

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-163464

(P2000-163464A)

(43) 公開日 平成12年6月16日 (2000.6.16)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 6 F 17/50		C 0 6 F 15/60	6 6 2 C
G 0 1 R 31/28		C 0 1 R 31/28	F
H 0 1 L 21/82		C 0 6 F 15/60	6 6 4 K
		H 0 1 L 21/82	C

審査請求 未請求 請求項の数 1 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平11-325261

(22) 出願日 平成11年11月16日 (1999. 11. 16)

(31) 優先権主張番号 09/193296

(32) 優先日 平成10年11月17日 (1998. 11. 17)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 39911/121

アジレント・テクノロジーズ・インク

AGILENT TECHNOLOGIE S, INC.

アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアルト ページ・ミル・ロード 395

(72) 発明者 トム・ダーン

ベルギー、9800、デインズ、コートーロストラート 35

(74) 代理人 100081721

弁理士 岡田 次生 (外1名)

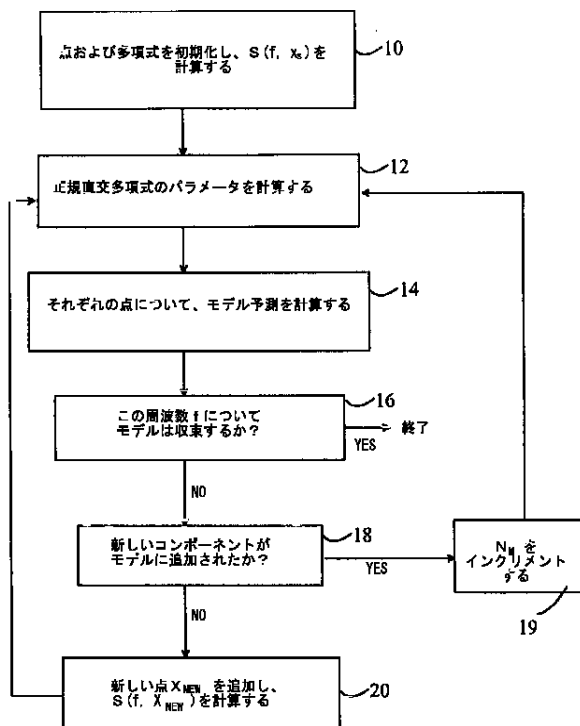
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 集積回路の設計およびモデリングにおいて支援を提供するコンピュータを稼働させる方法

(57) 【要約】

【課題】 予め決められた精度でモデルを生成する。

【解決手段】 回路シミュレータで使用する一般的な受動相互接続構造をモデル化する方法を提供する。モデルは全波のEMシミュレーションに基づいており、全波のEMシミュレータと比較されるとき予め決められた精度を持つ。相互接続構造は、ベクトルxにより規定される幾何学的パラメータおよび相互接続回路を通過する信号の周波数に依存するパラメータによって記述される。この発明に従うCADシステムは、複数の係数 $C_m(f)$ を表現する情報および複数の多項関数 $P_m(x)$ の値を規定する情報を格納する。CADシステムが、相互接続回路を記述するパラメータのうちの1つを必要とするとき、CADシステムは、 $C_m(f)$ および $P_m(x)$ からモデル $M(f, x)$ を計算する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】集積回路の設計およびモデリングにおいて支援を提供するコンピュータ（CAD）を稼働させる方法であって、

前記集積回路のうちの1つは、ベクトル x により規定される幾何学的パラメーターに依存するパラメーターによって記述される電気的な相互接続回路を備え、前記パラメーターは、前記相互接続回路を通過する電気信号の周波数 f にも依存しており、前記CADは、前記パラメーターのうちの1つについての値を必要とし、

f に依存する複数の係数 $C_m(f)$ を表現する情報を格納するステップと、

$M > 1$ である $m = 0 \sim M$ について複数の多項式関数 $P_m(x)$ の値を規定する情報を格納するステップと、

それぞれの $P_m(x)$ が $m > 0$ について多項式である

【数1】

$$M(f, x) = \sum_{m=0}^M C_m(f) P_m(x)$$

の関係に従って、前記パラメーターのうちの1つに対し近似 $M(f, x)$ を計算するステップと、

を含むCADを稼働させる方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は回路シミュレータに関し、より具体的には、設計および最適化の目的で回路シミュレータおよびCAD（コンピュータ援用設計）ツールを使用するのにより適合した高周波の相互接続（インターコネクト）構造の回路モデリング方法に関する。

【0002】

【従来の技術】高周波で使用する集積回路は、結合された伝送線路、接合部、スパイラルその他のような高周波の相互接続を備えることが多い。そのような高周波相互接続の精密な特性は、回路のシミュレーションおよび最適化にとって非常に重要である。

【0003】様々な全波電磁界（EM）数値解析技術が、これらの相互接続構造を特性づけるのに使用されている。モーメント、有限要素および有限差分時間領域法の方法を使用してマックスウェルの方程式を解くことに基づく特性問題に対する解がもっぱら使用されてきた。これらの数値的手法は非常に正確だけれども、非常に多くの計算時間を必要とする。例えば、少数の伝送線路およびT字型のオープンエンドだけから成る単純なマイクロストリップのスタブフィルタを最適化するのに、何日もかかることがある。その結果、これらの手法は、そのような回路素子を含む集積回路のシミュレーションおよび最適化のためのCADソフトウェアで直接使用するには適切でない。

【0004】CADソフトウェアでEMシミュレーションの高いコンピュータ作業負荷を避ける1つの方法は、多数のEMシミュレーションに基づいて回路素子モデル

を計算することである。このモデルは、CADシミュレーションおよび最適化の間中、関連する回路パラメーターを計算するのに使用される。最も簡単なアプローチは、参照テーブルを使用して、様々な寸法を持つ回路素子を表現するEM解析ソフトウェアにより計算されたデータをアクセスすることである。このモデルは、CADシミュレーションの間中使用される。回路または部分回路の回路表現（散乱パラメーターまたは伝送線路パラメーター）は、いくつかの離散的周波数において、パラメーター空間におけるサンプルの固定されたグリッド（離散的な幅、高さ、角度、間隔...）上でCADシミュレーションに先立ち計算され、データはデータベースに保存される。その後、近似モデルは、データベースに格納された結果を補間することにより、CADシミュレーションの間に計算される。

【0005】何らかの形の簡単なカーブ・フィッティング（曲線あてはめ）を使用することにより、単純な参照テーブルのアプローチを強化することができる。これらのシステムでは、パラメーター空間の次元が1に制限されることが多い。一般に使われるフィッティング関数は、多項式、有理関数および三角関数を含む。

【0006】他の従来技術のモデリング手法は、人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Networks；ANN）を使用して、パラメーター化されたモデルを生成する。これらのシステムでは、いくつかの訓練およびテストのサンプルが、パラメーター空間で、および周波数軸に沿ってランダムに選ばれ、ANNは回路動作をモデリングするよう訓練される。

【0007】とりわけ記述されるモデリング手法は、若干の重要な限界を持つ。補間なしの参照テーブルシステムは、一組の予め計算された構造に限られる。そのようなシステムは、設計を最適化するための十分なデータを持つことがめったにない。

【0008】補間またはカーブ・フィッティングを使用するシステムは、設計者が、モデルの範囲内で任意のモデル・パラメーターを規定することを可能にする。しかし、これらの手法の精度および効率性は疑わしいことが多い。通常、パラメーターおよび周波数空間のある部分がオーバーサンプリングされ、他の部分はアンダーサンプリングされる。オーバーサンプリングされると、計算上のリソースを浪費することとなり、アンダーサンプリングされると、モデルと回路パフォーマンスの間の相関関係が劣ったものとなる。さらに、多次元テーブルに基づくモデルに必要なディスクスペースが非常に大きくなることがある。

【0009】補間システムおよびカーブ・フィッティングシステムは、精度の予め決められたレベルを保証することができない。さらに、カーブ・フィッティング手法はアーティファクト（artifact）を持つことが多い。さらに、これらの手法は、共振構造の周波数動作をモデル

ングするのが困難である。

【0010】人工ニューラルネットワークに基づく手法は、これらの問題の多くを克服するコンパクトな高次元かつ非線形モデルを提供することができる。しかし、これらの手法もまた、重大な欠点を若干持つ。任意の回路素子について適切なネット・トポロジーを定義するア priori (a priori) 方法が無い。隠れ層およびノード数を試行錯誤によって見つけなければならない。それに加え、周波数動作はモデリングするのが難しい。一旦ユーザーが特定のANN構造について決定すると、長い訓練時間がくる。すなわち、結果としてのモデルの精度を判断する簡単な方法が無い。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】概して、この発明の目的は、回路シミュレータで使用する受動相互接続構造のためのモデルを生成する改良された方法を提供することである。

【0012】この発明のさらなる目的は、予め決められた精度で構造をモデリングするのに必要なデータ点および自由度の数を自動的に求める方法を提供することである。

【0013】この発明のこれらおよび他の目的は、当該技術分野の当業者ならば、この発明および図面の以下の詳細な説明から明らかになるであろう。

【0014】

【課題を解決するための手段】この発明は、全波EMシミュレーションに基づいてモデルを構成し、回路シミュレータで使用するための一般的な受動相互接続構造のパラメータを散乱させる方法である。結果としてのモデルは、全波EMシミュレータと比較され、保証され予め規定された精度を持つ。アルゴリズムは、3つの適応ループ、すなわちパラメータ空間における適応データ点の選択、周波数軸に沿った適応周波数点の選択、およびモデル複雑性の適応選択を組み合わせる。相互接続構造はパラメータによって記述され、パラメータは、ベクトル \mathbf{x} によって規定される幾何学的パラメータおよび相互接続を通過する信号の周波数に依存する。この発明に従うCADシステムでは、 $m=0\sim M$ に対する複数の係数 $C_m(f)$ を表す情報がCADシステムに保存される。またCADシステムは、 $m=0\sim M$ に対する複数の多項式関数 $P_m(x)$ の値を規定する情報を記憶する。CADシステムが、相互接続回路を記述する散乱パラメータのうちの1つの値を必要とするとき、CADシステムは、以下の式に従って、そのパラメータに対する近似 $M(f, \mathbf{x})$ を計算する。

【0015】

【数2】

$$M(f, \mathbf{x}) = \sum_{m=0}^M C_m(f) P_m(\mathbf{x}).$$

【0016】ここで、それぞれの $P_m(x)$ は多項式である

のが好ましい。この発明の好ましい実施形態では、一組の関数 $P_m(x)$ は正規直交の集合である。データ点は、いくつかのエラー基準を評価することによって選ばれる。

【0017】

【発明の実施の形態】一般的な受動のRFまたはマイクロ波相互接続構造を考えてみる。任意の所与の周波数 f において、この構造の散乱パラメータ (Sパラメータ) または伝送線路パラメータのような一組の測定可能なパラメータによってこの構造を特性づけることができる。例えば、 $N \times N$ の複素数値の行列である散乱行列によって、 N 個のポートを相互接続する一般的な時不変の相互接続構造を特性づけることができる。この構造が相反性であるならば、この行列は、 $N(N+1)/2$ 個の関連パラメータを持つ。相互接続の物理的寸法があれば、「HP-MOMENTUM」プログラムのような全波EM解析ルーチンは、任意の所与の周波数または一組の周波数について、これらのパラメータを計算することができる。

【0018】同様に、(結合された) 伝送線路を、それらの長さ、特性インピーダンス行列および電圧伝搬行列によって特性づけることができる。これらの行列は $N \times N$ 行列であり、ここで N は伝送線路における導線の数である。

【0019】一般に、相互接続構造を特性づける回路パラメータは、それぞれ周波数およびある幾何学的パラメータの関数である。幾何学的パラメータは、回路における金属化素子の寸法 (例えば、幅、長さまたは導電性ストリップの他の物理的寸法) に関係することがある。それに加え、幾何学的パラメータは、基板の絶縁特性および基板の寸法のような基板に関連したパラメータを含むことができる。周波数と共にこれらの幾何学的変数は、パラメータ空間を規定する。一般に、パラメータ空間は制限される。これらの制限内で、モデルの目標は、周波数および幾何学的パラメータについて値が与えられたならば、全波EMシミュレーションと比較されるときに、ある予め決められた精度で測定可能なパラメータ値を返すことである。

【0020】以下の説明において、パラメータ空間の幾何学的部分が正規化され、それぞれの幾何学的パラメータがゼロ～1の範囲を持つと仮定する。幾何学的パラメータについて異なる範囲が与えられたならば (すなわち、 $a \sim b$ に及ぶパラメータ x)、単純な変数の変換により、対応するパラメータがゼロ～1に及ぶ新しい一組の幾何学的パラメータを規定することが常に可能である。

【0021】この発明を記述するのに使われる記法を単純化するため、式におけるベクトル量を太字で示す。この発明は、式(1)の形の関数のように、関連する測定された変数 S のそれぞれを展開することにより、回路コンポーネントのモデルを構成する。

【0022】

【数3】

$$S(f, \mathbf{x}) \approx M(f, \mathbf{x}) = \sum_{n=0}^M C_n(f) P_n(\mathbf{x}) \quad (1)$$

【0023】ここで、 $M(f, \mathbf{x})$ は、周波数 f および物理パラメータ \mathbf{x} (\mathbf{x} はベクトルである) の回路パラメータ S に対するモデル値である。この発明において使用されるモデルは、物理パラメータに依存する多次元多項式の正規直交集合 (任意の他の基底関数の完備集合も同様に使用することができるけれども) における展開によって S を近似する。周波数の依存性は、物理パラメータではなく周波数に依存する重み C_n を使用することによって考慮に入れられる。同様に、多項式 P_n は、物理パラメータにのみ依存する。

$$\sum_{s=1}^{N_s} P_i(\mathbf{x}_s) \cdot P_j(\mathbf{x}_s) = \delta_{i,j} \quad (2)$$

【0027】ここで、 $\delta_{i,j}$ は従来のディラックの δ (デルタ) 関数であり、 $s = 1 \sim N_s$ に対する \mathbf{x}_s (\mathbf{x}_s はベクトルである) はサンプル点であり、それらについての $S(f, \mathbf{x}_s)$ の値は既知である (HP-MOMENTUM によるシミュレーションを通して)。

【0028】パラメータについての既知の値 $S(f, \mathbf{x}_s)$ が、測定または EM シミュレータ上のシミュレーション

$$C_n(f) = \sum_{s=1}^{N_s} S(f, \mathbf{x}_s) P_n(\mathbf{x}_s) \quad (3)$$

【0030】この発明の好ましい実施形態では、 $j = 1 \sim N_f$ についての一組の周波数 f_j は、一組のサンプル点 \mathbf{x}_s と共に規定される。周波数およびサンプル点のそれぞれについて、関連する回路パラメータが EM アナライザを使用して計算され、データは多項式にあてはめられる。

【0031】式 (1) に従ってモデルを構成するとき、一組のサンプル点および展開次数を規定しなければならない。上記のようにサンプル点の数をあまりに高く設定すると、モデルは、計算上および記憶資源の両方について浪費となる。この発明の好ましい実施形態では、それぞれの周波数における一組のパラメータにおいて十分なデータ点があるとすると、モデル次数が最初に設定される。展開次数を設定するため、第 1 のエラー範囲 Δ_M が使用される (ここで、 Δ_M は、所望の精度 Δ に関係す

$$M(f, \mathbf{x}) = \sum_n C_n(f) P_n(\mathbf{x}) = \sum_n C_n(f) \sum_{p=0}^n \beta_{np} x^p = \sum_n C'_n(f) x^n \quad (4)$$

【0034】ここで、 \mathbf{x} は正規化された幾何学的パラメータである。モデルについてサンプル点 \mathbf{x}_s (\mathbf{x}_s は、ベクトルである) および最大次数を求める適応アルゴリズムのフローチャートを図 1 に示す。モデルのパラメータ化の目標は、予め決められた精度で、かつ最も少ない可能なデータ点を使用して、周波数およびパラメータ

【0024】好ましい正規直交多項式は、一般化フォーサイス (Generalized Forsythe) の多項式である。これらの多項式は、改善された数値安定度および計算上の効率性を提供するので好ましい。これらの多項式は、データ・フィッティングの分野で知られる (1次元) フォーサイス多項式の多次元一般化である。読者は、これらの関数のより完全な説明について、F. E. Forsythe の「Generation and use of Orthogonal Polynomials for Data Fitting with a Digital Computer」(Journal of Industrial Society of Applied Mathematics 5, pp. 74-88(197)) を参照することができる。

【0025】これらの多項式は、式 (2) のように、サンプル点 (標本点) において正規直交である。

【0026】

【数4】

のどちらかから得られると、多項式が正規直交であるので、任意の所与の周波数における重み関数 $C_n(f)$ を決定するには、限られた数の単純な乗算および加算のみを必要とする (すなわち、式 (3))。

【0029】

【数5】

る)。それぞれの f_j ($j=1, \dots, N_f$) およびそれぞれの \mathbf{x}_s ($s=1, \dots, N_s$) について、EM アナライザの結果およびモデル予測の間の差がこのエラー範囲より小さくなるまで、追加の多項式が展開に追加される。次数が設定され、データ点が定義されて、それぞれの f における最大の差が Δ_M より小さくなるようにすると、周波数依存の重みは、記憶されなければならないデータ量をさらにコンパクトにするようモデル化される。

【0032】モデル・パラメータが生成される方法を図 1 を使用して説明する。図 1 は、1 のみの幾何学的パラメータがある場合のモデル構成プロセスのフローチャートである。この場合、それぞれの周波数におけるモデルは、式 (4) にまで低下する。

【0033】

【数6】

レンジにわたって測定可能なパラメータ表現を提供することである。

【0035】式 (4) の多項式は、幾何学的パラメータにのみ依存する。一組のデータ点 \mathbf{x}_s を想定すると、これらの多項式は次のように計算される。係数 $C_n(f)$ を計算する計算上の負荷を最小にするため、 β_{np} は、多項

式(5)が一組のサンプル点について正規直交(すなわち、式(6))であるよう選ばれる。

$$P_m(x) = \sum_{p=0}^m \beta_{mp} x^p \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_j} P_i(x_i) P_j(x_i) = \delta_{ij} \quad (6)$$

【0037】また、正規直交多項式の使用は、アルゴリズムをモデリングする数値の安定度を向上させる。

【0038】一次元の場合に適用される、この発明の方法のフローチャートを図1に示す。別個のモデルが、回路素子のそれぞれ測定可能なパラメーターについて計算される。以下の説明を単純化するため、散乱パラメーターのうちの1つだけを参照するが、以下に記述されるモデリングのプロセスが、モデルが挿入されるべきCADプログラムによって必要とされる回路パラメーターのそれぞれについて繰り返されることは理解されるであろう。

【0039】以下の説明で記法を単純化するために、一組のサンプリング周波数を Φ で示す。 Φ におけるそれぞれの f について、モデルを構成することが繰り返される。以下に述べるように、その後、様々な f の値についての結果が組み合わされる。新しいデータ点が選択される時、 Φ における周波数のそれぞれにおける散乱パラメーターのそれぞれについてのモデルが考慮される。

$$C_m(f) = \sum_{\mathbf{x}_s} S(f, \mathbf{x}_s) P_m(\mathbf{x}_s) \quad (7)$$

【0043】その後、 $C_m(f)$ が使用され、サンプリング点 \mathbf{x}_s のそれぞれにおける散乱パラメーターについて、モデル化された値 $M(f, \mathbf{x}_s)$ を生成する。その後、モデル化された値はEMアナライザの値に対して試験され、ステップ16に示されるように、モデルが、この周波数に

$$|S(f, \mathbf{x}_s) - M(f, \mathbf{x}_s)| \leq \Delta_M \quad (8)$$

【0045】すべての \mathbf{x}_s について式(8)を満たすならば、モデルは収束する。すべてのデータ点および Φ のそれぞれの f について式(8)が満たされるわけでないならば、ステップ19に示すように、新しいコンポーネントがモデルに追加され(すなわち、 $N_M \rightarrow N_M + 1$)、処理はステップ12から繰り返される。 Φ におけるどの f についてもモデルが収束する時、ステップ20に示されるように、適応サンプル選択ルーチンが、新しいデータ点 \mathbf{x}_{new} を選択し、散乱パラメーター $S(f, \mathbf{x}_{new})$ が、EMアナライザを使用してこの点について計算される。このデータはデータベースに加えられ、モデリング処理がステップ12から繰り返される。

【0046】上記のように、モデルは、 Φ におけるそれぞれの f および関連する回路パラメーターのそれぞれについて構成される。言い換えると、散乱パラメーターの

【0036】

【数7】

【0040】3つのサンプリング点(標本点)の最初のセットおよび最初の多項式の次数が、図1のステップ10で示されるように選ばれる。最初のサンプリング分布は3つの点、すなわち2つの境界および x におけるその間隔の中央から成る。最初の多項式の次数を1に設定することができる。散乱パラメーター値 $S(f, \mathbf{x}_s)$ は、EMアナライザ・ルーチンを使用して、最初のサンプリング点のそれぞれについて計算される。

【0041】サンプルの集合 $\{\mathbf{x}_s\}$ が更新されるたびに、または多項式の最高次が増やされるたびに、多項式の係数 β_{mp} をステップ12で示されるように更新し、多項式が新しいサンプルの集合について正規直交であるようにしなければならない。多項式の係数がわかると、ステップ14に示されるように、 $C_m(f)$ が $m=0 \sim (N_M - 1)$ について式(7)のように計算される。ここで、 N_M は式(4)の項数である。

【0042】

【数8】

について収束するかどうか判断する。モデルが収束するならば、 f 値のすべてがモデル化されるまで、 Φ における次の f について処理が繰り返される。

【0044】

【数9】

それぞれについて異なる数のモデルがあり、 Φ におけるどの周波数についても1つある。周波数 f_j に対する、これらのモデルのそれぞれで使用される多項式の数 N_{Mj} は、一般に、異なる周波数において異なる。この発明の好ましい実施形態では、様々な個々のモデルが組み合わされ、全周波数範囲をカバーする1つのモデルを生成する。 Φ における任意の周波数において使用される多項式の最大数は、グローバルモデルにおける多項式の数として使用される。すなわち、 $N_M = \max(N_{M1}, N_{M2}, \dots, N_{M\Phi})$ である。その後、係数は、多項式または有理数のフィッティング手法により、モデルで使われる離散値以外の周波数値まで広がる。それにより、 $C_m(f)$ の値が、 $[f_L, f_H]$ 内の任意の中間周波数で計算されることが可能となる。これらのフィッティング手法は、係数が周波数の関数として非常にゆっくり変化する周波数空

間の範囲については、すべての周波数においてデータが必要というわけではないので、係数 $C_m(f)$ を格納することによりコンパクトな形を提供することもできるということに注意されたい。

【0047】1のみの幾何学的パラメーターが使われる場合でモデリングが実行される方法を説明してきたが、

$$M(f, \mathbf{x}) = \sum_m C_m(f) \sum_{p=0}^m \beta_{mp} \prod_n x_n^{e_{np}} = \sum_m C_m(f) \prod_n x_n^{e_m} \quad (9)$$

$$\text{ここで } \mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n] \in R_N = \{[0, 1] \mid i=1, \dots, n\} \text{ および } f \in [f_L, f_H].$$

【0049】多次元モデルを構成するとき、一次元の場合とは本質的に異なる2つの事がある。すなわち、最初のサンプル点分布が生成される方法、およびモデルが段階的に展開されて、サンプル点で所望の精度を達成する方法である。どちらの場合も、回路パラメーターに対する幾何学的パラメーターのそれぞれの影響を考慮しなければならない。したがって、幾何学的パラメーター x_i のそれぞれの多次元モデルを構成するのに先立ち、1次元モデルを上記に述べた方法を使用して構成する。このモデルでは、 x_i は全範囲 $[0, 1]$ にわたって変化し、他のパラメーター x_k は一定に保たれる。すなわち、 $k=0.5 (i \neq k)$ である。これらの1次元モデルを構成するのに使用されるデータ点の数および多項式の数、 N_{s_i} および N_{m_i} でそれぞれ示される ($i=1, \dots, n$)。

【0050】最初の多次元サンプル分布は、パラメーター空間 R_N におけるそれぞれの x_i 軸に沿って均一に分散

$$T_i = x_1^{e_1} x_2^{e_2} \dots x_n^{e_n} = \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}\} \quad (10)$$

ここで、指数 e_i は正規化される (式 (11))。

【0053】

$$c_i \rightarrow E_i = c_i \prod_{ink} N_{mk} \quad (11)$$

【0054】新しいコンポーネントを選ぶ時、以下の規則が適用される。

- 1) すべての可能な新しいコンポーネントから、 $E_{t_m} = \max \{E_{t_1}, E_{t_2}, \dots, E_{t_n}\}$ が最小であるコンポーネント T_t を維持する。
- 2) 残りのコンポーネントから、 $S_i = E_{t_1} + E_{t_2} + \dots + E_{t_n}$ が最小であるものを維持する。
- 3) 残りのコンポーネントから、 $e_{t_m} = \max \{e_{t_1}, e_{t_2}, \dots, e_{t_n}\}$ が最小であるものを維持する。
- 4) 残りのコンポーネントから、 $s_t = e_{t_1} + e_{t_2} + \dots + e_{t_n}$ が最小であるものを維持する。
- 5) 残りのコンポーネントから、新しいコンポーネントとして1つ選ぶ。

【0055】新しいコンポーネントを選ぶプロセスは、幾何学的パラメーター空間のサンプル点の場所、およびすでに使用されたコンポーネントに依存するだけである。それは、周波数およびサンプル点における散乱パラメーターの値から独立している。したがって、モデル化

多次元の幾何学的パラメーター空間をカバーするモデルを生成する方法について説明する。多次元多項式モデルは、一般に式 (9) のように書くことができる。

【0048】

【数10】

された N_{a_i} を得ることにより生成される。ここで、 N_{a_i} は N_{s_i} に関連する。このように、散乱パラメーターに対して最も多くの影響を持つ幾何学的パラメーターが、最も高密度にサンプリングされる。

【0051】2またはそれ以上の幾何学的パラメーターをもつ構造については、モデルを展開するのに複数の方法がある。パラメーターのうちの任意の1つのパラメーターの次数を増やすことにより生成される新しいコンポーネントを加えることによって、モデルを展開することができる。最終的なモデルは、パラメーターのそれぞれが回路パラメーターに対して持つ影響を反映しなければならない。一般に、新しいコンポーネントは、式 (10) のように書くことができる。

【0052】

【数11】

【数12】

された散乱パラメーターのそれぞれについて、 $f_j \in \Phi$ のどの f についても、コンポーネントの1つの共通のセットがある (それゆえ、多項式の1つの共通のセットがある)。コンポーネントの数だけは、異なる周波数について、および異なる散乱パラメーターについて異なることがある。

【0056】図2を参照すると、多次元アルゴリズムのフローチャートを示す。ステップ50に示すように、最初の点およびコンポーネントを選ぶことを除いて、多次元アルゴリズムの残りは1次元アルゴリズムに類似している。議論を単純化するため、図1のブロックによって実行されるものに類似している機能を実行するブロックについては、図1のものとは100だけ異なるステップ番号が与えられており、ここで詳細には説明しない。モデル次数および最初のサンプル点を選択されると、アルゴリズムは、図1に示されるアルゴリズムとして同じ方法で進む。任意の所与の一組の点について、モデル化および計算されたパラメーターが比較される。モデルがまだ

収束されないならば、新しいコンポーネントが上記の規則を使用して追加される。モデルが収束したならば、適応サンプル選択ルーチンは、新しいサンプル点を選ぶ。

【0057】新しいデータ点を選ぶことは、いくつかの選択基準を評価することによって行われる。すべての選択基準が満たされるならばアルゴリズムは収束する。そうでなければ、基準から最も離れた所で、新しいデータ点を選択される。これらの基準は、モデルの現状態に基づく。Φにおける周波数のそれぞれについて別個のモデルがあるので、Φのあらゆる周波数について基準をチェックしなければならない。選択基準を評価することは非常に時間がかかることがあるので、できるだけ不必要な評価を実行しないことが重要である。基準が評価されて、評価が真 (TRUE) であるたびに (すなわち、新しいデータ点が全く選択されない)、評価は不必要だったということになる。それゆえに、新しいデータ点に最もなりそうな周波数において、最初に基準が評価される。

【0058】この評価を助けるため、この発明の好ましい実施形態は、それぞれの周波数 $f_j \in \Phi$ が、新しいデータ点の選択に対して何回応じたかを追跡する。この情報は、それぞれの周波数について維持される変数 N_{h_j} に格納される。Φにおける周波数 f_j は、それらの対応する N_{h_j} に従う降順でソートされる。2つの周波数 f_j お

$$M_H(f, X) = \sum_{n=0}^{N_{H_j}} C_n(f) P_n(X) \quad (12)$$

$$M_L(f, X) = \sum_{n=0}^{N_{L_j}} C_n(f) P_n(X) \quad (13)$$

新しいデータ点は、反射関数のほぼ最大で選択される。 【数14】

【0061】

$$\max_{X \in R, f \in \Phi} |M_H(f, X) - M_L(f, X)| = \max_{X \in R, f \in \Phi} |C_{N_{H_j}}(f) P_{N_{H_j}}(X)| \quad (14)$$

アルゴリズムは、式(15)の時に収束する。 【数15】

【0062】

$$\max_{X \in R, f \in \Phi} |C_{N_{H_j}}(f) P_{N_{H_j}}(X)| \leq \Delta \quad (15)$$

ここで、Δは、モデルの所望の精度である。

【0063】散乱パラメーター S_{ij} のうちの1つが、パラメーター空間において極小または極大を持つならば、そのすぐ近くにデータ点を持つことが重要である。データ点がこの極値の近くに無いならば、極値において散乱パラメーターの値の良好な近似を得ることが難しくなる。したがって、 $X_m \in R_m$ がモデル $M(f, x)$ の極小また

$$|X_m - X_j| < \Delta_s \quad (16)$$

【0065】ここで、 Δ_s は、パラメーター入力空間における最大サンプル距離である。 x_m のすぐ近くにデータ点が無ければ、この発明の好ましい実施形態は、新しいデータ点として x_m を選択する。構造が、 x_m

よび f_k が同じ $N_{h_j} = N_{h_k}$ を持つならば、最も高い周波数が最初にくる。これは、回路パラメーターが、最も高い周波数で最も複雑な動作を持つことが多いからである。過去の新しいデータ点に対して最も多く応じた周波数は、最初にチェックされる。

【0059】適応方法でデータ点を選択し、モデルを構成するプロセスは、たびたび「探査 (exploration)」と呼ばれる。探査は、適切な新しいデータ点を選ぶことによって、できるだけ速くモデルのモデリング・エラーを減らすことを目指す。探査がモデルの現状態に依存するならば、それは「反射的」と言われる。データを提供するプロセスが非常に高くつくとき、反射的探査は有効である。これは、確かに全波電磁界シミュレータについてあてはまる。非統計的な反射的探査は、「反射関数 (reflective function)」を必要とし、これは、新しいデータ点を選ぶのに使われる。モデルが適応するとき、これらの反射関数も適応する。この発明のアルゴリズムで使われる反射関数は、「最上の一致」 M_H (これは、現モデルである) および「2番目に最上の一致」 M_L の間の差である。

【0060】

【数13】

【数14】

【数15】

は極大を示すならば (x は、ベクトル)、 x_m (x_m はベクトルである) のすぐ近くにデータ点 x を持つのが有利である。すなわち、式(16)をみたとすサンプル点 x_s (x_s はベクトルである) がある。

【0064】

【数16】

における x に関して共振動作を持つということが知られている場合、式(16)が満たされないならば、サンプルは x_m に置かれるべきである。

【0066】上記に述べたように、線形、時不変、受動

回路の散乱パラメーターは、ある物理的条件を満たす。これらの条件を、モデルの精度をチェックするのに使用することができる。モデルが物理的条件をみたさないならば、それらは、正確に散乱パラメーターをモデリングすることができない。モデルの所望の精度 Δ を考慮に入

$1 \leq i, j \leq N_p$ および $i \leq j$ について

$$|S_{ij}|^2 \leq 1 + 2\Delta\sqrt{2}, \quad (17)$$

および

$i \leq i \leq N_p$ について

$$\sum_{j=1}^{N_p} |S_{ij}|^2 \leq 1 + 2\Delta\sqrt{2N_p}, \quad (18)$$

【0068】これらの物理的条件は、付加的な反射関数として働く。すなわち、それらが満たされないならば、新しいデータ点は、基準から最も離れたところで選ばれる。

【0069】探索に基づく密度は、入力空間で一様に分散される一組のサンプル点を作ることを意図している。これは、モデリング・エラーが、より少ないデータ点を持つ領域でより大きい傾向があるという事実に基づく。すべてのモデルが収束したあと、最も密度が小さくサンプリングされたパラメーター空間の部分で、いくつかの追加のデータ点を選ぶことができる。これらの余分なサンプル点を、モデルのための試験点として使うことができる。それぞれの試験点は、EMシミュレータおよび現モデルを使ってシミュレートされる。試験点におけるモデリング・エラーが、あらかじめ決められた値より大きいならば、試験点を新しいデータ点として使用し、モデルが再計算される。

【0070】この発明の上記の実施形態は、パラメーター空間が多次元の長方形領域であり、すべての幾何学的パラメーターが独立した変数であると仮定する。しかし、特定の構造においては、それらのパラメーターが独立に変化することができる回数に関して、2またはそれ以上の幾何学的パラメーターの間にある種の関係が存在する。これらの関係は、幾何学的パラメーターの可能な変化を制限する。そのような関係は、最初の多次元サンプル分布が生成される方法を変える。一次元モデルを使用して、幾何学的パラメーターのそれぞれが、モデル化されたデータに対して持つ影響において洞察を得たので、これらのモデルが、パラメーター範囲のできるだけ多くをカバーすることが重要である。この発明の好ましい実施形態において、最初の二次元サンプル分布は、一次元モデルについてのものはもちろん、パラメーターの境界上にあるものも含めて、パラメーター空間の有効な部分におけるすべての点から成る。さらに、新しいデータ点を選ぶとき、反射関数が、パラメーター空間の有効な部分でのみ評価される。

【0071】任意のモデルのモデリング・エラーは、データを表現するための基底関数の能力に依存する。きわめて非線形なデータについて、またはデータにおいて不

れると、以下の条件を、現サンプリング点に及ぶすべての周波数について保持しなければならない。

【0067】

【数17】

連続性があるとき、多項式は、きわめて高次の多項式に頼ることなく正確にデータをモデリングするのが困難であり、アルゴリズムは収束することができなくなる。さらに、多項式の次数があまりに高くなると、数値上の問題が発生することがある。それゆえに、多項式の次数を制限することが有利である。

【0072】多項式の次数を制限する1つの方法は、2またはそれ以上の区分的多項式モデルを使うことである。この発明の好ましい実施形態において、アルゴリズムが、ある数のステップの後で収束することができないとき、パラメーター空間は2つの部分空間に細分される。パラメーター空間を細分するという判断は、いくつかの基準（それは、時々互いに関係する）に基づくことができる。すなわち、

- 1) 多項式の次数が、高くなりすぎる、
- 2) データ点の数が、大きくなりすぎる、
- 3) 高非線形性（または重大な数値のノイズ）が検出される、に基づくことができる。

【0073】パラメーター空間を細分した後、結果としての部分空間は別個に扱われる。電気的に大きい構造または共振構造は、複数の分割を必要とすることが多い。その後、最初のパラメーター空間は、部分空間のよせ集め（パッチワーク）に変換され、すべてのものは、それら自身の別個のモデルを持つ。しかし、パラメーター空間を漠然と分割することはできない。検討中の回路を離散化することによってマックスウェル方程式を解くEMシミュレータによって、データは生成される。数値エラー（例えば、丸めの誤差）の他の原因と一緒に、この離散化によって、数値ノイズがデータ上に重畳される。パラメーター空間が何回も多く細分されるならば、関連するデータをモデリングする代わりに、モデルはこの数値ノイズに集中し始める。したがって、部分空間の大きさが、最初のパラメーター空間の数分の1より小さくなる時、またはデータ上の数値ノイズがあまりに重大になる時、パラメーター空間を分割することは禁止されなければならない。

【0074】一次元のパラメーター空間を分割するとき、2つの異なる状況が発生することがある。すなわち、サンプル数 N_s は、偶数または奇数であることがで

きる。どちらの場合も、サンプルは昇順の方法で並べられる。 N_s が奇数であるならば、パラメータ空間は中間のサンプルで分割される。中間のサンプルは、二回、すなわち左の部分空間の終わり、および右の部分空間の初めで使われる。両方の部分空間におけるサンプルの数は、 $(N_s + 1) / 2$ である。

【0075】 N_s が偶数であるならば、2つの中間のサンプルがある。この発明の好ましい実施形態では、正規化された範囲の中間に最も近い点で、パラメータ空間は分割される。一方の部分空間は $(N_s) / 2$ 個のサンプルを持ち、他方の部分空間は $(N_s / 2 + 1)$ 個のサンプルを持つ。

【0076】多次元パラメータ空間は、軸のうちの1つに沿って分割することによって分割するのが好ましい。それゆえに、幾何学的パラメータがあるのと同じくらい多くの異なる方法で、パラメータ空間を分割することができる。分割は、多項式で最も高い次数を持つパラメータの軸に沿って行われる。このようにして、多項式の最大次数が制限される。

【0077】この発明の上記の実施形態は、特定の方法を使用して、モデル・パラメータが計算されるサンプル点を生成した。しかし、サンプルの集合を定義し、モデル・パラメータについて解く他の方法を、この発明の教示からそれることなく使用することができるという事は、前述の議論から当該技術分野の当業者には明らかであろう。この発明は、パラメータが規定される式(1)に示されるモデルを使用し、モデル予測およびシミュレーションと測定によって判断される値における差を最小にするようにする。この最適化問題を解くための数学的分野に知られている任意の方法を、原則として使用することができる。上記の方法は、計算時間を減らしてモデルの精度に対するチェックを提供するので好ましい。

【0078】この発明の方法は、汎用的なデータ処理システムに対して施されるのが好ましい。結果としてのモデルは、それが挿入されるCADシステムと同じプラットフォーム上で実行するためのものである。

【0079】この発明に対する様々な修正は、前述の説明および図面から、当該技術分野の当業者には明らかであろう。それゆえ、この発明は、以下の特許請求の範囲の範囲によってのみ制限されるべきものである。

【0080】本発明は例として次の実施態様を含む。

(1) 集積回路の設計およびモデリングにおいて支援を提供するコンピュータ(CAD)を稼働させる方法であって、前記集積回路のうちの1つは、ベクトル x により規定される幾何学的パラメータに依存するパラメータによって記述される電気的な相互接続回路を備え、前記パラメータは、前記相互接続回路を通過する電気信号の周波数 f にも依存しており、前記CADは、前記パラメータのうちの1つについての値を必要とし、 f に

依存する複数の係数 $C_m(f)$ を表現する情報を格納するステップと、 $M > 1$ である $m = 0 \sim M$ について複数の多項式関数 $P_m(x)$ の値を規定する情報を格納するステップと、それぞれの $P_m(x)$ が $m > 0$ について多項式である【数18】

$$M(f, x) = \sum_{m=0}^M C_m(f) P_m(x)$$

の関係に従って、前記パラメータのうちの1つに対し近似 $M(f, x)$ を計算するステップと、を含むCADを稼働させる方法。

【0081】(2) 前記一組の関数 $P_m(x)$ が、互いに正規直交関数である上記(1)に記載の方法。

【0082】(3) 前記相互接続構造が、互いに N ポートを相互接続する時不変の相互接続構造を備えており、前記パラメータが、前記相互接続構造を特性づける $N \times N$ 行列の1つのコンポーネントを規定するようにした上記(1)に記載の方法。

【0083】(4) 前記相互接続構造が伝送線路を備えており、前記パラメータが、前記伝送線路を表現するインピーダンス行列の1つのコンポーネントを規定するようにした上記(1)に記載の方法。

【0084】(5) モデルのパラメータを規定する情報を提供し、ベクトル x により規定される幾何学的パラメータおよび相互接続回路を通過する電気信号の周波数 f に依存する電気的な相互接続回路の電気動作を記述する量を生成するコンピュータを稼働させる方法であって、前記量が、それぞれの $P_m(x)$ が $m > 0$ について多項式である【数19】

$$M(f, x) = \sum_{m=0}^M C_m(f) P_m(x)$$

により表される関数 $M(f, x)$ により近似され、 $I = 1 \sim N_s$ について、一組のサンプル点 x_I を規定するステップと、 $j = 1 \sim N_f$ について、一組の周波数 f_j を規定するステップと、EMシミュレータを使用して、前記周波数およびサンプル点のそれぞれの組み合わせについて前記量の値を求めるステップと、前記求めた値から、前記係数 $C_m(f)$ を求めるステップと、を含む方法。

【0085】(6) 前記一組のサンプル点および前記一組の周波数を規定するステップが、ユーザの介入なしで反復的に実行されるようにした上記(5)に記載の方法。

【0086】(7) $M(f, x)$ が、前記周波数およびサンプル点のそれぞれの組み合わせについて前記EMシミュレータにより求められた値を、予め決められたエラー内に適合させる時、前記繰り返しが終了するようにした上記(6)に記載の方法。

【0087】(8) M および前記多項式が、ユーザの介入無しで反復的に判断されるようにした上記(6)に記載の方法。

【0088】

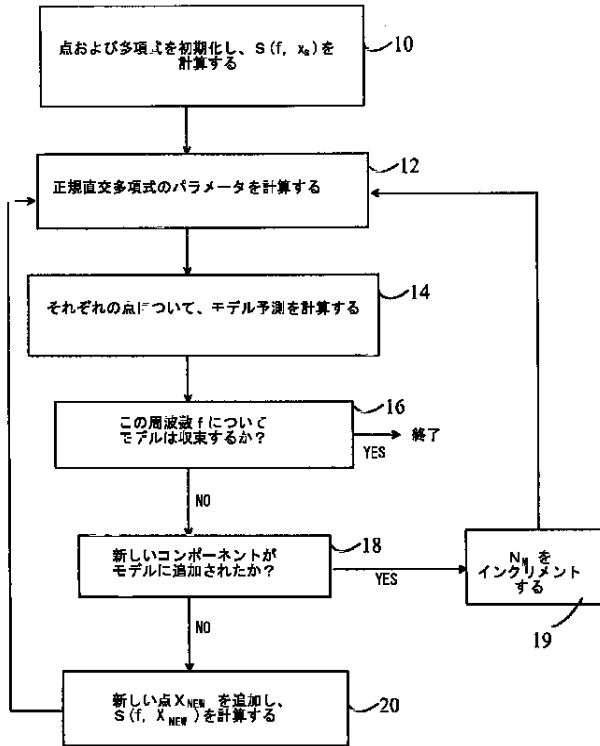
【発明の効果】周波数および幾何学的パラメーターの値を与えれば、全波EMシミュレーションと比較されるときに、ある予め決められた精度で測定可能なパラメーター値を返すモデルを生成することができる。

【図面の簡単な説明】

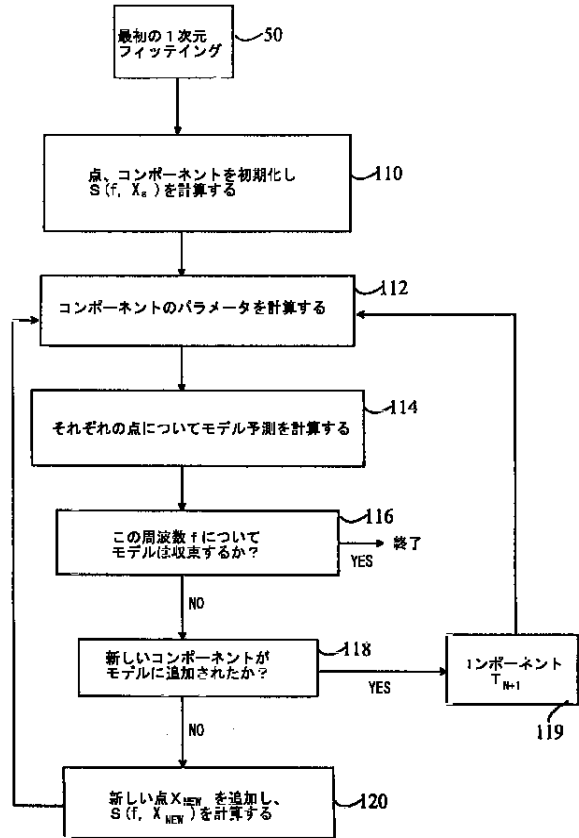
【図1】この発明により、回路素子が、1のみの幾何学的パラメーターに依存する場合の、モデル・パラメーターを求める方法のフローチャート。

【図2】この発明により、回路素子が、複数の幾何学的パラメーターに依存する場合の、モデル・パラメーターを求める方法のフローチャート。

【図1】



【図2】



フロントページの続き

(71)出願人 399117121
395 Page Mill Road P
alo Alto, California
U. S. A.

(72)発明者 ジャン・ド・ギースト
ベルギー、ビー-9230、ヴェッターエン
オースターゼレスティーンウェク 21