

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2021年1月14日(14.01.2021)



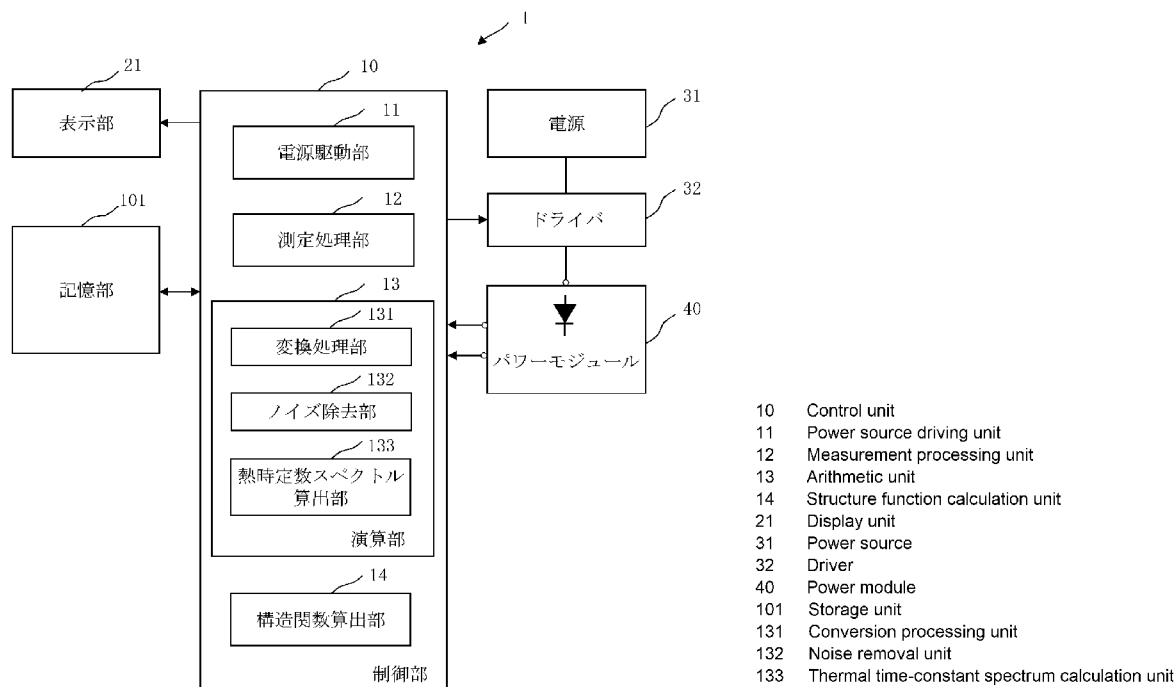
(10) 国際公開番号

WO 2021/006288 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 25/18 (2006.01) G01R 31/26 (2020.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2020/026665
- (22) 国際出願日: 2020年7月8日(08.07.2020)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2019-127344 2019年7月9日(09.07.2019) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人大阪大学 (OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 福永 崇平 (FUKUNAGA Shuhei); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 舟木 剛 (FUNAKI Tsuyoshi); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 加藤 史樹 (KATO Fumiki); 〒3058560 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第一事業所 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人 楓国際特許事務所 (KAEDE PATENT ATTORNEYS' OFFICE); 〒5400011 大阪府大阪市中央区農人橋1丁目4番34号 Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,

(54) Title: TRANSIENT THERMAL CHARACTERISTIC ANALYSIS DEVICE, ANALYSIS METHOD, AND PROGRAM

(54) 発明の名称: 過渡熱特性解析装置、解析方法及びプログラム



(57) Abstract: A transient thermal characteristic analysis device (1) analyzes transient thermal characteristics of a power module (40) on the basis of time-sequential data which is junction temperatures sampled at an equal linear time interval in a heat radiation process of the power module (40). The transient thermal characteristic analysis device (1) is provided with: a conversion processing unit (131) that re-samples the time-sequential data at unequal intervals, converts the time-sequential data into logarithmic time, and executes numerical differentiation on the converted time-sequential data;

BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

規則4. 17に規定する申立て:

- 一 先の出願に基づく優先権を主張する出願人の資格に関する申立て(規則4. 17(iii))

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

a conversion processing unit (131) that executes unequal interval Fourier transformation on the numerically differentiated time-sequential data; and a noise removal unit (132) that carries out a noise removal process in a frequency region for the Fourier transformed time-sequential data. Accordingly, the transient thermal characteristics of the power module is analyzed more accurately.

(57) 要約: 過渡熱特性解析装置(1)は、パワーモジュール(40)の放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データからパワーモジュール(40)の過渡熱特性を解析するものである。過渡熱特性解析装置(1)は、時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理部(131)と、数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施す変換処理部(131)と、フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去部(132)とを備えている。これにより、パワーモジュールの過渡熱特性をより高精度で解析する。

明 細 書

発明の名称： 過渡熱特性解析装置、解析方法及びプログラム

技術分野

[0001] 本発明は、パワーモジュールの過渡熱特性を解析する技術に関する。

背景技術

[0002] 近年、車載用、電力系用等のパワーエレクトロニクス分野において、電力変換回路に適用されるパワー半導体デバイス及びこれを1又は複数個搭載してモジュール化したパワー半導体モジュール（以下、まとめてパワーモジュールという。）の高機能化が進んでいる。一方、かかる高機能化に伴って発熱量が問題となっている。例えば、電力変換回路のスイッチング動作時に、パワーモジュールにおいて生じる損失が熱となり、パワーデバイス及び周辺部品であるコンデンサやリアクトル等の温度上昇を招く。この結果、動作時と停止時との間の温度差環境が繰り返し発生すると、パワーモジュールの接合部等が劣化する虞がある。また、近年では、負荷急変時や故障時の過電流に起因する瞬時的な発熱を考慮したパワーモジュールの過渡熱特性に対する設計及び評価も求められている。さらに、パワーモジュールのパッケージ技術の進歩に伴って熱特性が改善されて熱等価回路パラメータの値が小さくなっており、より高い精度での解析、評価手法が求められている。

[0003] 過渡熱特性の解析では、パワーモジュールの電気的特性の温度依存性（温度パラメータ）を用いて測定されるジャンクション温度の時系列応答（時系列データ）から算出される、構造関数と呼ばれる熱抵抗と熱容量とからなる熱等価回路を用いる。逆畳み込み積分を用いて過渡熱特性を表す熱等価回路のパラメータを算出する方法として、非特許文献1に示す、JEDEC（米国合同電子デバイス委員会）の規格による過渡熱特性測定法（JESD51-14）が知られている。

[0004] 図8は、JESD51-14測定法に基づく従来の解析アルゴリズムを示す。この解析アルゴリズムでは、まず過渡温度測定工程において、パワーモジュールの

ジャンクション温度の時系列データが、例えば μ 秒単位で、線形時間領域で等間隔にサンプリングされる（ステップS101）。次いで、移動平均デジタルフィルタを用いて、線形時間領域におけるノイズフィルタリング処理が施されて、ジャンクション温度の時系列データに含まれるノイズの除去処理が行われる（ステップS103）。次いで、ノイズが除去されたジャンクション温度の時系列データに対して対数時間領域への変換処理が行われる（ステップS105）。データの変換は、対数時間領域で等間隔となるように、データが間引きや補間等によってリサンプリングされる。そして、逆畳み込み積分により熱回路モデルのパラメータを同定するための前処理としての数値微分が実行され（ステップS107）、続いて、逆畳み込み積分による熱時定数スペクトルの算出が行われる（ステップS109）。この後、熱回路の一次元モデル例としてのFoster回路のパラメータが同定され（ステップS111）、さらに、同定されたパラメータを用いて、Foster-Cauer変換を経て構造関数の算出が行われる（ステップS113）。

[0005] また、特許文献1には、ヒートシンクを第1、第2の状態に配置して順方向電圧をサンプリングし、各状態で得られたジャンクション温度から過渡熱抵抗値及びその微分値を算出して表示部に表示する装置が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2019-15564号公報

非特許文献

[0007] 非特許文献1：JESD51-14, JEDEC (2010)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 最近では、パワーモジュールのパッケージ技術の進歩によって熱特性が改善され、熱等価回路パラメータの値が小さくなっているため、従来の手法では、要求される精度での評価が困難になってきている。JEDECの規格による解

析方法では、具体的な数値処理アルゴリズムは定義されていない。また、当該規格が適用されたMentor Graphics 社製の解析装置T3Ster、及びその解析プログラムであるT3SterMasterによれば、ノイズ除去は、電氣的に得られたジャンクション温度の時系列データに対して時間領域で移動平均フィルタリング処理を施したに過ぎない。そのため、ホワイトノイズ等の測定ノイズや量子化誤差が必ずしも効果的に除去できるとはいえない。このような場合、熱等価回路のパラメータの算出においてノイズが相対的に顕在化してしまう。また、ノイズ除去処理で除去しきれなかったノイズ成分が数値微分によって結果的に顕在化してしまう虞もある。さらに、特許文献1に記載の装置は、測定した順方向電圧をジャンクション温度に換算する記載はあるものの、測定電圧に含まれるノイズ成分を除去する方法は考慮されていない。

[0009] 本発明は、上記に鑑みてなされたもので、パワーモジュールのジャンクション温度の時系列データ（プロファイル）に対して周波数領域でノイズ成分を除去することで、より精度の高い解析を可能にする過渡熱特性解析装置、解析方法及びプログラムを提供するものである。

課題を解決するための手段

[0010] 本発明に係る過渡熱特性解析装置は、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析装置において、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段と、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段とを備えたものである。

[0011] また、本発明に係る過渡熱特性解析方法は、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析方法において、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間

に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換工程と、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換工程と、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去工程とを備えたものである。

[0012] また、本発明に係るプログラムは、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性をコンピュータにより解析するプログラムにおいて、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段、及び前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段として、前記コンピュータを機能させるものである。

[0013] これらによれば、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データが得られ、ジャンクション温度の時系列データからパワーモジュールの過渡熱特性の解析が行われる。すなわち、前記時系列データは、変換処理手段により、不等間隔でリサンプリングされて対数時間に変換され、さらに変換された時系列データに数値微分が施される。また、前記数値微分が施された時系列データは、フーリエ変換手段により、不等間隔フーリエ変換が施される。そして、ノイズ除去手段により、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理が行われる。

[0014] 例えば、パワーモジュールの過渡熱特性を表す熱等価回路パラメータを求めるために、パワー半導体デバイスの電気特性の温度依存性を利用してパワーモジュールのジャンクション温度の時系列データは、測定時の電圧、電流値から換算される。このとき、電圧、電流値にノイズが重畳すると、このノイズが過渡熱特性の解析において誤差要因となる。そこで、従来用いられていた時系列データに対する時間領域でのノイズフィルタリングの代わりに、

すなわち、得られた時系列データを時間領域でフィルタリングせずに、一旦不等間隔で対数時間に変換し、数値微分した後に不等間隔でフーリエ変換を行って、周波数領域においてノイズを除去する。このようにしてノイズの影響を一層低減可能にする。測定された時系列データの線形時間領域から対数時間への変換を不等間隔で行うことで、従来のようなデータの間引きや補間による類似データを適用する方法に代えて、元々測定されたデータ自身を全て使用可能としている。また、測定された時系列データのうちの全域の他、一部期間を抽出し、当該期間に特有な過渡熱特性の解析に対して不要となる周波数特性のノイズを適宜除去するフィルタを適用する態様もある。以上によれば、ノイズ成分の周波数特性に対応させて、例えば高周波成分の除去とか中間周波数成分の除去とかの効果的なノイズ除去が可能となる。しかも、解析ソフトウェア側でノイズ低減が可能となるため、再現性の高い過渡熱特性解析が可能となる。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、パワーモジュールの過渡熱特性を高精度で解析することができる。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]本発明に係る過渡熱特性解析装置の一実施形態を示すブロック図である。

[図2]パワーモジュールの一例を示す側面断面図である。

[図3]本発明に係る過渡熱特性解析アルゴリズムを示すフローチャートである。

[図4]対数時間軸でのジャンクション温度の時系列データの微分値を示すタイムチャートで、（A）はジャンクション温度の時系列データの数値微分を示し、（B）は本発明に係る解析法（実施例）と従来の解析法（比較例）によるノイズ低減効果を説明する図である。

[図5]対数時間軸での熱等価回路パラメータの算出に用いる、実施例と比較例における熱時定数スペクトルを示す図である。

[図6]ジャンクション温度の時系列データ（ideal）に重畳する各レベルに対応したサンプルとしての乱数ノイズのパワースペクトルを示す図である。

[図7]図6に示すサンプルノイズを重畳した場合の、実施例と比較例とにおけるノイズ低減効果の違いを示す図表で、数値は真値からのRMS（Root Mean Square）値を示している。

[図8]JESD51-14測定法に基づく従来の過渡熱特性解析アルゴリズムを示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0017] 図1は、本発明に係る過渡熱特性解析装置の一実施形態を示すブロック図である。過渡熱特性解析装置1は、パワーモジュール40のジャンクション温度の時系列データをサンプリングし、必要なノイズ除去処理を施した後、構造関数の過渡熱特性を解析、評価する。過渡熱特性解析装置1は、典型的にはコンピュータで処理される。なお、ジャンクション温度の測定部位は、パワーモジュール40内の半導体との接合部である。また、コンピュータは、プロセッサ（CPU）で演算処理を行う制御部10を備えている。

[0018] 過渡熱特性解析装置1は、また、表示部21、記憶部101、さらに測定系側の電源31及び給電用のドライバ32を備えている。制御部10は、表示部21、記憶部101及びドライバ32と接続されると共に、測定系に接続（セット）された解析対象のパワーモジュール40のジャンクション部と接続可能にされている。

[0019] 表示部21は、画像を表示するもので、必要に応じて設けられる。表示部21は、例えばタッチパネル等の図略の入力部を介して設定される内容を確認的に表示したり、解析内容を種々の態様で表示したりする。記憶部101は、制御部10のプロセッサが実行する処理プログラムを記憶すると共に、処理プログラムを実行する上で必要なデータ類、例えば各種数値計算式、各種変換式、各種関数、パワーモジュール40の温度パラメータ（温度依存性）等を記憶する。記憶部101は、また、処理途中のデータを一時的に記憶するワークエリアを備えている。

[0020] 電源 31 は、パワーモジュール 40 を所定温度に一旦加熱する加熱用の大電流及び放熱乃至冷却時でのジャンクション温度計測用の微小な小電流が出力可能な電源回路を構成している。電源 31 は、大電流用電源回路と小電流用電源回路とを個別に設けた態様でもよい。ドライバ 32 は、電源 31 から前記大電流用と小電流用とを切り替えてパワーモジュール 40（の接合部）に供給するための IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）等からなる。ドライバ 32 は、後述するように制御部 10 からの駆動信号に従って駆動され、所定の電流を出力するように制御される。

[0021] 制御部 10 は、パワーモジュール 40 のジャンクション部、例えばダイオードの順方向電圧及び電流を A/D 変換部等を経由して取り込む。制御部 10 は、計測した電圧及び電流から温度パラメータを用いてジャンクション温度の時系列データを得る。

[0022] ここで、図 2 を用いて本実施形態に係る解析対象のパワーモジュール 40 の構成を説明する。パワーモジュール 40 は、本実施形態では、半導体パッケージ 41 が放熱材としてのグリース 45 を介してヒートシンク 46 上に搭載されている。パワーモジュール 40 は、チップ 42、ダイアタッチ 43 及びダイパッド 44 を備え、典型的にはチップ 42 上にジャンクション部がある。パッケージ 41 の材質（熱伝導性）、形状及びサイズ、さらにチップ 42 からグリース 45 までの放熱経路における各部材の材質、形状及びサイズによって熱抵抗が調整可能となる。また、各部材の表面状態も調整対象となり得る。なお、リード線 47 も放熱経路の一部として考慮すべき場合もある。

[0023] 制御部 10 は、記憶部 101 に記憶されている処理プログラムをプロセッサで実行することで、電源駆動部 11、測定処理部 12、演算部 13 及び構造関数算出部 14 として機能する。演算部 13 は、変換処理部 131、ノイズ除去部 132 及び熱時定数スペクトル算出部 133 を備えている。

[0024] 電源駆動部 11 は、パワーモジュール 40 に供給する電流レベルを制御する。電源駆動部 11 は、解析アルゴリズムの開始指示を受けると、ドライバ

32に対して、まず大電流を出力させ、所定温度に達した時点で過渡温度測定工程に移行して、所定レベルの小電流に切り替えて出力させるものである。

[0025] 以降、測定処理部12から構造関数算出部14までの説明を、図3に示す解析アルゴリズムを参照して行う。測定処理部12は、過渡温度測定工程の開始指示を受けると、所定周期、例えば μ 秒単位で、すなわち線形時間領域で等間隔にパワーモジュール40のジャンクション部からの電圧値をその時点の電流値と共にA/D変換して周期的に読み取る。測定処理部12は、読み取った電圧値及びその時点の電流値を温度パラメータを用いて変換することでジャンクション温度の時系列データのサンプリング（記憶部101に記憶）を行うものである（図3のステップS1参照）。また、測定処理部12は、演算部13による処理のための前処理を実行する。前処理としては、例えば間引き処理、オフセット処理（初期データカット処理、図4（A）参照）、過渡熱抵抗の計算処理がある。

[0026] 変換処理部131は、後述する種々の変換処理を実行する。本実施形態では、変換処理部131は、線形時間領域で等間隔にサンプリングされたジャンクション温度の時系列データを、対数時間領域のデータに変換する際に不等間隔でリサンプリングする処理を行う（図3のステップS3参照）。不等間隔でリサンプリングすることで、測定した時系列データを全て用いることができデータの欠落をなくし、精度を維持している。また、変換処理部131は、対数時間領域で不等間隔にリサンプリングされた時系列データに対して数値微分処理を実行する（図3のステップS5参照）。なお、変換処理部131は、取得した時系列データそのものを数値微分処理に使用するので、精度が維持され、その結果、より高いノイズ低減性能が発揮可能となる。

[0027] また、変換処理部131は、数値微分が施された時系列データに対して不等間隔離散フーリエ変換を行って、時系列データを周波数領域に変換する（図3のステップS7参照）。さらに、変換処理部131は、ノイズフィルタリングでノイズ除去処理が実行された時系列データに対して対数時間領域で

等間隔にリサンプリング処理を施して逆離散フーリエ変換を行う（図3のステップS11参照）。

[0028] ノイズ除去部132は、不等間隔離散フーリエ変換が施された時系列データを周波数領域においてノイズフィルタリングするものである（図3のステップS9参照）。ノイズフィルタリングは、本実施形態では、ジャンクション温度データを取得する時に、パワーモジュール40側及び測定系側から混入する前記したホワイトノイズ等の高周波成分ノイズを効果的に除去するローパスフィルタであることが好ましい。例えば、Fermi-Diracフィルタ関数が採用可能である。また、測定時に冷却器を採用する態様では、冷却ノイズも除去対象とすることが好ましい。なお、バンドパスフィルタも高周波除去（ローパスフィルタ）機能を備えるものとして適用可能である。

[0029] 熱時定数スペクトル算出部133は、図3のステップS11で逆離散フーリエ変換された時定数データに対して、逆畳み込み積分による熱時定数スペクトルの算出を行う（図3のステップS13参照）。

[0030] 構造関数算出部14は、算出された熱時定数スペクトルから、熱回路の一次元モデル例としてのFoster回路のパラメータの同定を行う（図3のステップS15参照）。また、構造関数算出部14は、同定されたパラメータを用いて、Foster-Cauer変換を経て構造関数（熱抵抗、熱容量）の算出を行う（図3のステップS17参照）。得られた構造関数の内容から各部材に対する改善、改良すべき事項が容易に識別可能となる。

[0031] 続いて、図3のフローチャートを用いて本発明に係る解析アルゴリズムを説明する。

[0032] なお、図3において、図8と共通する処理部分はMentor Graphics 社製の解析装置T3Sterを適用している。また、図4、図5に示す比較例及び実施例の各データは、解析装置T3Sterに基づいて、及び解析装置T3Sterの処理手順を図3の手順に変更して適用して作成されている。

[0033] 図3において、先ず、解析対象のパワーモジュール40が過渡熱特性解析装置1にセットされる。測定処理部12は、過渡温度測定工程の開始指示を

受けると、例えば1 μ 秒という線形時間領域で等間隔にパワーモジュール40のジャンクション部からの電圧及び電流値をA/D変換して読み取り、温度パラメータを用いて変換することでジャンクション温度の時系列データのサンプリングを行う（ステップS1）。また、測定処理部12は、次いで演算部13による処理のための前処理を実行する。

[0034] 続いて、変換処理部131は、ステップS1で得られたジャンクション温度の時系列データを対数時間領域のデータに変換する（ステップS3）。このとき、時系列データは、そのまま、すなわち対数時間領域において不等間隔のままでリサンプリングされる。このように取得した時系列データそのものを使用するので、精度が維持され、その結果、より高いノイズ低減性能が発揮される。

[0035] また、変換処理部131は、対数時間領域で不等間隔にリサンプリングされた時系列データに対して数値微分処理を実行する（ステップS5）。図4（A）には、前記前処理が施されたジャンクション温度の時系列データの数値微分の一例が示されている。図4では、横軸は対数時間、縦軸は数値微分の正規化レベルである。

[0036] 次いで、変換処理部131は、数値微分が施された時系列データに対して不等間隔離散フーリエ変換を行って、時系列データを周波数領域に変換する（ステップS7）。

[0037] 次いで、ノイズ除去部132は、不等間隔離散フーリエ変換が施された時系列データを周波数領域においてノイズフィルタリングする（ステップS9）。ノイズフィルタリングは、本実施形態では、ジャンクション温度データを取得する時に、パワーモジュール40側及び測定系側から混入する前記したホワイトノイズ等の高周波成分ノイズを効果的に除去するローパスフィルタである。

[0038] 次いで、変換処理部131は、ノイズフィルタリングでノイズが除去された時系列データに対して対数時間領域で等間隔にリサンプリング処理を施して逆離散フーリエ変換を行う（ステップS11）。

[0039] 図4 (B) は、図4 (A) を元にして、ステップS 1 1で逆離散フーリエ変換を行った結果の一例（実施例）を示している。なお、図4 (B) において、比較例は、図8に示す従来の解析アルゴリズムを適用したもので、図4 (A) の数値微分をそのまま逆離散フーリエ変換したものである。図4 (B) から分かるように、比較例で示す図形にはノイズ成分に相当する高周波成分が残留している一方、実施例で示す図形は、高周波成分の残留が殆ど見られない曲線であり、すなわちノイズ成分が効果的に除去されていることが分かる。なお、図4 (B) の縦軸は、同図 (A) に比して拡大されている。

[0040] 次いで、熱時定数スペクトル算出部1 3 3は、ステップS 1 1で逆離散フーリエ変換された時定数応答に対して、逆畳み込み積分による熱時定数スペクトルの算出を行う（ステップS 1 3）。図5は、熱時定数スペクトルを示す図で、比較例で示す熱時定数スペクトルの図形は全体的になだらかであり、特に初期時間側でのレベル変化も小さい。一方、実施例で示す熱時定数スペクトルの図形は相対的に波打ち波形が見られ、特にピークが相対的に高レベルを示し、ノイズがより除去された熱時定数スペクトルが得られている。さらに初期時間側で波打ち傾向が顕著（レベル変化が大きい）となっていることから全体的にもノイズがより除去されていることが分かる。

[0041] 次いで、構造関数算出部1 4は、算出された熱時定数スペクトルから、熱回路の一次元モデル例としてのFoster回路のパラメータの同定を行い（ステップS 1 5）、続いて、同定されたパラメータを用いて、Foster-Cauer変換を経て構造関数（熱抵抗、熱容量）の算出を行う（ステップS 1 7）。そして、算出された各部材の構造関数は表示部2 1に表示される。

[0042] 次に、図6、図7により、実施例と比較例によるノイズ低減効果の違いの一例をサンプルノイズを用いて説明する。図7の数値は、各レベルのサンプルノイズをMentor Graphics 社製の解析装置T3Sterに適用した場合の数値であり、比較例の数値は、図8のアルゴリズムの実施に基づき、実施例の数値は、図3のアルゴリズムの実施に基づくものである。

[0043] 図6では、ジャンクション温度の時系列データ（真値；ideal）のパワース

ペクトルに、例えば、-60dB（ノイズレベル：0.1%），-46dB（ノイズレベル：0.5%），-40dB（ノイズレベル：1.0%），-26dB（ノイズレベル：5.0%）のレベルのサンプル乱数ノイズのパワースペクトルを重畳している。図6に示す各ノイズを重畳した場合の、真値からのRMS（Root Mean Square）値は、比較例が、-60dB側から、順番に、 2.24×10^{-4} ， 5.93×10^{-4} ， 1.08×10^{-3} ， 1.01×10^{-2} ，であるのに対して、実施例が、 25.02×10^{-5} ， 2.40×10^{-4} ， 3.39×10^{-4} ， 8.02×10^{-3} である。このように、いずれのレベルのノイズに対しても、実施例の方が、略1桁乃至数倍程度、ノイズの除去ができていることが認められる。特に、実際のノイズレベルは、-40dB（ノイズレベル：1.0%）程度と考えられるが、それよりも5倍（-26dB（ノイズレベル：5.0%））程度のノイズについても、より高いノイズ除去効果が得られている。

[0044] なお、図7に示すデータは、以下のパラメータ（ $R_1 = 6.63 \times 10^{-3}$ ， $C_1 = 1.24 \times 10^{-2}$ ， $R_2 = 1.35 \times 10^{-3}$ ， $C_2 = 6.77 \times 10^{-2}$ ， $R_3 = 5.98 \times 10^{-3}$ ， $C_3 = 2.22 \times 10^{-2}$ ）を仮定した3段Foster回路から数値計算された、1 μ 秒サンプリングを仮定した温度応答データをidealとしている。このデータに対し、ノイズレベル（振幅）をパラメータとして、乱数による一様ノイズを重畳したデータに対して解析を対象としている。

[0045] 本発明は、以下の態様を含むことができる。

[0046] （1）解析対象のパワーモジュールには、電力変換用の他、発熱が問題となるような半導体デバイスの全般、さらに発光用LEDを含めてもよい。

[0047] （2）過渡熱特性解析装置1は、構造関数算出部14までを含める態様の他、熱時定数スペクトル算出までの構成と、構造関数算出を行う構成とに分けた態様としてもよい。

[0048] （3）過渡熱特性解析装置1は、前記各部を全て備えた態様である必要はなく、演算部13までを備えた態様、あるいは演算部13のノイズ除去部132までの構成を少なくとも備えた態様であってもよく、これらの場合、構造関数算出部14までの残りの各部は別個の装置で実行可能にすればよい。

[0049] （4）さらに、過渡熱特性解析装置は、以下の態様を採用してもよい。すな

わち、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析装置において、前記時系列データを対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段と、前記数値微分が施された時系列データにフーリエ変換を施すフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段とを備えたものでもよい。このように、時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うことで、従来装置に比してより精度の高い熱時定数スペクトルを算出することが可能となる。

[0050] そして、前記の構成において、前記変換処理手段を、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施すものとし、前記フーリエ変換手段を、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すものとしてもよい。この場合、対数及びフーリエ変換された時系列データを不等間隔とすれば、等間隔にリサンプリングする場合に比して、より精度の高い過渡熱特性の解析が期待できる。

[0051] 以上説明したように、本発明は、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析装置において、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段と、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段とを備えることが好ましい。

[0052] また、本発明は、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析方法において、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系

列データに数値微分を施す変換工程と、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換工程と、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去工程とを備えることが好ましい。

[0053] また、本発明は、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性をコンピュータにより解析するプログラムにおいて、前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段、前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段、及び前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段として、前記コンピュータを機能させることが好ましい。

[0054] これらの発明によれば、パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データが得られ、ジャンクション温度の時系列データからパワーモジュールの過渡熱特性の解析が行われる。すなわち、前記時系列データは、変換処理手段により、不等間隔でリサンプリングされて対数時間に変換され、さらに変換された時系列データに数値微分が施される。また、前記数値微分が施された時系列データは、フーリエ変換手段により、不等間隔フーリエ変換が施される。そして、ノイズ除去手段により、前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理が行われる。

[0055] 例えば、パワーモジュールの過渡熱特性を表す熱等価回路パラメータを求めるために、パワー半導体デバイスの電気特性の温度依存性を利用してパワーモジュールのジャンクション温度の時系列データは、測定時の電圧、電流値から換算される。このとき、電圧、電流値にノイズが重畳すると、このノイズが過渡熱特性の解析において誤差要因となる。そこで、従来用いられていた時系列データに対する時間領域でのノイズフィルタリングの代わりに、

すなわち、得られた時系列データを時間領域でフィルタリングせずに、一旦不等間隔で対数時間に変換し、数値微分した後に不等間隔でフーリエ変換を行って、周波数領域においてノイズを除去するようにしてノイズの影響を一層低減可能にする。測定された時系列データの線形時間領域から対数時間への変換を不等間隔で行うことで、従来のようなデータの間引きや補間による類似データを適用する方法に代えて、元々測定されたデータ自身を全て使用可能としている。また、測定された時系列データのうちの全域の他、一部期間を抽出し、当該期間に特有な過渡熱特性の解析に対して不要となる周波数特性のノイズを適宜除去するフィルタを適用する態様もある。以上によれば、ノイズ成分の周波数特性に対応させて、例えば高周波成分の除去とか中間周波数成分の除去とかの効果的なノイズ除去が可能となる。しかも、解析ソフトウェア側でノイズ低減が可能となるため、再現性の高い過渡熱特性解析が可能となる。

[0056] また、前記ノイズ除去手段は、周波数領域における高周波数成分を除去するものであることが好ましい。また、特に前記ノイズ除去手段は、ローパスフィルタであることが好ましい。かかる構成によれば、時系列データの測定時に重畳するノイズの特性に応じた周波数成分、例えば高周波成分を選択的に除去することが可能となり、その場合、簡易なローパスフィルタが適用されることが好ましい。

[0057] また、本発明は、前記ノイズ除去手段で処理された時系列データを対数時間等間隔でリサンプリングして逆離散フーリエ変換する逆フーリエ変換手段と、前記逆フーリエ変換手段で処理された時系列データに、逆畳み込み積分を施して熱時定数スペクトルを算出する算出手段とを備えることが好ましい。この構成によれば、周波数領域においてノイズを除去することで、熱等価回路パラメータの算出に必要な熱時定数スペクトルに対するノイズの影響を低減可能にしている。また、測定した時系列データは、線形時間領域において等間隔でサンプリングされたデータであるため、対数時間領域ではサンプリング間隔が不等間隔となる。そこで、線形時間領域において不等間隔フー

リエ変換を適用することで、線形時間でのリサンプリングによる元データの欠落を抑制した。さらに、逆フーリエ変換で、対数時間等間隔でのリサンプリングを行った。このように、ノイズがより抑制された熱時定数スペクトルを得ることで、構造関数を高い精度で算出することが可能となる。

符号の説明

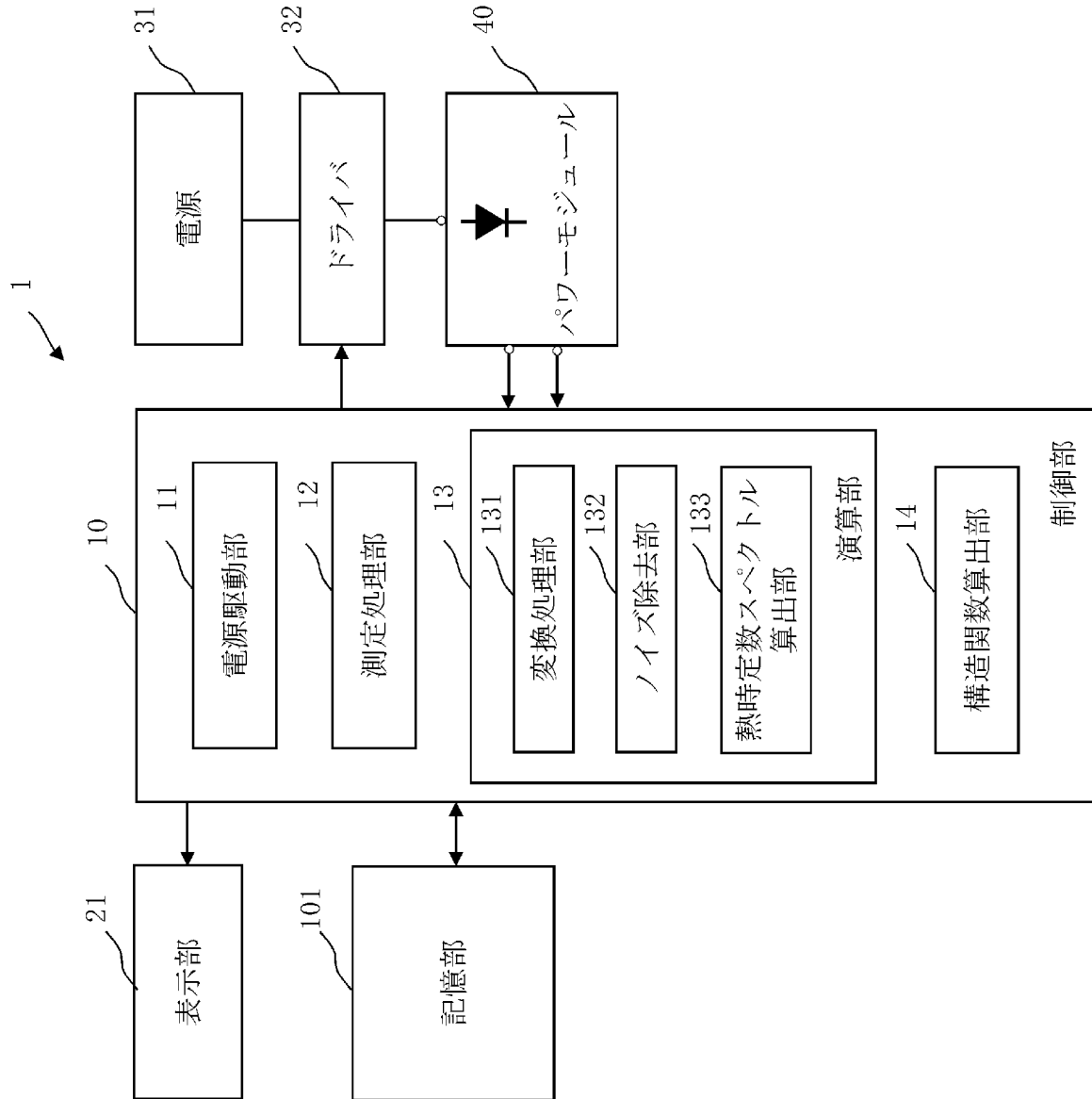
- [0058] 1 過渡熱特性解析装置
- 1 0 制御部
- 1 2 測定処理部
- 1 3 演算部
- 1 3 1 変換処理部（変換処理手段、フーリエ変換手段、逆フーリエ変換手段）
- 1 3 2 ノイズ除去部（ノイズ除去手段）
- 1 3 3 熱時定数スペクトル算出部（算出手段）
- 1 4 構造関数算出部
- 4 0 パワーモジュール

請求の範囲

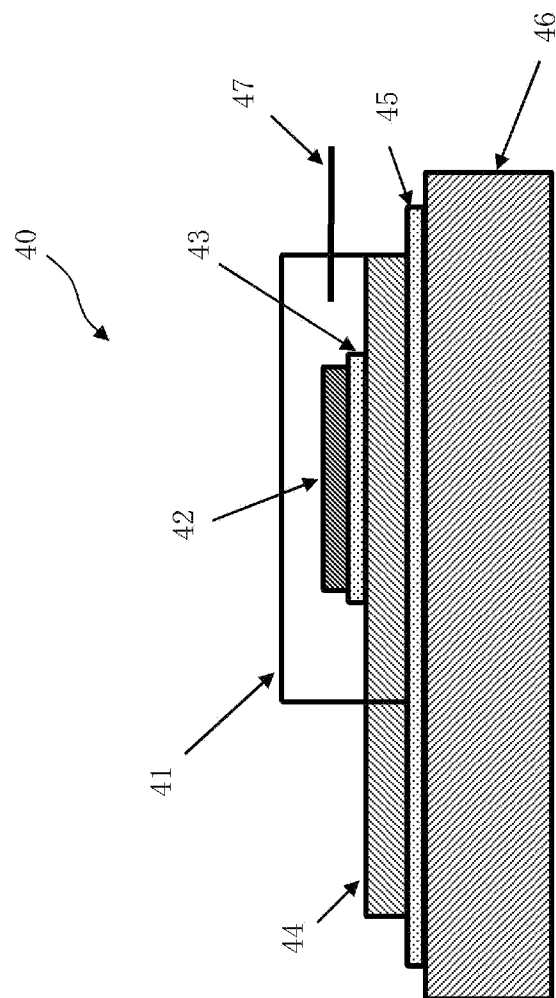
- [請求項1] パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析装置において、
- 前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段と、
- 前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段と、
- 前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段とを備えた過渡熱特性解析装置。
- [請求項2] 前記ノイズ除去手段は、周波数領域における高周波数成分を除去する請求項1に記載の過渡熱特性解析装置。
- [請求項3] 前記ノイズ除去手段は、ローパスフィルタである請求項2に記載の過渡熱特性解析装置。
- [請求項4] 前記ノイズ除去手段で処理された時系列データを対数時間等間隔でリサンプリングして逆離散フーリエ変換する逆フーリエ変換手段と、
- 前記逆フーリエ変換手段で処理された時系列データに、逆畳み込み積分を施して熱時定数スペクトルを算出する算出手段とを備えた請求項1～3のいずれかに記載の過渡熱特性解析装置。
- [請求項5] パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性を解析する過渡熱特性解析方法において、
- 前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換工程と、
- 前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換工程と、
- 前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去工程とを備えた過渡熱特性解析方法。

- [請求項6] パワーモジュールの放熱過程において線形時間等間隔でサンプリングしたジャンクション温度である時系列データから前記パワーモジュールの過渡熱特性をコンピュータにより解析するプログラムにおいて、
- 前記時系列データを不等間隔でリサンプリングして対数時間に変換し、変換された時系列データに数値微分を施す変換処理手段、
- 前記数値微分が施された時系列データに不等間隔フーリエ変換を施すフーリエ変換手段、及び
- 前記フーリエ変換された時系列データに対して周波数領域でのノイズ除去処理を行うノイズ除去手段として、前記コンピュータを機能させるプログラム。

[図1]



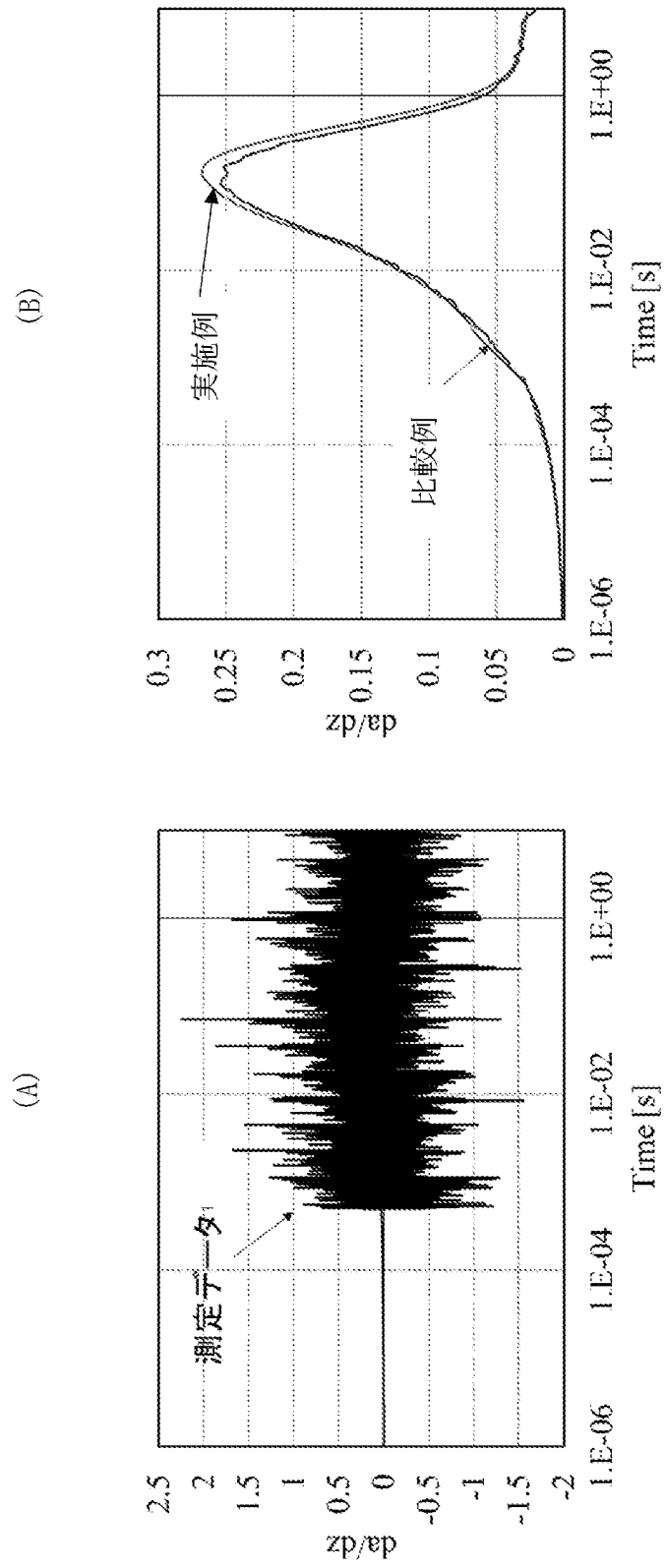
[図2]



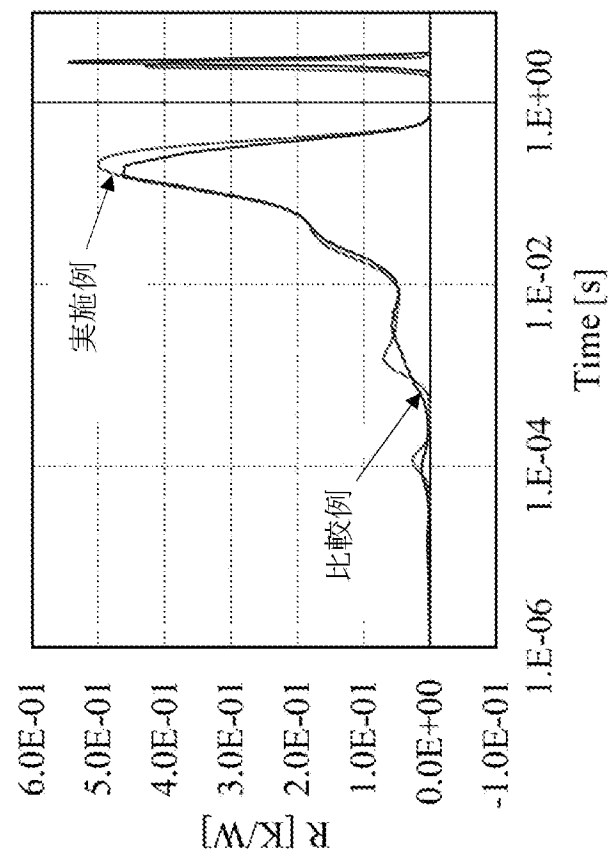
[図3]



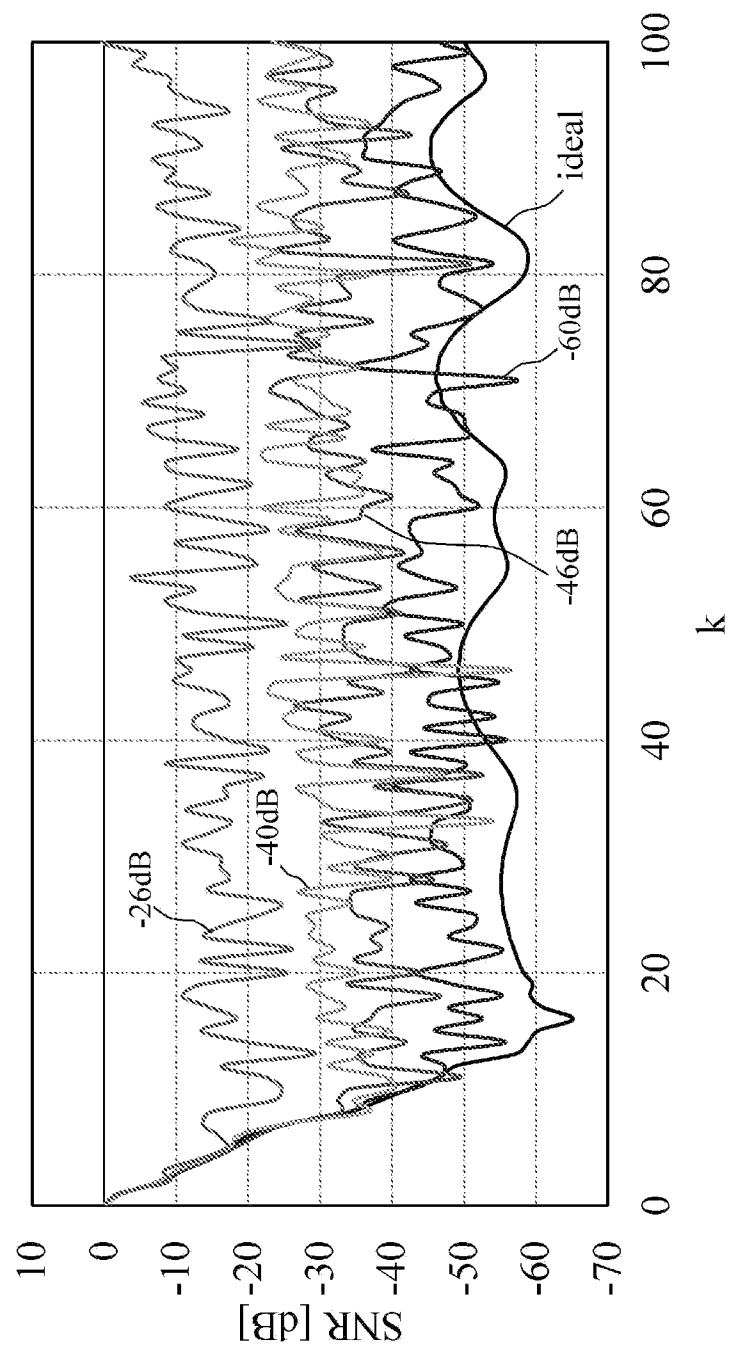
[図4]



[図5]



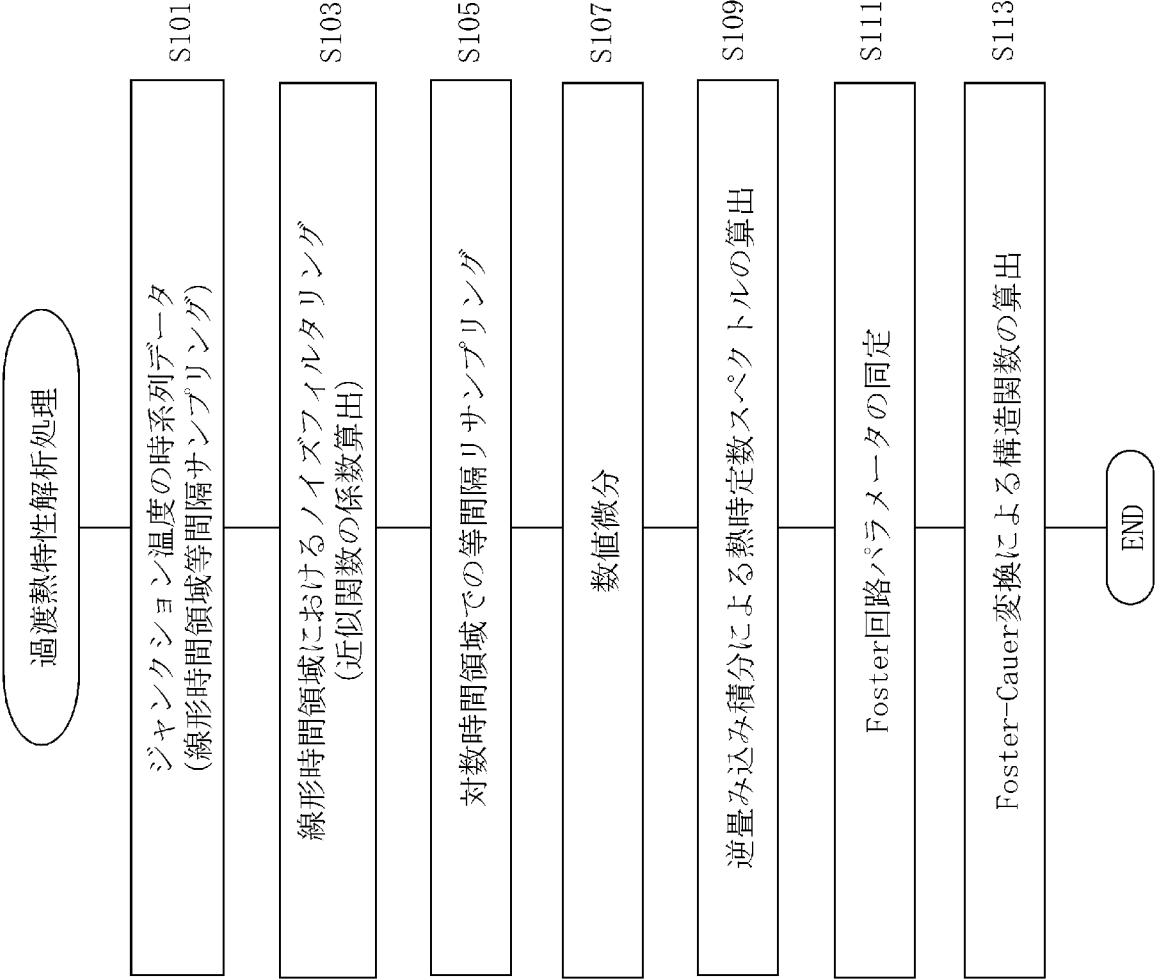
[図6]



[図7]

SNR	実施例	比較例
-60dB	5.02×10^{-5}	2.24×10^{-4}
-46dB	2.40×10^{-4}	5.93×10^{-4}
-40dB	3.39×10^{-4}	1.08×10^{-3}
-26dB	8.02×10^{-3}	1.01×10^{-2}

[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/026665

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G01N25/18(2006.01)i, G01R31/26(2020.01)i
FI: G01N25/18Z, G01R31/26Z

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. G01N25/18, G01R31/26

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2019-015564 A (JAPAN RADIO CO., LTD.) 31.01.2019 (2019-01-31), paragraphs [0014]-[0016]	1-6
A	JP 2003-194755 A (MITSUMI ELECTRIC CO., LTD.) 09.07.2003 (2003-07-09), paragraphs [0017]-[0026]	1-6
A	CN 104569065 A (CHONGQING UNIVERSITY) 29.04.2015 (2015-04-29), paragraphs [0055]-[0071]	1-6
A	US 2014/0079092 A1 (TILHONEN, V. et al.) 20.03.2014 (2014-03-20), paragraphs [0024]-[0043]	1-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07.08.2020

Date of mailing of the international search report
25.08.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2020/026665

JP 2019-015564 A 31.01.2019 (Family: none)

JP 2003-194755 A 09.07.2003 (Family: none)

CN 104569065 A 29.04.2015 (Family: none)

US 2014/0079092 A1 20.03.2014 EP 2711982 A2
CN 103674298 A

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01N 25/18(2006.01)i; G01R 31/26(2020.01)i FI: G01N25/18 Z; G01R31/26 Z														
B. 調査を行った分野														
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） G01N25/18; G01R31/26														
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2020年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2020年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2020年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2020年													
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）														
C. 関連すると認められる文献														
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号												
A	JP 2019-015564 A（新日本無線株式会社）31.01.2019（2019 - 01 - 31） [0014]-[0016]	1-6												
A	JP 2003-194755 A（ミツミ電機株式会社）09.07.2003（2003 - 07 - 09） [0017]-[0026]	1-6												
A	CN 104569065 A（CHONGQING UNIVERSITY）29.04.2015（2015 - 04 - 29） [0055]-[0071]	1-6												
A	US 2014/0079092 A1（TILHONEN Vesa et al.）20.03.2014（2014 - 03 - 20） [0024]-[0043]	1-6												
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの</td> <td>“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの</td> <td>“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの</td> </tr> <tr> <td>“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）</td> <td>“&” 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献	“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	
* 引用文献のカテゴリー	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの													
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの	“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの													
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）	“&” 同一パテントファミリー文献													
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献														
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献														
国際調査を完了した日 07.08.2020	国際調査報告の発送日 25.08.2020													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 福田 裕司 2J 9109 電話番号 03-3581-1101 内線 3252													

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/026665

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
JP	2019-015564	A	31.01.2019	(ファミリーなし)			
JP	2003-194755	A	09.07.2003	(ファミリーなし)			
CN	104569065	A	29.04.2015	(ファミリーなし)			
US	2014/0079092	A1	20.03.2014	EP	2711982	A2	
				CN	103674298	A	