

SmartSpiceRFによる 位相ノイズ・シミュレーション

はじめに

マイクロ波回路の性能を決定する主なパラメータは3つあり、ダイナミック・レンジ、感度、および選択性です。最初の2つのパラメータは、デバイスのノイズ指数と線形性で決まります。3つ目の選択性は、主に、信号発生器もしくは信号処理器からのノイズ寄与分に依存します。ノイズ寄与分は一般的に位相ノイズを基準に説明され、位相ノイズは、半導体材料、デバイスの選択基準、および回路設計テクニックに主に影響されます。したがって、非線形性の強い回路において、位相ノイズは重要な特性であり、位相ノイズを正確に予測することは不可欠です。

SmartSpiceRFの特長

自律系回路における位相ノイズのシミュレーションは、次の2段階で行われます。

- 1) 周期的定常状態(Periodic Steady-State: PSS)解析により、生成された信号(キャリア)の発振周波数、振幅(電力)、および形状を求めます。
- 2) 与えられた周波数の側波帯に対してノイズ解析を実行し、デバイスのノイズ寄与による位相ノイズをシミュレートします。

SmartSpiceRFでは、High-Q LC(水晶)タンク・オシレータや、リング・オシレータなど、様々なトポロジを持つ自律系回路を効率的に処理するため、PSS解析に次の2つの手法を採用しています。

- 周波数領域のハーモニック・バランス最適化法 (.HOSCIL 解析ステートメント)
- 時間領域のシューティング法: 任意のシングル・トーン解析とともに使用可能 (.HARM, .HNOISEなどの解析ステートメント)

本稿のシミュレーション例は、50個のMOSデバイスから成り、PLL回路設計の一部である、3GHz帯電圧制御リング・オシレータに適用されました。また、このプロジェクトでは、MOSFET、バイポーラ、ダイオード、配線、および受動素子に関するモデルを含む、TSMC 90nm CMOS ロジック・サリサイド (1P9M 1.0V/3.3V) プロセスが使用されました。

周期的定常状態 (PSS) 解析

PSS解析をバッチプリント・モードでセットアップするには、インプット・デッキに次のドット・ステートメントを記述する必要があります。

- a) ハーモニック・バランス法を使用する場合

```
.hoscil Probe(xi0.feedback2) v(FOUT)
+ Fund_Osc=3GHz nharm=20
+ Newton_Accuracy=highest
+ UseTIG=3 TIGtstop=15n TIGtmax=0.1n
+ oscillator=RING
```

- b) シューティング法を使用する場合

```
.harm v(FOUT)
+ Fund=3GHz nharm=20
+ method=shooting tstab=15n tstep=0.1n
+ oscillator=RING
```

ここで、FOUTは出力ポートの名前、Probe(xi0.feedback2)は指定されたノードに接続されたプローブ、Fund_OscまたはFund <=3GHz>は、推定される発振周波数を示します。

PSS解析をGUIモードでセットアップするには、図1~3に示すダイアログが使用できます。

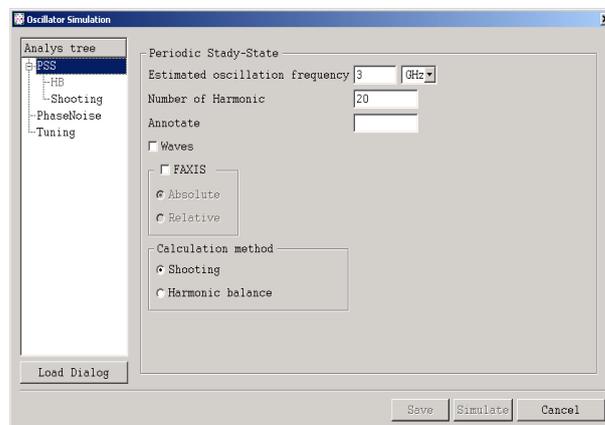


図1: PSS解析のダイアログ

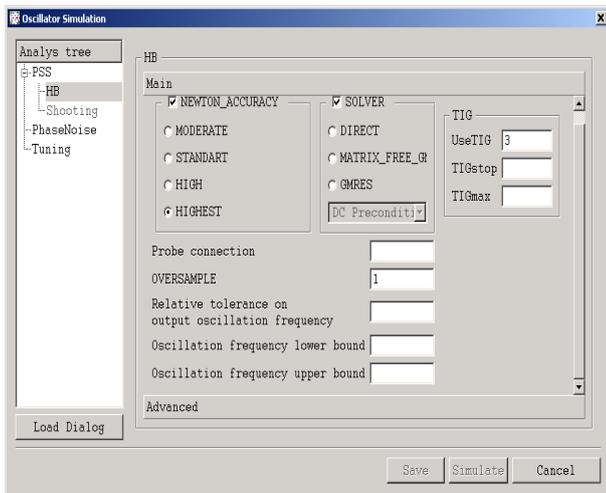


図2: .HOSCIL解析のダイアログ

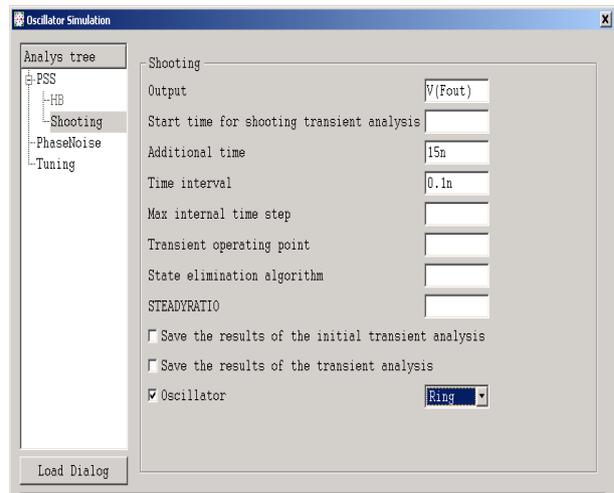


図3: シューティング法のダイアログ

シミュレーション結果は次の通りです。

HOSCIL analysis: Oscillation Frequency = 3051397515.80643 Hz
 Carrier: Power Psig = 2.221370e-01 Wt
 Effective amplitude Ac = 6.665387e-01 V

Oscillator Analysis by Shooting method:
 Frequency of Oscillation Fund = 3.035513e+09 Hz
 Carrier: Power Psig = 2.215548e-01 Wt
 Effective amplitude Ac = 6.656648e-01 V

出力波形を図4に示します。正規化された出力波形およびISF (Impulse Sensitivity Function)のプロットを図5に示します。図5は、出力ノイズ・レベルの増加が非対称な波形に起因することを示しています。

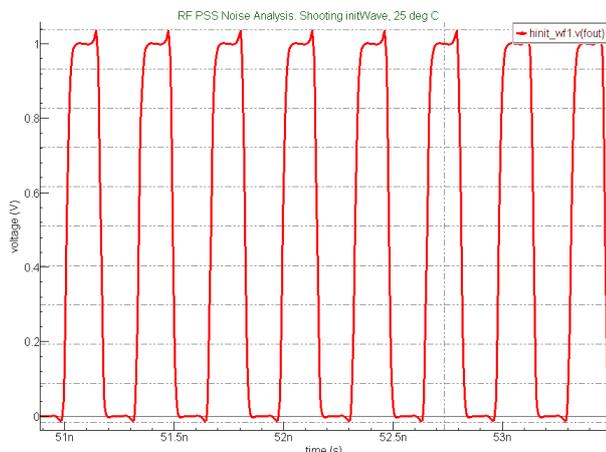


図4: ノードFOUTにおける波形

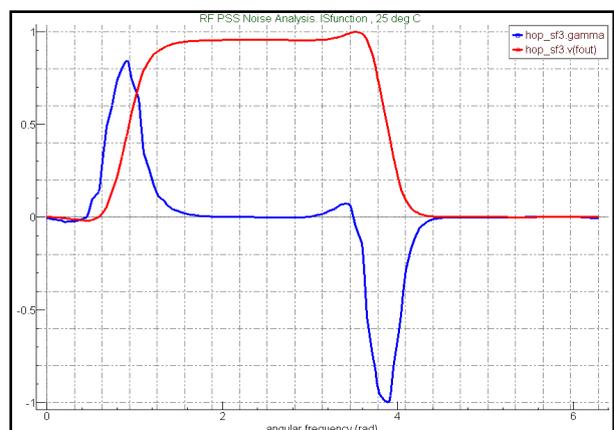


図5: ノードFOUTにおける正規化された波形および ISF (Impulse sensitivity function)

PSS解析とトラブルシューティング

SmartSpiceRFは、シミュレーション精度の高さを保証するために先進の方法とアルゴリズムを採用する一方で、非収束の問題に対応するため、次のような精度パラメータの定義も用意しています。

1. "Newton_accuracy" = <moderate/standard/high/highest>
 一般の回路には"moderate"が、高感度なアナログ回路には"highest"が推奨されます。
2. "MAXITER"
 シューティング法における最大反復回数を設定します。
3. "abstol" "vntol" "reltol"
 ノードの電流および電圧の許容誤差またはその相対値の制御に役立ちます。通常、この値を高く設定すると、精度が高まります。

シミュレーション中に非収束問題が発生した場合、問題の解決に役立つ情報のリストが出力されます。どのような場合でも、まずは、出力された警告やエラー・メッセージを綿密に調査することが重要です。

位相ノイズ・シミュレーション

位相ノイズ・シミュレーションをセットアップするには、周波数領域のシミュレーション・パラメータを、ドット・ステートメントに定義する必要があります(側波帯周波数スイープ、軸のタイプ、出力結果のレベルなど)。たとえば、次のように記述します。

```
.hnoise v(FOUT)
+ DEC_ENG 10 10kHz 1GHz
+ Fund=3GHz nharm=20
+ method=shooting tstep=0.1n tstab=75n
+ Devpts = 1
+ DevCon = 5
+ PhaseNoise
+ oscillator=RING
```

SmartSpiceRFは、出力に対するデバイスのノイズ寄与分とその全ノイズを、次の形式で出力します。

```
Spot Noise Summary (V^2/Hz) at 1 MHz Sorted by Noise Contributors
      Device      Noise Contribution      % Of Total
      m.xi0.xi98.xi4.mm0      8.29033e-17      79.88
      m.xi0.xi98.xi4.mm1      1.59017e-17      15.32
      m.xi0.xi98.xi13.mmn1      1.78661e-18      1.72
Total Output Noise = 1.03781e-16 V^2/Hz
Integrated Output Noise (V^2) Sorted by Noise Contributors
      Device      Noise Contribution      % Of Total
      m.xi0.xi98.xi4.mm0      3.26900e-09      58.256
      m.xi0.xi98.xi4.mm1      2.15835e-09      38.463
      m.xi0.xi98.xi13.mmn1      5.00422e-11      0.892
Total Integrated Output Noise = 5.61149e-09 V^2
```

または、図6の位相ノイズ解析のダイアログを使用します。

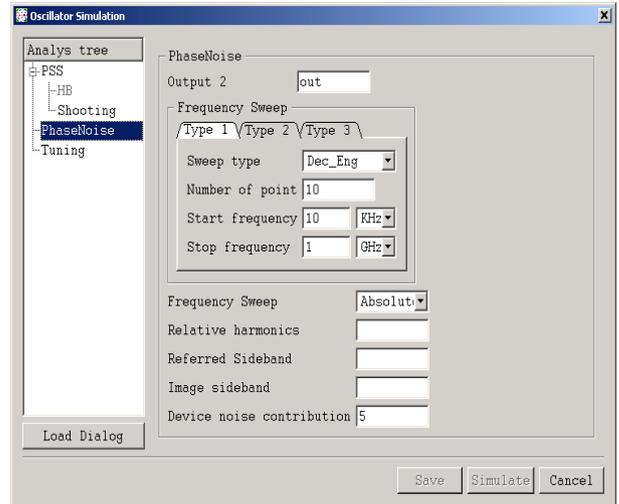


図6: 位相ノイズのダイアログ

すべてのシミュレーション設定は保存可能で、今後のダウンロード、修正、シミュレーション再実行時に利用できます。図7は、保存されたステートメントの例です。

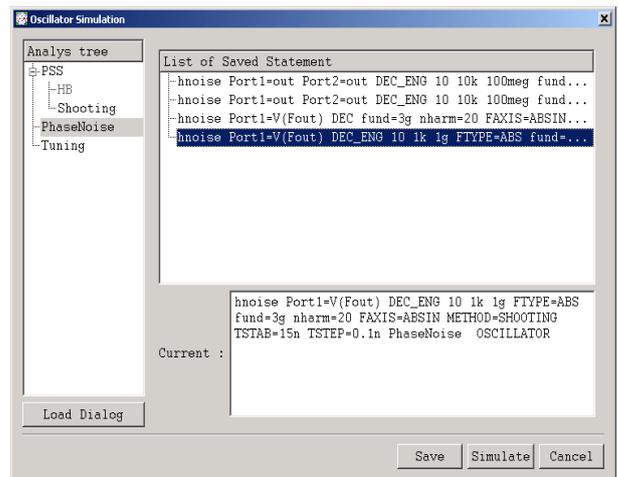


図7: オシレータの解析ステートメントの保存例

SmartSpiceRFで求めた位相ノイズプロット(図8)は、競合他社のベンチマーク結果(図9)と極めて類似しています。

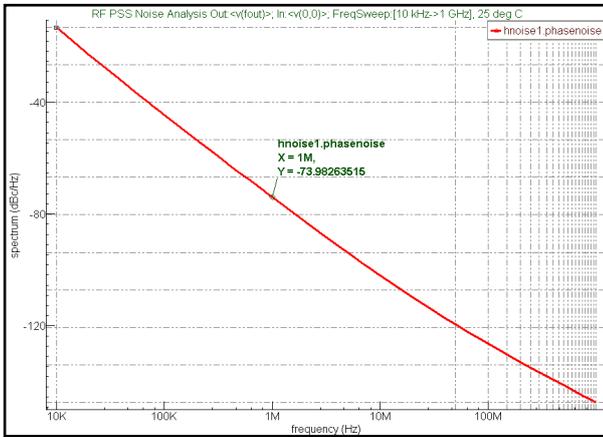


図8: SmartSpiceRFの位相ノイズ・プロット

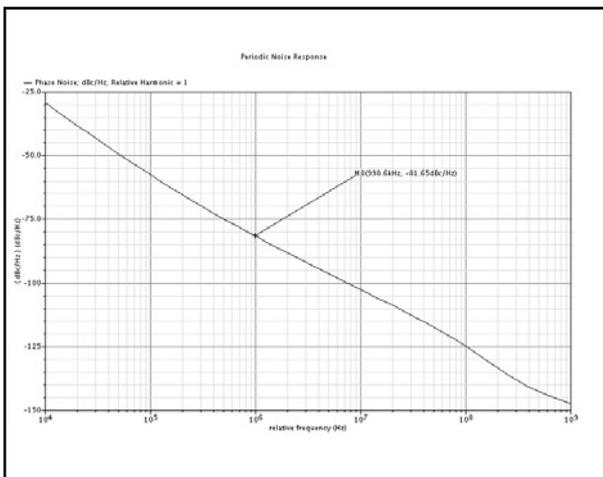


図9: 競合他社ベンチマークの位相ノイズ・プロット

まとめ

本稿では、SmartSpiceRFのオシレータ・シミュレーション機能を説明しました。上記のシミュレーション結果により、SmartSpiceRFが良好な収束性、高い精度、他のツールと比較して高速なランタイムを持つことが分かりました。与えられたオフセットにおいてシミュレートされた位相ノイズは、測定値に極めて近い値です。SmartSpiceの出力ベクタとプロットは、回路設計者が、目標のパラメータまで性能を改善するために使用できます。SmartSpiceRFは、自律系回路のシミュレーションの幅広い用途に利用できます。