

氏 名	おくむら まきこ 奥村 万規子
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成6年10月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和57年3月 慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業
学位論文題目	周期的線形時変回路モデルに基づく 非線形電子回路解析に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 樋口 龍雄 東北大学教授 阿部 健一 東北大学教授 亀山 充隆

論 文 内 容 要 旨

電子回路の動作を数値的にシミュレーションする回路解析の研究は、1950年代、デジタル計算機の実用化と共に具体化し、計算機の大容量化、高速化と共に発達した。集積回路が実用化され始めた1960年代後半から1970年代前半にかけて、電子回路の定式化法、電子回路の特徴にあった非線形常微分方程式の数値解法、行列処理法など、現在でも利用されている回路解析の基本的な手法がほぼ確立された。非線形電子回路解析プログラムとしてよく知られている SPICE が開発されたのも、ちょうどこの頃であり、SPICE は集積化電子回路設計への実用化を目的として、各種アルゴリズムの比較検討、非線形素子モデルの有効性の検討、ソフトウェアデータ構造などの研究を経て得られた大きな成果であった。

集積回路では、1回の試作に要する費用と時間がかかること、個別の修正ができないこと、プリント基板状に電子回路部品を使って実現しても集積回路上の正確な特性予測ができないことなどから、回路解析は集積回路開発に不可欠な道具となった。

集積回路の大規模化に伴い、回路解析の高速化が要求され、そのための数々の手法が研究された。デジタル回路に対してはデジタル回路専用の論理シュミレータが開発され、計算機援用設計 CAD の発達、微細加工技術の発展も加えて、その集積度は指数関数的に増大した。

回路解析には、この大規模回路の問題に加えて、小規模ではあるが、その特性を検証するために、極めて多大な計算量を要する回路に対する問題があった。例えば無線通信などに用いられる周波数変換器、高周波増幅器、発振器などのアナログ回路である。このような電子回路は集積回路上では

トランジスタの特性が十分に取れないことなどから集積化が難しく、長い間個別電子回路で実現されていた。そのため、プリント基板上での回路設計検証が可能であった。しかしながら、近年、プロセス技術の発展により、このような電子回路も集積化されるようになった。また、通信機器の使用周波数の高周波化により、基板上での実験が困難になり、回路解析が回路設計を検証する唯一の手段となった。一方で、アナログ回路に対する歪や雑音特性に対する要求は益々厳しくなり、回路解析にも、これらの特性を精度よく解析するアルゴリズムが求められるようになった。

本研究はこのような背景のもとに行われたものであり、これまでの回路解析の研究成果を基本に、汎用回路シミュレータでは膨大な計算量を要する、あるいは従来解析手法がない回路解析の問題に対して、その問題を解決するために、効率的な回路解析手法を提案するものである。

多大な計算量を必要とする回路として、複数の周波数が入力されたことにより、回路の内部に大小比の大きい周波数が存在する非線形回路をあげることができる。非線形回路の解析は、過渡解析を使って行われるが、その計算精度は離散化した時間刻み幅に依存する。したがって、回路内部に大小比の大きい周波数が存在する場合、全積分区間に対して、非常に細かく離散化する必要があり、その計算量は一般に多くなる。このような回路には、入力信号の他にクロック信号を加えることにより動作するサンプルホールド回路や、変調信号の他に局発信号を加えることにより動作する周波数変換器がある。周波数変換器の中でも、例えばダイレクトコンバージョン周波数変換器のように、高周波から直接、低周波に変換するような回路では、その周波数比は5, 6桁にのぼり、計算量は膨大となる。また、入力信号は1信号でも、回路内部に大小比の大きい時の定数を含む回路については、離散化の幅に対して、定常状態に達するまで積分する区間は長くなり、その計算量が多くなる問題は同じである。

このような問題に対して、周期的定常応答を直接速く計算する定常解析がある。定常解析は、1960年代後半から1980年代にかけて研究が行われ、優れた手法として、時間領域の解析法であるシューティング法と周波数領域の解析法であるハーモニックバランス法がある。しかしながら、実用化のためにはいくつかの課題が残っていた。

従来の回路解析手法では直接解析できないものに、大信号が加わることにより、動作点が変わる非線形回路の小信号入力に対する解析がある。従来の小信号解析や雑音解析は直流動作点における線形等価回路に対する解析であるから、サンプルホールド回路や周波数変換器のようにクロック信号や局発信号により動作点が変わる非線形回路を解析することはできない。このような回路の伝達特性を見るために、過渡解析を用いることも不可能ではないが、その計算量は膨大となり、極めて効率の悪い解析手法となる。

このような問題に対して、スイッチトキャパシタ回路 (SCN) に限れば、その周波数特性や雑音を解析する SCN 専用シミュレータが数多く研究された。しかしながら、これらは取り扱うことのできる素子を限定し、回路を線形な離散時間システムとして取り扱っているため、実際の非線形素子の影響を見積もることはできない。

本研究では、これらの問題に対して、まず第一に、周期的定常応答を速く求めることを目的として、シューティング法について、計算量の削減と収束性の改善をはかる改良アルゴリズムを提案す

る。第二は、シューティング法を拡張し、2信号入力を持つ非線形回路の効率的解析を目的として、非線形回路を周期的線形時変回路としてモデル化し、その小信号伝達特性と雑音を効率的に計算するアルゴリズムを提案する。

本研究では、2信号入力を回路のうち多くは1信号は微小であり、小信号と見なし得ることに着目し、1信号に対しては線形、1信号に対しては非線形という仮定のもとに、非線形回路を周期的線形時変回路としてモデル化する。たとえば、周波数変換器の場合、変調信号は小信号、局発信号は大信号と見ることができるとすると、小信号から見ると非線形回路は大信号により周期的に動作点に変化する線形時変回路としてモデル化することができる。

このようにモデル化した周期的線形時変回路の伝達特性は、周期的変回路の離散時刻の等価回路を使って計算することができる。本研究では、この等価回路を導出するために、まず、定常解析を用いて大信号に対する周期的定常応答を求める。そして、この周期的定常応答の数値積分過程において計算される線形抵抗回路網を離散的周期時変等価回路として利用する。非線形回路の数値積分は、時刻を離散化し、ニュートン法の線形化反復法を適用して、最終的にはすべて線形抵抗回路網に帰着して行われる。したがって、各離散時刻において、ニュートン法が収束していれば、この線形抵抗回路網を大信号によりパラメータが変化する周期的時変回路として見なおすことができる。

大信号が加わる非線形回路の雑音解析については、折り返しの問題と、雑音源が大信号によって変調される問題を考える必要がある。折り返しを考慮した雑音解析は本研究で提案する非線形回路の小信号解析を繰り返すことにより実現できる。後者の問題は次のように解決した。

例えば、ダイオードのショット雑音の電力スペクトル密度はダイオードに流れる電流に依存する。そして、その電流は周期的大励振が加わると、周期的に変化する。これまでの雑音解析では、雑音源はその統計的性質が時間に依存しない定常確率過程のランダム信号と仮定した。しかしながら、この仮定は大信号が流れるダイオードのショット雑音に関しては成り立たない。統計的性質が周期的に変化する場合、その雑音は周期定常確率過程として取り扱う必要がある。本研究では、周期定常過程の雑音を、周期的な窓関数を通った定常確率過程の雑音の和としてモデル化し、定常確率過程の雑音解析を拡張した形で周期定常確率過程の雑音を計算する手法を提案する。

本研究で提案した種々のアルゴリズムはSPICEを基本として開発した非線形電子回路解析プログラムSPREADに組み込み、厳密解との比較、測定結果との比較、また、他の手法との比較を加味し、その有効性を確認した。

本研究では、従来の手法では計算時間の点で検証が困難だった問題、あるいは解析不可能であった問題を解決し、設計段階で知る手法を得た。その結果、集積回路の試作回数を減らすことができ、開発期間の短縮を期待できることになった。

本論文は、以上概説した内容について詳しく論述したものであり、以下に示す7章より構成されている。

第1章は緒言であり、本論文の目的、および概要について述べる。

第2章は本研究の技術的背景、および動機を明確にするために、非線形電子回路解析の基礎的考

察を行う。本研究は第2章で考察した内容に基づいて、その問題点を解決するために行ったものである。

第3章では大信号入力に対する非線形回路の周期的定常応答を効率的に求める定常解析について検討する。まず、従来法であるハーモニックバランス法とシューティング法のアルゴリズムを述べる。次にシューティング法について、その問題点を解決するために、収束性と計算量の観点から性能を改善するアルゴリズムを提案する。本手法により、シューティング法の適用回路規模が大きくなり、収束性が向上し、実設計への利用が初めて可能となった。ハーモニックバランス法とシューティング法の適用回路と計算時間の比較検討についても合わせて述べる。

第4章では2信号入力の非線形回路を効率的に解析することを目的として、2信号入力回路のうち多くの回路は1信号は微小であることに着目し、周期的線形時変回路としてモデル化することを提案する。また、その導出法と周期的線形時変回路の性質について述べる。

第5章では第4章で提案した周期的線形時変回路モデルに基づいて、非線形回路の小信号解析手法を提案する。本手法では、第3章で述べた定常解析を利用することにより、計算を効率的にした。また、小信号解析の実現に関して、数値積分法の選択による計算量への影響、および時間の離散化に伴う誤差について考察を加える。また、厳密解との比較、他の手法との比較により、アルゴリズムを検証する。さらに、本手法の実設計への応用例をあげてその有効性を確認する。

第6章では、小信号解析を拡張し、非線形回路の雑音解析手法を提案する。まず、定常確率過程の雑音に対する出力雑音の計算手法について述べる。次に周期定常確率過程の雑音モデルを提案し、その雑音に対する出力雑音の計算手法について述べる。例題回路について測定結果と比較し、アルゴリズム、およびモデルの検証を行う。

第7章は結言である。

以上、本論文の要旨を概説した。

審査結果の要旨

小信号入力と大信号励振の2入力が印加されて動作する、スイッチトキャパシタフィルタのような非線形電子回路においては、その回路解析に極めて多大な計算量を要することが設計上の問題点とされていた。

著者はこの種の非線形電子回路が小信号入力からみると、大信号励振により周期的に動作点変動する線形時変回路と見なせることに着目し、等価モデルとして周期的線形時変回路を提案しその性質を明らかにすると共に、周波数特性と雑音の効率的解析法を確立し、得られた成果を実際の集積回路設計に応用してその有用性を実証した。本論文は、その成果をとりまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では、非線形電子回路解析の基礎的考察を行い、周波数特性と雑音の効率的解析を行う上で考慮すべき事柄や問題点を明確にしている。

第3章では、非線形電子回路の周期的定常応答の解析に有用なシューティング法の計算量削減と収束性改善の観点から、時定数の小さい状態変数を削除するアルゴリズムを考案している。本アルゴリズムが組み込まれた回路シミュレータ (SPREAD) を用い、5種類の実際の回路についてシュミレーションを行っている。その結果、従来法と比較して適用可能な回路規模が1~2桁増大することを実証している。これは重要な成果である。

第4章では、小信号入力と大信号励振の2入力に加えられて動作する非線形電子回路の等価モデルとして、大信号により周期的に動作点変動する線形時変回路、すなわち周期的線形時変回路を与え、その性質を明らかにしている。

第5章では、前章で得られた周期的線形時変回路に基づき、シューティング法による定常解析を利用して、離散時間の周期的時変伝達関数の効率的計算法を与えている。この手法が組み込まれた回路シミュレータを用いることにより、従来計算量が膨大になるために困難とされていたスイッチトキャパシタフィルタの解析、低雑音増幅器の妨害波による影響の解析などが行えることを明らかにしている。これは設計上有用な成果である。

第6章では、周期的大信号により変調される雑音を、周期的な窓関数を通った定常確率過程の雑音の和とみなし、周期的線形時変回路に基づく出力雑音の効率的解析法を与えている。回路シミュレータの実行例により本解析法の有用性を実証している。

第7章は結言である。

以上要するに本論文は、非線形電子回路のモデルとしての周期的線形時変回路を提案し、周波数特性と雑音の効率的解析法を確立すると共に、設計に応用することによりその有用性を実証したもので、電子工学および情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論として合格と認める。