

QUEST、UTMOST IV、SmartSpice、 およびSPAYNを使用して、スパイラル・ インダクタのPDKフローを作成

要約

当初のパラメータ抽出ストラテジは、物理的でスケラブルな 2π 等価回路で表現したオンチップ・スパイラル・インダクタ RLC 回路モデルを使用して開発されました。この最適化のみに基づいたストラテジを、インダクタの形状パラメータの関数として、SPICE モデルのパラメータをモデリングするために使用することにしました。本稿で使用したデータは、3次元電磁フィールド・ソルバに実験計画法 (Design of Experiment: DoE) の手法を取り入れて、レイアウト・パラメータを変動させることで得たものです。そして最終的にモデルの検証を行いました。

1. はじめに

能動デバイス (MOSFET など) と同様に、受動デバイス (インダクタやキャパシタなど) においても、正確な SPICE パラメータ抽出は、次に続くデザイン・フローを確実にを行うために重要です。受動デバイスの SPICE モデル・パラメータは、計測またはシミュレートされた S-パラメータから抽出されます。能動デバイスと受動デバイスでは、SPICE パラメータの抽出方法が少々異なります。能動デバイスでは、能動デバイスの形状の変動 (MOSFET の W、L など) を考慮に入れて、ある特定のパラメータ・セットが通常抽出されますが、受動デバイスでは、デバイスごとにパラメータ・セットが抽出され、各 SPICE モデル・パラメータは形状パラメータ (半径やインダクタの巻き数など) の関数として表現されます。本稿では、3次元インダクタ・シミュレーションから、SPICE モデル・パラメータのモデリングおよび検証にいたるまで、QUEST、UTMOST IV および SmartSpice といったシルバコのツールを使用した一連のデザイン・フローを説明します。

2. 3次元インダクタ・シミュレーション

インダクタのシミュレーションは、QUEST (シルバコの3次元電磁フィールド・ソルバ) によって行いました。QUEST でレイアウト情報、プロセス / テクノロジ・ファイルの入力から3次元構造を計算し、RLGC パラメータ、S-Y-Z パラメータ、および Q 値を出力します。QUEST は CEA-LETI (フランス原子力庁 電子・情報技術研究所) との共同開発で緻密に作りこまれた3次元フィールド・ソルバに基づき、Quasi-Static Maxwell 方程式のオリジナルの公式を使用しています。詳細については、

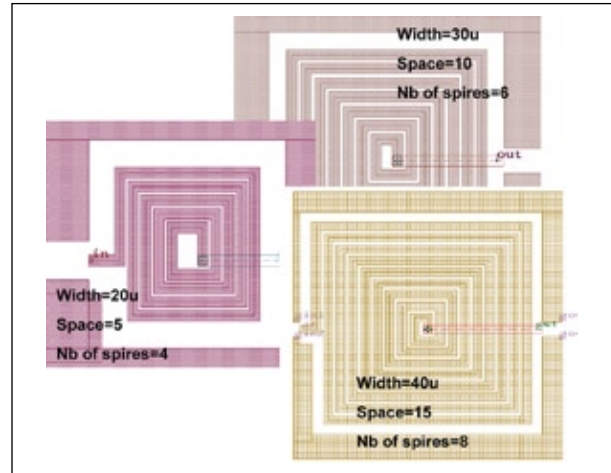


図1:QUESTで自動生成した複数の形状のレイアウト

末ページの参考文献 [1] を参照してください。「1. はじめに」で述べたように、PDK 生成の目的は、設計者が、たとえばインダクタの巻き数と半径を容易に変更でき、それに応じてインダクタンス値を調整できるようにすることです。それを可能にするために、第一段階として異なる形状のインダクタを生成し、シミュレートします。

そのために、シルバコのレイアウト・エディタ Expert の LISA スクリプト言語を直接 QUEST (参考文献 [2]) 内で使用しました。そして、図1のようなレイアウト・パラメータ (半径、配線スペース、配線幅、コイル数) の関数として、一般的なパラメータライズ・インダクタンスの GDS レイアウトを生成しました。QUEST の機能である実験計画法を使用すると、レイアウトの形状パラメータを変動させることができます。これらのレイアウトはマルチ CPU マシンに分散されるので、シミュレーションにかかる時間を最適化することが可能です。インダクタの巻き数と半径を変動させるために、この方法を採用しました。

巻き数は 2 から 4、半径は 40um から 60um としました。レベル 3 完備要因 DoE 手法を使用して、9 つの異なるインダクタを生成しました。シミュレーション結果 (S-パラメータ、Y-パラメータ、Q 値、インダクタンス、抵抗など) は、次に続く SPICE パラメータ抽出のために、UTMOST IV へ直接インポートされます (図 2 参照)。

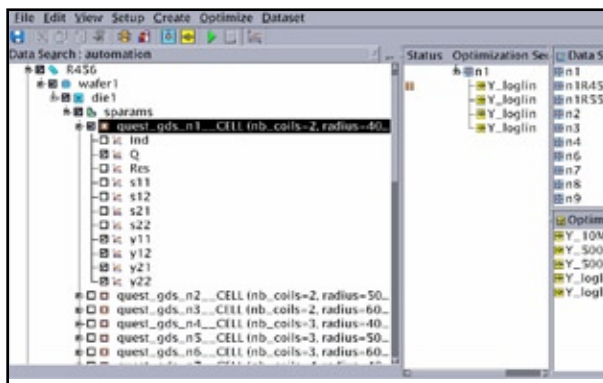


図2:すべてのレイアウトを含むQUESTでのシミュレーション結果は、直接UTMOST IVにインポートされます。

3. SPICE パラメータ抽出

3.1 形状固定モデル

次の目的は、各レイアウトに対してユーザーが定義した電気 SPICE モデルから RLC パラメータを抽出することです。そのために、まず SPICE モデルのシミュレーションを行い、このシミュレーション結果を QUEST で行ったシミュレーション結果と比較する必要があります (たとえば、SPICE シミュレーション結果の Y-パラメータを QUEST で抽出した Y-パラメータと比較)。それはオプティマイザを使用して、SPICE シミュレーション結果と QUEST 抽出結果が一致するまで SPICE パラメータを変動させます。このタスクを遂行するために、UTMOST IV のオプティマイザ・モジュールを使用しました。このモジュールの性能は、接続される SPICE シミュレータの種類 (たとえば、スピードを重視するならば SmartSpice を使用) と、ローカルかグローバルか、いずれかのオプティマイザの選択 (求める精度の条件) に依存します (参考文献 [3] 参照)。このインダクタ例では、周波数に依存しない等価 RLC・SPICE モデルを選択しました (図 3 参照)。このモデルには、UTMOST IV のオプティマイザ・モジュールで抽出されるべき 18

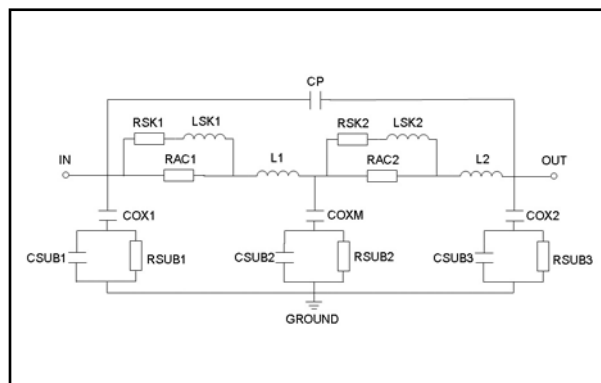


図3:インダクタンス用等価回路モデル

パラメータ (参考文献 [4] 参照) が含まれています。

モデルを記述する SPICE ネットリストは、UTMOST IV で定義し、初期値、最小値、最大値を、図 4 のように各パラメータに対して設定しました。各パラメータの初期値は経験公式 (参考文献 [4]、[5] 参照)、または QUEST のシミュレーションより得ることができます。形状固定モデルの場合、ただ単純に、18 パラメータをオプティマイザに渡し、シミュレーション・データ (Y-パラメータ) と一致する 18 パラメータのベスト・セットを求めます。オプティマイザにはグローバル・オプティマイザであるシミュレートド・アニーリング法を採用しました。複数の最小値を想定し、グローバルな最小値を突き止めます。詳細については、参考文献 [3] を参照してください。オプティマイゼーションのために周波数範囲は、自己共振周波数 (SRF) 以下に保持しました。図 5 は RMS エラーが 3.5% 未満である、良い抽出精度を示しています。

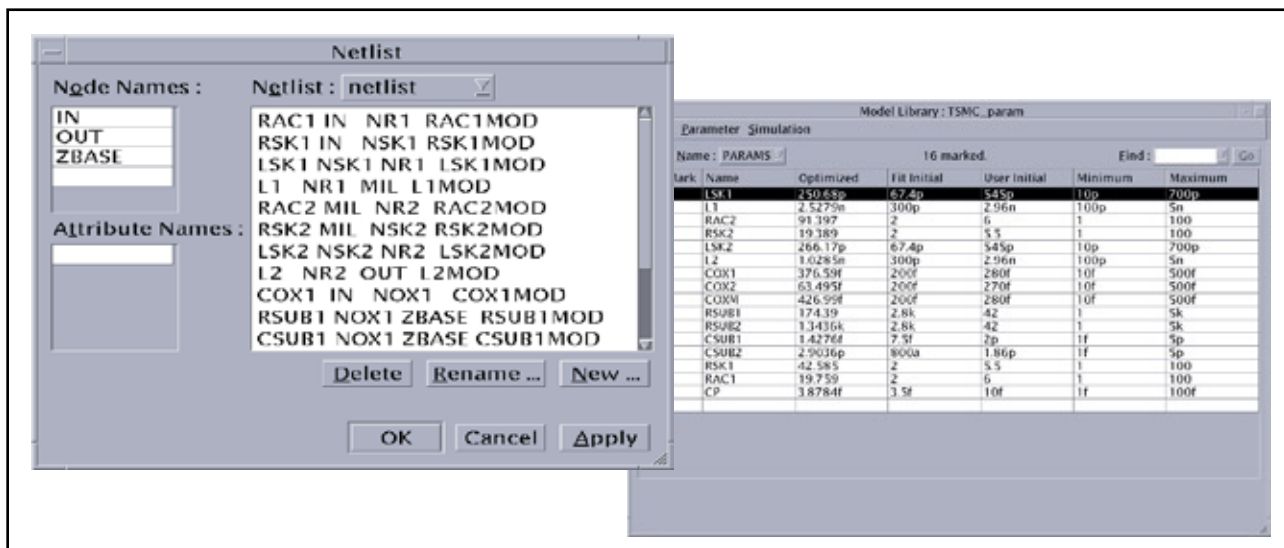


図4: SPICE ネットリストと SPICE パラメータ範囲の定義

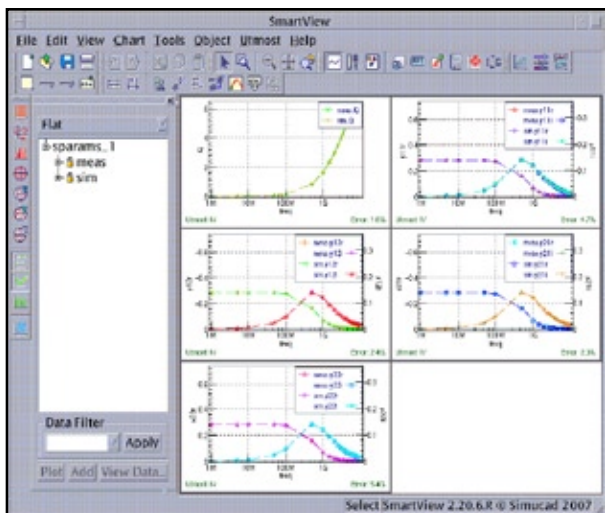


図5: 計測(QUESTシミュレーション)結果と18パラメータをグローバル・最適マイザで最適化した後のシミュレーション結果

3.2 スケーラブル・モデル

ここでの目的は、各インダクタに対する SPICE パラメータを抽出することだけではなく、抽出したパラメータをインダクタの形状パラメータの関数として表現することです。このように、最適化・ストラテジは、設計中の形状レイアウトに従って展開していきます。これまで、インダクタの2つの形状パラメータ（巻き数と半径）を変動させてきました（巻き数：2から4、半径：40umから60um）。最適化のために SPICE パラメータの数をできるだけ少なくする必要があります。

パラメータがそれほど大きな影響を持たない場合、パラメータは同じ値を持ち、または定数になることもあります。そして、最終的にいくつかのパラメータは他のパラメータより導き出すことが可能です。インダクタは対称型なので、RSK1、LSK1、RAC1、COX1、CSUB1、L1 および RSUB1 は、それぞれ RSK2、LSK2、RAC2、COX2、CSUB3、L2 および RSUB2 と同等になります。そこで、 $COXM=2COX1$ 、 $RSUB2=RSUB1*RSUB1/2RSUB1$ および $CSUB2=2CSUB1$ と設定しました。オリジナルの18パラメータのうち、8パラメータのみが残りました。残った8パラメータのうち、大きな影響を及ぼさず、定数に確定できるパラメータがあるかどうかを識別します。抽出する8パラメータを考察しながら、9つのすべての形状から抽出を行いました。SPAYNで統計的な解析を各パラメータに対して実行し、そのうちいくつかのパラメータは統計的分布を表していないことが判明しました。これは UTMOST IV のラバーバンド機能を使用して検証しました。この機能は、8つのパラメータを変動させ、図6のように SPICE シミュレーションにおいて、それらのパラメータの影響をインタラクティブに表示します。

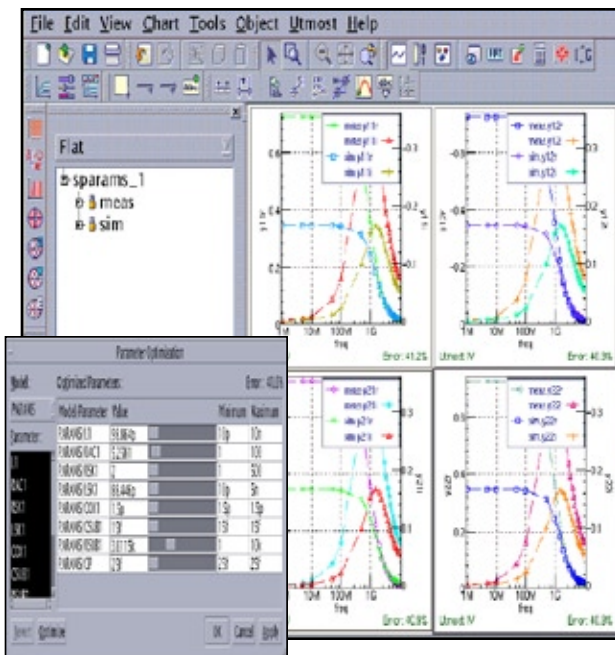


図6: UTMOST IV のラバーバンド機能で SPICE シミュレーションをインタラクティブに表示します。これは、影響を与えないパラメータの特定に非常に便利です。

そして3パラメータが定数として確定しました。それは、 $COX1=2.66pF$ 、 $CSUB1=12.46fF$ 、 $CP=28fF$ です。最終的に抽出する必要があるのは、5パラメータだけになりました。このように自動的に9つの異なるインダクタ形状からパラメータ抽出ができました。結果 (SPICE パラメータと形状インダクタ・パラメータ) をシルバコの統計的解析ツール SPAYN (図7) に直接読み込み、次のステップである統計モデリングおよび検証を行います。

	NB_CONLS	RADIUS	L1	RAC1	RSK1	LSK1	COX1	CSUB1	RSUB1	CP
1	3.000e+00	4.000e+01	9.687e-11	1.093e+00	1.903e+00	9.367e-11	2.660e-12	1.246e-14	1.887e+03	2.800e-14
2	2.000e+00	5.000e+01	1.253e-10	1.403e+00	1.964e+00	8.539e-11	2.660e-12	1.246e-14	3.695e+03	2.800e-14
3	2.000e+00	6.000e+01	1.625e-10	1.433e+00	2.914e+00	1.645e-10	2.660e-12	1.246e-14	1.740e+03	2.800e-14
4	3.000e+00	4.000e+01	1.325e-10	2.524e+00	3.605e+00	2.260e-10	2.660e-12	1.246e-14	1.292e+03	2.800e-14
5	3.000e+00	5.000e+01	1.427e-10	2.735e+00	4.671e+00	2.918e-10	2.660e-12	1.246e-14	1.325e+03	2.800e-14
6	3.000e+00	6.000e+01	1.548e-10	3.183e+00	5.289e+00	3.051e-10	2.660e-12	1.246e-14	1.344e+03	2.800e-14
7	4.000e+00	4.000e+01	1.1802e-10	4.366e+00	6.065e+00	4.030e-10	2.660e-12	1.246e-14	1.158e+03	2.800e-14
8	4.000e+00	5.000e+01	1.1952e-10	4.355e+00	8.311e+00	5.001e-10	2.660e-12	1.246e-14	3.695e+03	2.800e-14
9	4.000e+00	6.000e+01	1.223e-10	4.991e+00	1.784e+01	1.762e-09	2.660e-12	1.246e-14	4.838e+03	2.800e-14

図7: 9つのインダクタ形状からのパラメータ抽出結果

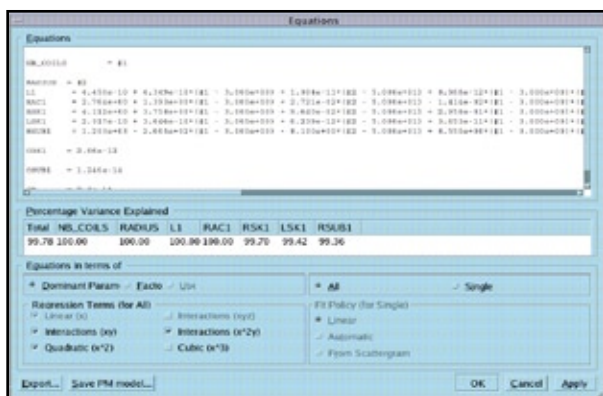


図8: SPAYNによる主成分分析(PCA)の結果

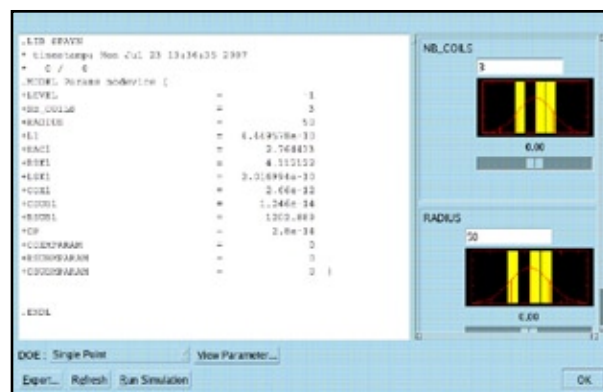


図9: PCA解析で得られた解析モデルから取ったSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーション

4. モデリングと検証

SPAYNには、一般的な度数分布図、散布図(2次元、3次元)、相関行列、回帰モデリング、プロセス監視チャート、および統計的プロセス・コントロール・チャートなどのオプションがあり、インダクタのSPICEモデル・パラメータの解析に使用できます。このようなSPAYNの機能の中で、主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)を採用しました(参考文献[6]参照)。PCAの直接的な結果は、相関性があるパラメータと導き出した独立した成分または因子とを関連付けるための2次方程式システムです。この分析で、2つの独立した有力なパラメータによって、解析されたすべてのインダクタSPICEパラメータの変動の99%以上を説明できることが判明しました(図7参照)。

この有力なパラメータとは、図8で示すように巻き数と半径です。結果として、残り5つのSPICEパラメータ(L1、RSK1、RAC1、LSK1、およびRSUB1)は、形状パラメータ(巻き数と半径)の関数として、解析に基づいて表現されます。このモデルを検証するために、解析に基づくモデルにより計算されたSPICEパラメータ

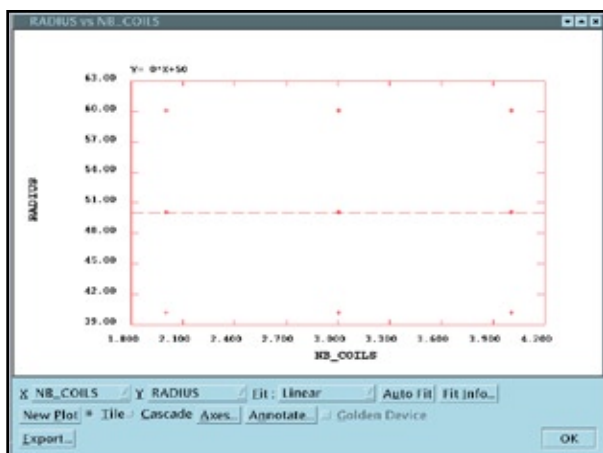


図10: 抽出されたSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーション

を使用したSPICEシミュレーションとUTMOST IVにより抽出されたSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーションを比較する必要があります。

両方のシミュレーションは、SPAYNで直接実行できます(図9および10参照)。その場合、SPAYNにSPICEネットリストとコントロール・カード(入力データ、スティミュラスなど)を入力する必要があります。

SmartViewで両方のシミュレーションを波形表示して直接比較することにより、DoEポイント(9つの異なるインダクタ形状)におけるモデル、およびDoEポイント外のモデルが検証できます。結果は非常に満足いくものでした(図11と12参照)。

最後の検証は、巻き数=3、半径=50umのインダクタで実行しました。方法は、形状固定モデル(18パラメータ)

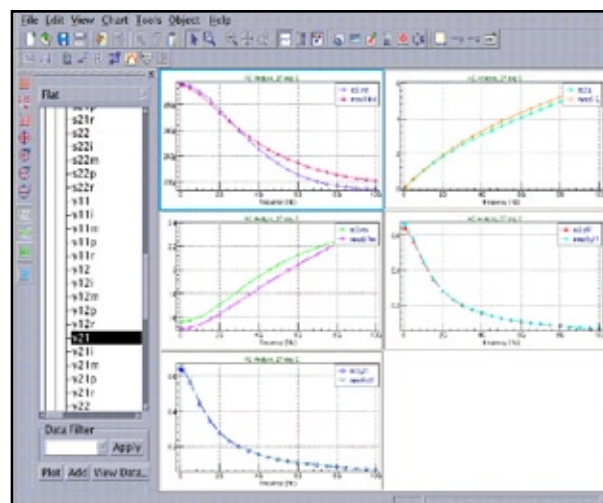


図11: PCA解析で得られた解析モデルから取ったSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーション(Y-パラメータ、Q値、LおよびR)と形状:巻き数=2、半径=40、50、または60umに対するUTMOST IVで抽出されたSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーションの比較。

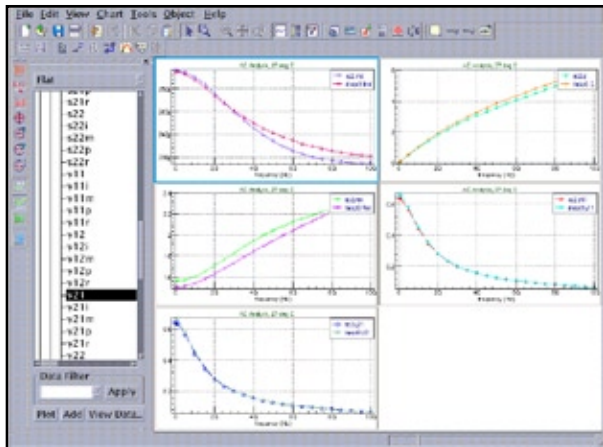


図12 : PCA解析で得られた解析モデルから取ったSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーション(Y-パラメータ、Q値、LおよびR)と形状：巻き数=2、半径=45umに対するUTMOST IVで抽出されたSPICEパラメータを使用したSPICEシミュレーションの比較。

タの最適化)、スケーラブル・モデル(5パラメータの最適化)、および解析モデル(SPAYNのPCA解析による)の比較です。結果は図13のように非常に良い結果でした。インダクタンスに対する差異(+/- 5%)が見られるものの、この差異は最適化を実行したパラメータによるものではありません。

SPAYNの統計的PCA解析から得られたスケーラブルなモデル・パラメータに基づいて、希望のターゲット・インダクタ(すなわちQ値またはL、あるいは両方)に一致するインダクタ形状を求めます。このために、PCA解析で得られた二次方程式がSmartSpiceに渡され、SmartSpiceの最適化機能がこれを使用します。希望のインダクタ性能にしたがって、出力インダクタ・レイアウトが合成されます。

5. まとめ

本稿では、受動デバイスのパラメータ抽出に特化したフロー全体を説明しました。図14のように、入力シミュレートされたデータまたは計測データです。先進的

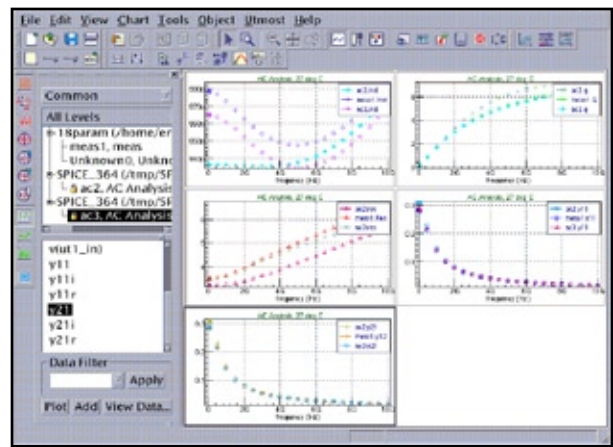


図13 : 計測(QUESTシミュレーション: meas1)、形状固定モデル(18パラメータ: AC3)、および巻き数=3、半径50umに対するスケーラブル・モデル(5パラメータ: AC2)の比較

な統計的解析およびフローの統合により、設計者は容易にSPICEモデル・パラメータを形状パラメータの関数として表現することができ、設計にかかる時間を短縮できます。

参考文献:

- [1] J.Piquet, O.Cueto, F.Charlet, M.Thomas, C.Bermond A.Farcy, J. Torres, B.Fléchet "Simulation and characterization of High-Frequency Performances of Advanced MIM Capacitors" ESSDERC proceeding pp 497-500 2005
- [2] QUEST:Inductance Optimization Using, 3D Field Solver based on DoE Approach, Simulation Standard Volume 16, Number 2, February 2006.
- [3] Application notes:Guide to UTMOST IV optimizers September 12th 2007 www.simucad.com
- [4] W.Gao and Z. Yu, "Scalable Compact Circuit Model and Synthesis for RF CMOS Spiral Inductors" IEEE Trans. On Microwave theory and techniques Vol. 54, NO. 3, March 2006.
- [5] Y.Cao and all "Frequency-Independent Equivalent-Circuit Model for On-Chip Spiral Inductors" IEEE Journal of Solid-State Circuit, Vol. 38, NO.3, March 2003
- [6] J.Edward Jackson, A user guide to Principal Components, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

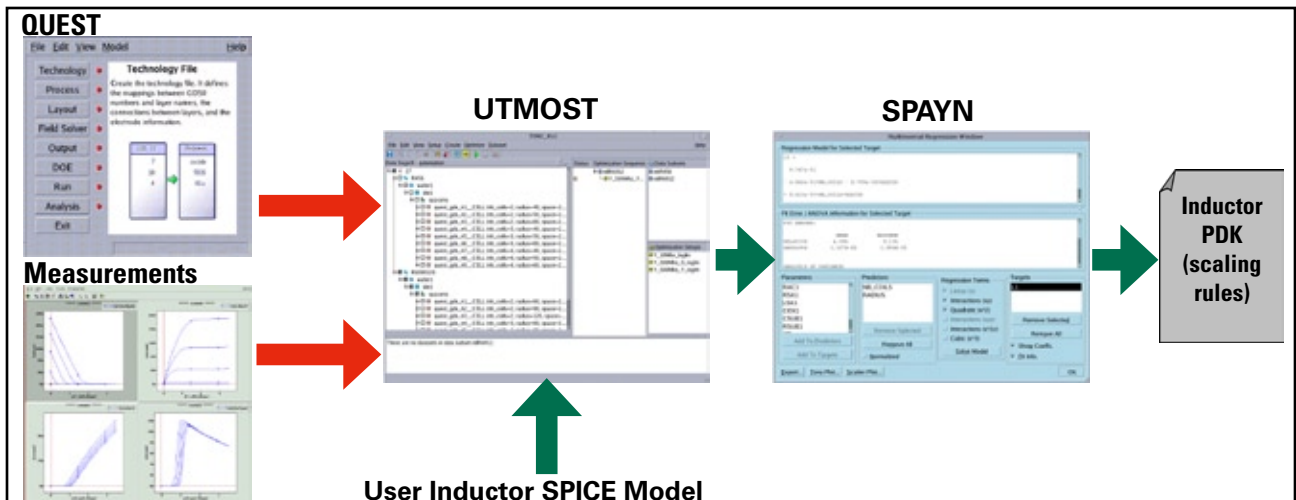


図14 : インダクタ用等価SPICEモデルの抽出フロー(PDK)