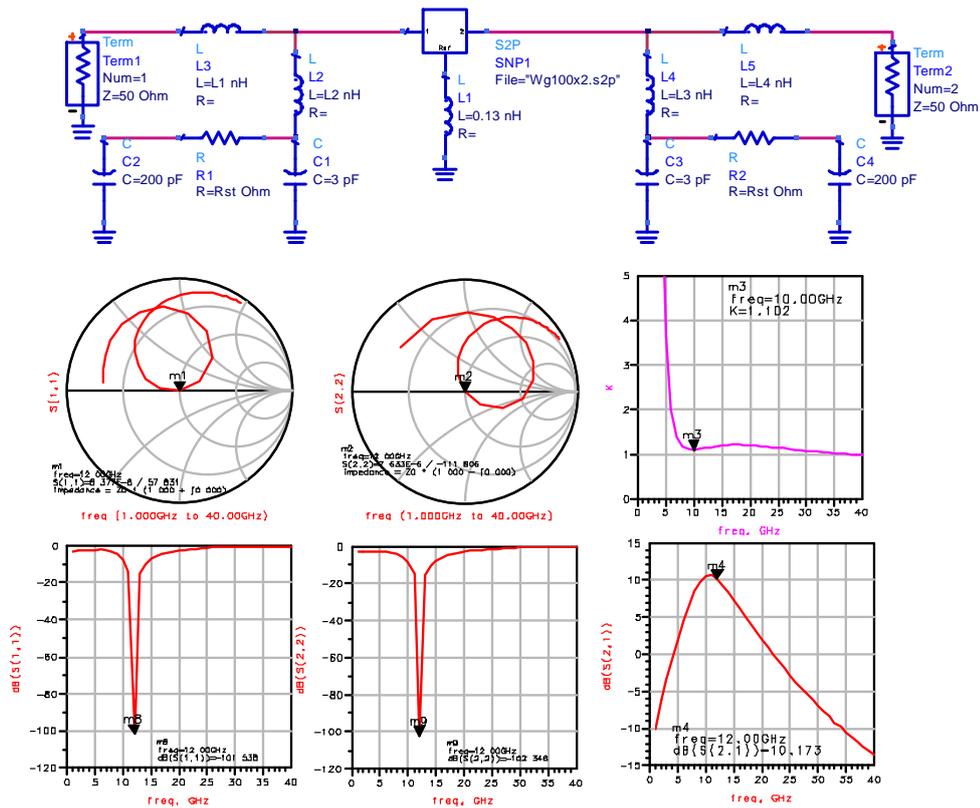
山中 宏治 新庄 真太郎

Koji YAMANAKA Shintaro SHINJO

三菱電機（株） 情報技術総合研究所

概要

増幅器はマイクロ波無線システムにおける必須コンポーネントである。近年では優れた電気性能を有するマイクロ波増幅器製品が安価に入手できるようになってきたが、マイクロ波増幅器の動作の基礎をしっかりと理解していないと、寄生発振や素子破壊などの問題に悩まされることになる。本入門講座ではマイクロ波 CAD を援用しながら、マイクロ波増幅器の設計技術者や使用者が理解すべき基礎的事項について実例を交えながら紹介する。



マイクロ波増幅器の設計例

Abstract

Microwave amplifiers are indispensable components for modern microwave systems. Nowadays, it is easy to purchase good performance microwave amplifier components. Meanwhile, technicians often suffered from technical problems concerning amplifier components, such like parasitic oscillations or device damages. In this course, fundamentals issues which microwave amplifier designers or microwave amplifier users should know are introduced with some examples and microwave CAD demonstrations.

1. はじめに

IoT (Internet of the things) の時代においては、ありとあらゆるものが無線ネットワークで接続される。IoT では同じ規格の送受信モジュールが大量に使用され、IoT のユーザ、あるいはシステム設計者はマイクロ波増幅器を意識することはない。しかしながら IoT デバイスが様々な環境下で使用されたとき、マイクロ波増幅器に起因したトラブルが発生するだろう。したがって、マイクロ波増幅器の設計者でなくても、マイクロ波増幅器の基礎を知っておくことは有用である。

2. マイクロ波増幅器の設計プロセス

下記にマイクロ波増幅器を設計する際の主要なパラメータ (仕様) を示す。増幅器設計においては設計帯域周波数内での電気的特性だけでなく、入出力にどのような負荷が接続されても発振しないことという条件が暗黙のうちに含まれている。マイクロ波増幅器の設計の初期には要求される仕様項目を吟味の上、必要となる設計手順・デバイスモデルを考え、必要なデータを取得していく必要がある。たとえば下記には示さないが、増幅器の温度特性が重要である場合にはトランジスタの温度特性を表現するモデルを自分で構築する必要がある。

<マイクロ波増幅器の主要なパラメータ>

- ・ 設計周波数帯域における利得特性 (最小利得・最大利得・利得周波数偏差)
- ・ 設計周波数帯域における反射特性 (最小入出力反射損失)
- ・ 設計周波数帯域における雑音特性 (最大雑音指数)
- ・ 設計周波数帯域における入出力特性
- ・ 全周波数帯域における安定性
- ・ 回路サイズ・コスト
- ・ 消費電力

図 1 に 1 段の低雑音増幅器を例に典型的な設計手順を示す。低雑音増幅器では通常、出力特性が重要となることは少ないので取得データとしてはトランジスタの小信号 S パラメータと雑音パラメータで十分である。雑音パラメータについては、ソースプル雑音指数測定で 4 つの雑音パラメータが設計周波数帯域内のすべての周波数で求まっていることが望ましいが、時間的な制約や装置の制約・技術的な制約で雑音パラメータを直接求めることが困難なことが

しばしばある。このような場合、使用しようとしているトランジスタを使った低雑音増幅器の雑音指数から雑音モデルを用いて雑音パラメータを推定する。増幅器設計では絶対安定化 (すべての入出力負荷で発振しないようにすること) は最も重要である。発振には (i) 設計周波数帯域近傍での発振, (ii) 高周波領域 (例えば設計周波数の 2~3 倍) での発振, (iii) 低周波領域 (例えば 100kHz~100MHz) での発振がある。このうち低周波での発振はバイアス回路の構成に大きく依存しており、低周波での安定化設計は増幅器を安定に動作させる上で非常に重要である。設計帯域周波数内での電気設計は通常、トランジスタの実測 S パラメータと雑音パラメータを用いて行うが、0.5GHz 以下の S パラメータは測定が面倒 (低周波用のネットワークアナライザが必要) なので、低周波での安定係数の計算は、通常はトランジスタの等価回路モデルを用いて行う

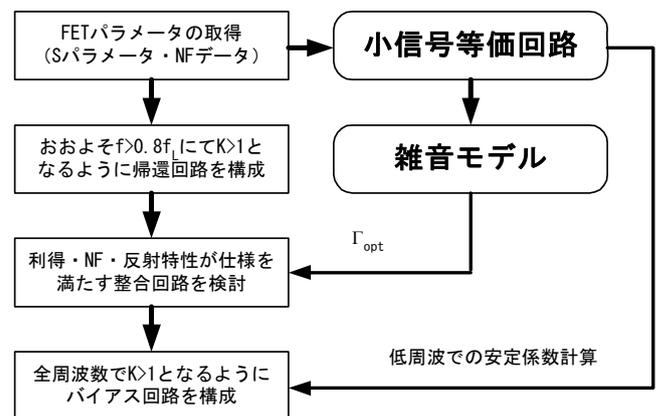


図 1 低雑音増幅器の設計手順

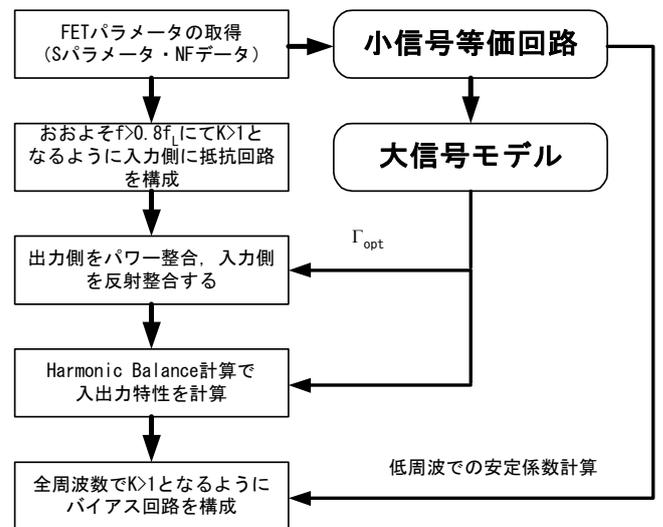


図 2 高出力増幅器の設計手順

図2には1段の高出力増幅器を例に典型的な設計手順を示す。高出力増幅器の場合は雑音パラメータの代わりに大信号特性（入出力-位相特性）を表現するデータが必要となる。現状の大信号モデルはトランジスタの大信号特性を完全に記述できるほど精巧なモデルではないので、設計精度の観点からはロードプル入出力位相特性測定結果によりパワー整合に必要な（トランジスタから見た）最適出力側負荷インピーダンス Γ_{opt} を決定するのが望ましい。しかしながら、ロードプル測定は一般に非常に時間がかかるので、例えばバイアス点の違いによる出力特性の違いを検討したい場合など膨大な時間を要する事となる。また、広帯域の増幅器を設計する際にも各周波数ごとにロードプル測定を行う必要があるので大変である。この点、大信号モデルを用いれば精度の面で若干問題はあるものの、(i) 大信号特性のバイアス依存性が簡単に検討できるので、消費電力と出力トレードオフ検討が容易、(ii) 各トランジスタのロードラインが計算できるので、多段増幅器で出力特性を制限している個所を特定しながら設計を進めることができる、(iii) プロセスばらつきによるトランジスタ特性のばらつきを大信号モデルパラメータのばらつきとして取り入れることにより、設計段階で歩留まりが予想できる等の利点がある。なお、大信号モデルを用いれば増幅器の小信号特性のバイアス依存性が計算可能であるが、**大信号モデルはもともと小信号 S パラメータのバイアス依存性を表現するために作るモデルではないので、正確な計算結果は期待できない。**

3. 増幅器設計の実際

本章では設計周波数 12GHz の反射整合（利得整合）FET 1 段増幅器の設計を通して以下の事を習得する。

- (1) FET データを読み込んでそれを元に反射整合を実現する整合回路を設計する。
- (2) 増幅器を全ての周波数範囲で安定化させる。

3.1 増幅器の安定化

低雑音増幅器 (LNA) を設計する場合、以下の「重要度」の順番を念頭において設計することが望ましい。

- (1) 安定性（寄生発振しない）
- (2) 利得
- (3) 入出力反射
- (4) 雑音指数

とにかく寄生発振を起こしてしまうと何も測れないので、**増幅器を安定にしておくことは非常に重要である。** LNA の場合、不安定になりやすい（寄生発振を起こしやすい）周波数は大きく3つに分類できる。

- (a) 設計周波数帯域前後
- (b) バイアス回路まわりの低周波領域（ $\sim 100\text{MHz}$ ）
- (c) アイソレーションが悪くなる高周波領域

一般に安定性（安定係数）は利得や雑音指数とトレードオフ関係があるので、あまり安定係数を大きくしすぎると性能が出なくなるという問題を起こすので注意。

3.2 FET 特性の把握

増幅器設計に当たっては自分の使用する FET の特性（雑音指数・利得...）をしっかりと把握することが重要である。図3には今回の設計例に使用したトランジスタの電気特性を示す。

3.3 ソースインダクタ装荷による FET の安定化

図3より設計周波数（12GHz）での安定係数 K が 1 以下であるので、まず設計周波数帯域での安定化を検討する。安定化の方法には

- (a) 並列負帰還を用いた安定化
- (b) 抵抗整合を用いた安定化
- (c) 直列帰還（ソースインダクタ）による安定化等があるが、ここでは(c)のソースインダクタ (L_s) 装荷による安定化を用いることとする。

図4に、設計周波数（12GHz）での安定係数 K が 1 以上になるようにソースインダクタを装荷したあとのトランジスタの電気特性を示す。ソースインダクタを装荷し過ぎると、利得が低下することに加え、高周波領域で正帰還を生じて寄生発振を生じる。

どんなに整合回路を構成したとしても最小雑音指数 (NFmin) より雑音指数の低い増幅器を設計することはできない。また、MAG/MSG より利得の高い増幅器を設計することもできない（これ以上に帰還成分を加えないとして）。したがって、上記の値は今後の整合回路を設計して増幅器を構成するときの性能目標の目安となる。

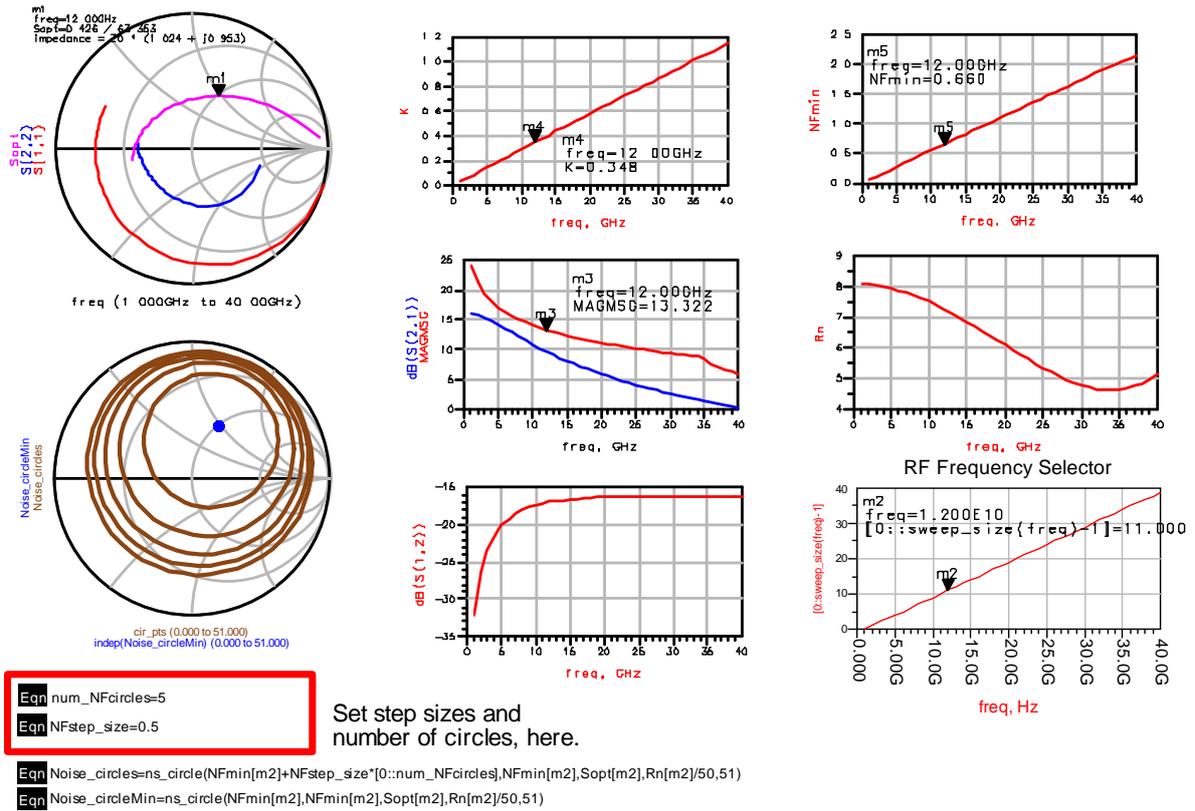


図3 今回設計に使用するトランジスタの電気特性

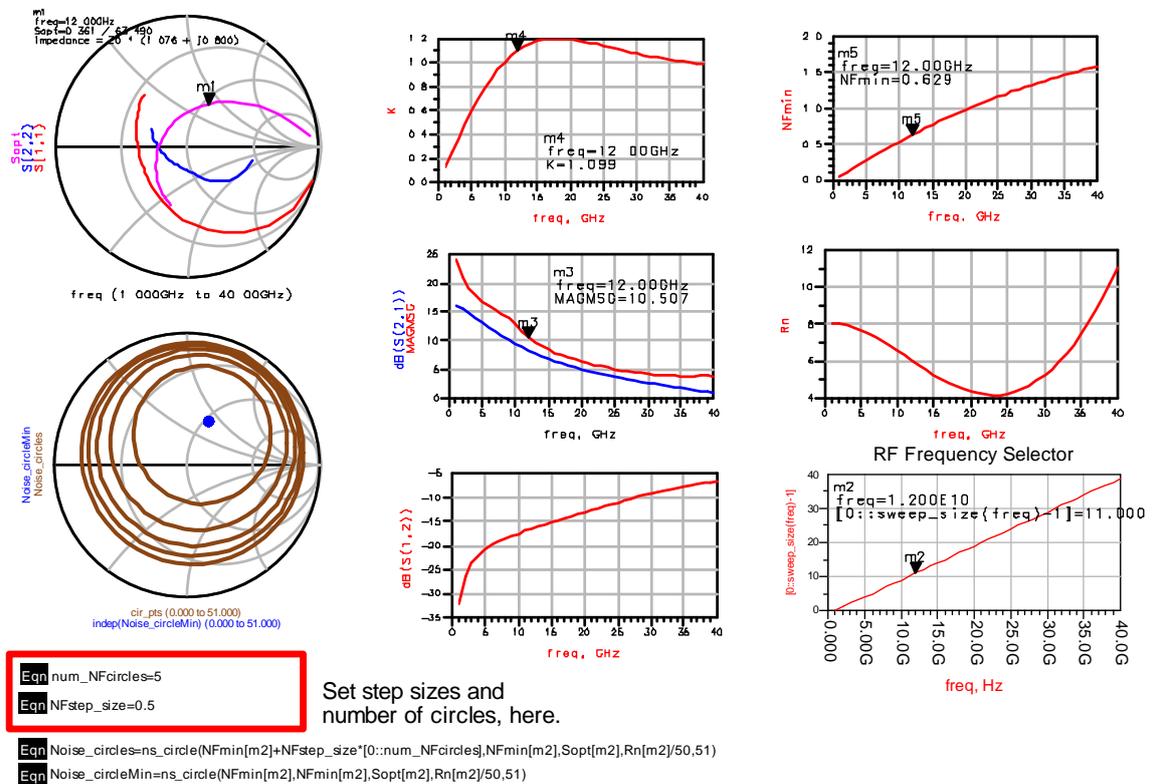


図4 ソースインダクタ装荷により安定化したトランジスタ電気特性

3.3 1段増幅器の入出力利得整合

設計周波数での安定化が得られたので、まず手始めに入出力の同時反射整合を実現する整合回路を設計する。Ls 装荷型増幅器では FET のアイソレーション (S12) が悪くなっているため、入力整合回路を変化させると出力の整合が変化する (逆も同じ)。ここでは入出力同時整合負荷インピーダンス (Z_{mS} 、 Z_{mL}) を用いてスマートに整合回路を構成する。

図5には図4に示した Ls 装荷トランジスタの Z_{mS} 、 Z_{mL} の計算結果を示す。アイソレーションの悪いトランジスタの場合、入出力の整合がお互いに影響を与えるため、入力の整合をあわせると出力の整合がずれ、出力の整合をあわせると入力の整合がずれる。 Z_{mS} 、 Z_{mL} を用いれば、入力側は Z_{mS} を実現するように、出力側は Z_{mL} を実現するように整合回路を設計することで、入出力の反射整合を同時に実現することができる。図6に 12GHz にて入出力反射整合をとったあとの電気特性を示す。

これで 12GHz で完全に反射整合のとれた 1 段増幅器を設計することができた。しかしながら、この回路では DC バイアスをかけることができない。また 10GHz 以下で $K < 1$ なので寄生発振を起こす可能性がある。そこでバイアス回路兼低周波安定化回路を追加する。

3.4 バイアス回路の設計

図7にバイアス回路を含む、1 段増幅器全体の回路構成を示す。図7において C1 および C3 は設計周波数帯域である 12GHz では十分にショートに見える一方で、安定化させたい周波数 (低周波) では高インピーダンスになるように選ぶ。他方、C2 や C4 は低周波で十分にショートに見えるように選ぶ。これにより、バイアス回路は設計周波数帯域においては実質的に無損失となるのに対して、低周波では損失性のローパスフィルタとなり安定化回路として作用する。これで全周波数帯域で安定で、12GHz で完全に反射整合のとれた 1 段増幅器が完成する。図8にバイアス回路まで含めた 1 段増幅器の電気設計結果を示す。

4. まとめ

本基礎講座ではマイクロ波一段増幅器の設計手法を紹介した。

著者紹介

山中 宏治

三菱電機 (株) 情報技術総合研究所, グループマネージャー, Yamanaka.Koji@cj.Mitsubishielectric.co.jp

新庄 真太郎

三菱電機 (株) 情報技術総合研究所, 上級研究員, Shinjo.Shintaro@eb.Mitsubishielectric.co.jp

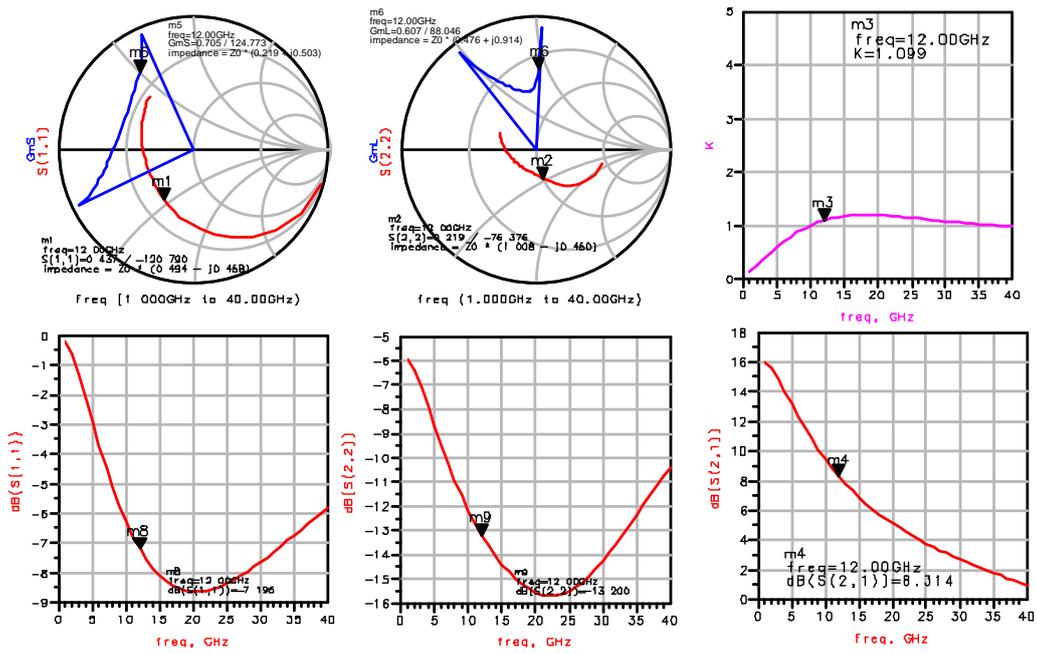


図5 入出力同時整合負荷インピーダンス (ZmS、ZmL) 計算結果

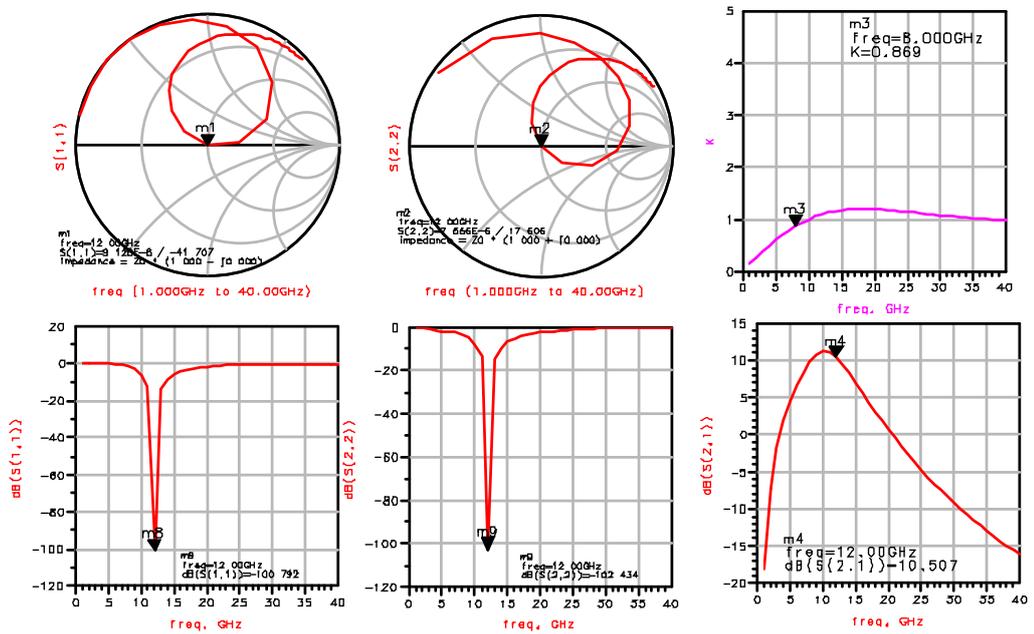


図6 入出力同時反射整合を取った1段増幅器

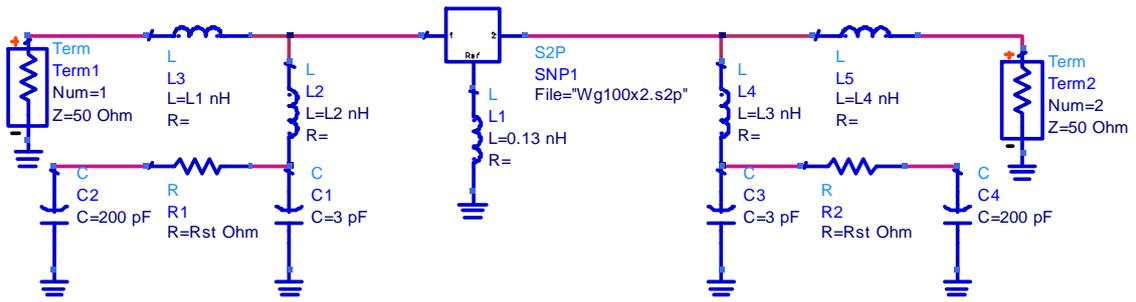


図7 バイアス回路を含んだ1段増幅器回路構成

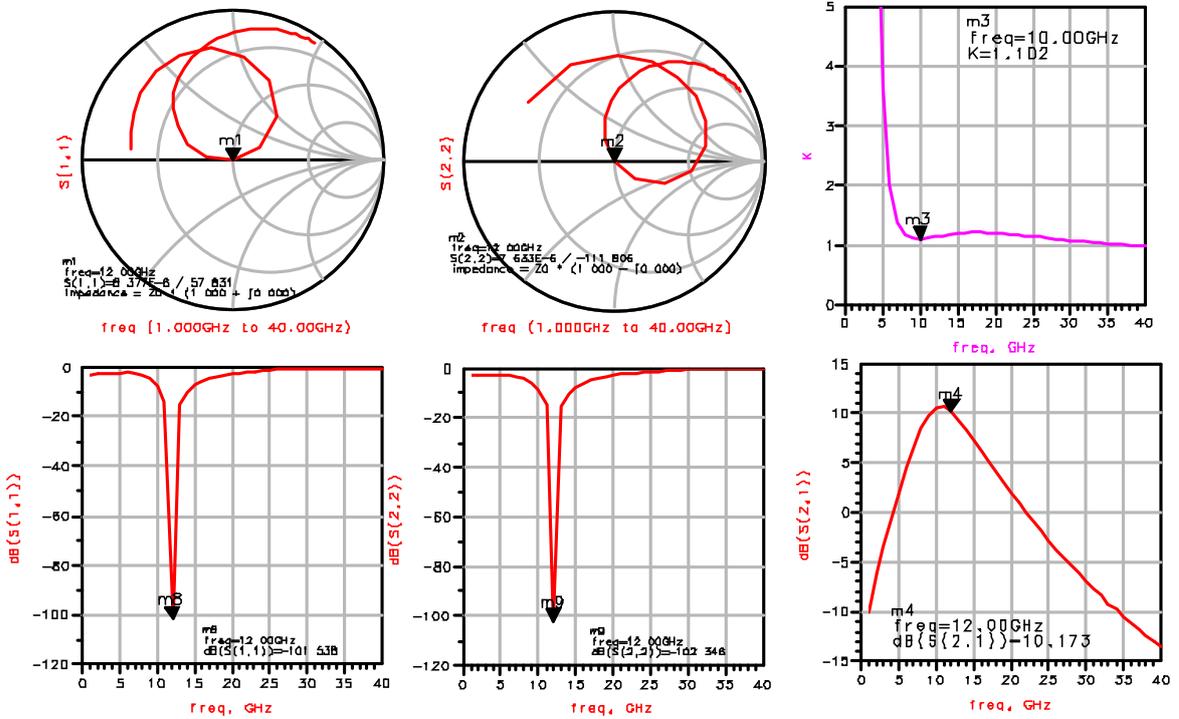


図8 1段増幅器最終電気設計結果

IMPEDANCE OR ADMITTANCE COORDINATES

$Z_0 =$

