

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560503

研究課題名(和文) 表面弾性波デバイスの小型・薄型化に向けた精度保証付き多目的設計探査の開発

研究課題名(英文) Development of precision ensuring multi-objective design exploration to miniaturize and thin surface acoustic wave devices

研究代表者

田川 聖治 (TAGAWA, Kiyoharu)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50252789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、移動体通信機器の高周波回路に多用されている表面弾性波(SAW)デバイスには、更なる小型化が求められている。また、多目的設計探査(MODE)とは、進化型多目的最適化(EMO)によって得られた非劣解集合から有用な情報を抽出する設計支援手法である。本研究では、新たに精度保証付きMODEを提案し、小型化に付随する様々な不確実性を考慮したSAWデバイスの構造設計に適用した。本研究の成果は以下の通り要約できる。1) SAWデバイスのシミュレータ、2) 多目的最適化問題にも有効なEMOアルゴリズム、3) 予測区間に基づく不確実性の精度保証付き評価手法の開発。4) SAWデバイスの小型化に有用な知見の獲得。

研究成果の概要(英文)：Recently, Surface Acoustic Wave (SAW) devices, which have been widely used in Radio Frequency (RF) circuits of mobile communication equipments, are required to be further miniaturized. On the other hand, Multi-Objective Design Exploration (MODE) is a design support approach that efficiently extracts the useful information from a number of non-dominated solutions obtained through Evolutionary Multi-criterion Optimization (EMO). In this study, a new design support approach called precision ensuring MODE is proposed and applied to the structural design of SAW devices in which various uncertainties incidental to miniaturization are considered. The results of this study are summarized as follows: Developments of 1) Simulators of several SAW devices, 2) A new EMO algorithm applicable to many-objective optimization problems, and 3) A precision ensuring evaluation technique of uncertainty based on prediction interval. 4) Acquirement of knowledge that is useful to miniaturize SAW devices.

研究分野：数理情報工学

キーワード：設計工学 多目的最適化 不確実性 進化計算 弾性波デバイス

1. 研究開始当初の背景

表面弾性波デバイス (SAW デバイス) とは、圧電体の表面近くを伝搬する表面弾性波 (SAW : Surface Acoustic Wave) を信号処理に利用した機能素子であり、SAW フィルタや SAW デュプレクサ (分波器) として携帯電話など移動体通信機器の高周波回路 (RF 回路) に多用されている。また、SAW デバイスの周波数特性 (機能) は、圧電体の基板上に形成された電極の構造に依存する。

近年、携帯電話の小型化、多機能化、多様化に伴い、RF 回路の集積化、ソフトウェア無線化、チューナブル回路化が進められている。そこで、RF 回路内のフィルタの CMOS 回路化も検討されているが、高周波向けの SAW デバイスについては、性能を損なわず CMOS 回路に置き換えることは困難である。このため、SAW デバイスには更なる小型・薄型化が求められており、広帯域化や挿入損失の低減など周波数特性の改善に加え、寸法や形状、実装面積などに関する多様で厳格な要求仕様を満たす高度な設計が必要である。さらに、SAW デバイスの電極構造が微細になると、電気機械結合係数の材質や温度変動によるバラツキ、浮遊容量、電極の加工誤差などの影響が無視できなくなるため、不確実性を考慮したロバスト設計によって製品の品質の向上を図り、不良品の発生を抑える必要もある。しかし、SAW デバイスの開発の現状は、技術者の経験や勘に負うところが大きく、すべての要求仕様を満たす解が存在するか否か不明なままで、試行錯誤による構造設計と性能評価が繰り返されている。

計算機シミュレーションと最適化手法を組み合わせた SAW デバイスの最適設計の事例は、国内外で幾つか報告されている。しかし、従来の SAW デバイスの最適設計は、周波数特性の改善を目的としたもので、小型・薄型化など SAW デバイスの実装まで考慮した最適設計の事例は報告されていない。

多目的設計探査は多目的最適化とデータマイニングを組み合わせた設計手法であり、パレート最適解集合から設計に役立つ知見を抽出することに主眼を置き、航空・宇宙工学の分野で有効性が示されている。このため、多目的設計探査は上記の SAW デバイスの総合的な最適設計でも効果が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、航空・宇宙工学の分野で実績がある多目的設計探査に対して、理論的な研究が進められている精度保証付きロバスト最適化を導入した「精度保証付き多目的設計探査」を開発し、それを SAW デバイスの構造設計に適用することである。これにより、実装面積と周波数特性のトレードオフや加工誤差の影響など、SAW デバイスの小型・薄型化に役立つ知見が収集できる。

既存の不確実性を考慮した多目的設計探査では、ロバスト性と最適性を個別の目的と

するため目的関数の数が倍増し、多目的最適化問題の難易度が高くなる。また、パレート・フロントが広大となり、そこから有益な情報を抽出することも難しくなる。一方、従来のロバスト最適化手法と同様に不確実性の影響をモンテカルロ法で推定すると、過剰なサンプリングによって保守的な設計となることや、計算時間が不必要に増大することが懸念される。その他、多目的設計探査で採用されている NSGA-II 等の進化的多目的最適化手法は、目的関数の数が 4 以上になると、最適性と多様性を兼ね備えたパレート最適解集合を獲得できない。しかし、小型・薄型化まで考慮した SAW デバイスの構造設計は、4 目的以上の最適化問題になると思われる。精度保証付き多目的設計探査の開発では、これらの課題にも取り組む必要がある。

3. 研究の方法

SAW デバイスの構造設計を対象とした精度保証付き多目的設計探査の構成要素は、実際の SAW デバイスの高精度なシミュレータ、不確実性の効率的な評価手法と精度の保証、不確実性を考慮した SAW デバイスの構造設計の多目的最適化問題への定式化、多数目的最適化問題とも呼ばれる 4 目的以上の多目的最適化問題に対しても有効な独自の進化的多目的最適化手法、パレート最適解集合から SAW デバイスの設計に役立つ情報を抽出するためのデータマイニング手法である。

本研究では、SAW デバイスのシミュレータ、不確実性の精度保証付き評価手法、進化的多目的最適化手法は個別に汎用的なものを開発する。次に、SAW デバイスの構造設計における不確実性の要因と確率分布を決定し、SAW デバイスの設計を最適化問題に定式化する。また、具体的な SAW デバイスとして、2 つの平衡型 SAW フィルタから構成された SAW デュプレクサを対象とする。最後に、データマイニング手法は、本研究を通じて得られた知見に基づき、既存のデータ分析手法から適切なものを採用する。

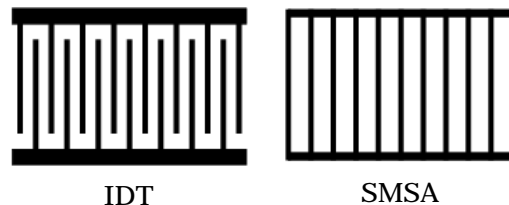


図 1 IDT と SMSA の基本構造

(1) SAW デバイスのシミュレータ

様々な SAW デバイスの電極構造の構成要素は IDT (Inter-Digital Transducer) 電極と SMSA (Short Metal Strip Array) 反射器である。IDT と SMSA の基本的な構造を図 1 に示す。IDT と SMSA には優れた等価回路モデルが存在する。それらを組み合わせること、SAW デュプレクサなど任意の SAW デ

パイスの等価回路モデルが構築できる。さらに、等価回路モデルをネットワーク・モデルに変換すると、分布定数回路理論に基づく SAW デバイスの解析が可能となる。

(2) 不確実性の精度保証付き評価手法

不確実性を考慮した多目的最適化問題では、ノイズを含む複数の目的関数値は同時分布となるが、その周辺分布による超直方体を考えることで、非劣解の精度を保証する。

本研究では、上記の方針に基づき、ノイズを含むテスト関数を用いて、不確実性の精度保証付き評価手法を考案する。次に、SAW デバイスの構造設計で不確実性の要因となる幾つかのパラメータと確率分布を決定し、前述の SAW デバイスのシミュレータを用いて提案した評価手法の有効性を確認する。

(3) 進化型多目的最適化手法

進化型多目的最適化手法では、目的関数空間における優越関係に基づき解の優劣を判定する。しかし、4 目的以上の多目的最適化問題ではパレート・フロントが広大であり解集団の大半が非劣解となる。このため、解の優劣を判定できず探索が停滞する。

本研究では、多数最適化問題を対象として、差分進化 (DE : Differential Evolution) を拡張した、新たな進化型多目的最適化手法を開発する。DE をベースとした進化型多目的最適化手法としては、既に GDE3 や DEMO 等があり、前述の NSGA-II よりも探索性能で勝ることが報告されている。さらに、多目的最適化に関する最新の研究成果を精査して、それらの技法を積極的に採用する。

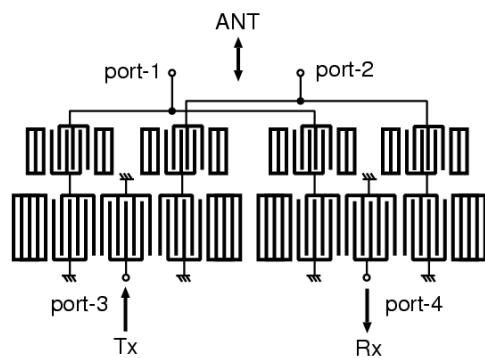


図 2 SAW デュプレクサの電極構造

4. 研究成果

(1) SAW デバイスのシミュレータ

等価回路モデルに基づき、図 2 に示すような SAW デュプレクサのシミュレータを開発した。図 2 の SAW デュプレクサは 2 個の SAW フィルタと 4 個の SAW 共振子から構成され、1 本のアンテナ (ANT) を送信器 (Tx) と受信器 (Rx) が共有するための分波器として機能する。端子 1 と端子 2 は平衡型端子を構成してアンテナに接続され、端子 3 は送信器、端子 4 は受信器に接続される。図 3 にシ

ミュレータにより再現した SAW デュプレクサのアンテナと送受信器間の伝搬特性、図 4 に送信器と受信器間の阻止特性を示す。

図 2 の SAW デュプレクサの構造を記述するために 18 個の設計パラメータを定め、要求仕様を満たす設計パラメータの上下限値を DE で探索した結果を図 5 に示す。図 5 の赤線は設計パラメータの公称値である。

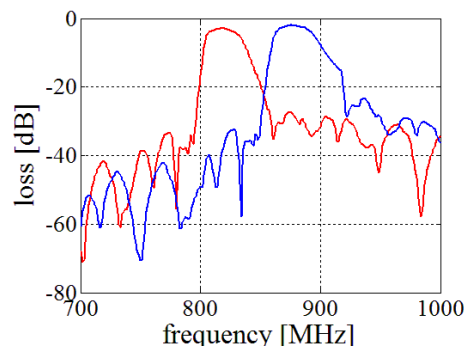


図 3 SAW デュプレクサの伝搬特性

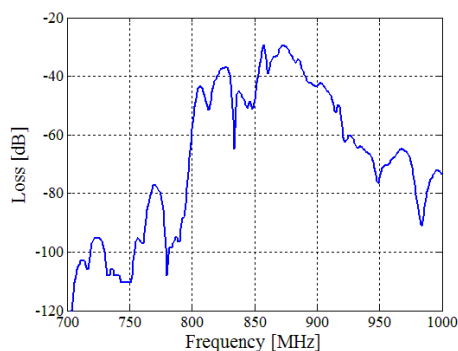


図 4 SAW デュプレクサの阻止特性

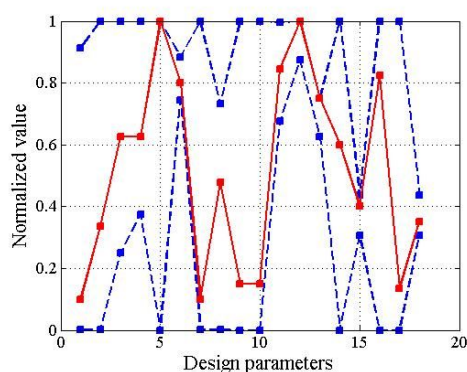


図 5 設計パラメータの有効範囲

(2) 不確実性の精度保証付き評価手法

不確実性を考慮した多目的最適化問題では、ノイズを含む複数の目的関数値が互いに独立で正規分布に従うものと仮定し、目的関数値の予測区間の上限値を下記の通り導出した。ただし、 N はサンプル数、 μ_m は標本平均、 σ_m^2 は不偏標本分散、 α は有意水準、 t は自由度 $N - 1$ の t 分布の値である。

$$f_m^U(\bar{x}) = \mu_m(\bar{x}) + \sigma_m^2(\bar{x}) \cdot t(N-1, \alpha) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{N}}$$

上記の上限値 f_m^U を目的関数として、精度保証付き最適化問題を定式化した。有意水準により、目的関数値が予測区間に存在する確率を任意に設定できる。ここで、上限値はサンプル数 N が多いほど厳密に求められるが、シミュレーションに基づく目的関数値の計算にはコストが掛かる。そこで、最適化の過程で不良な解を判別し、そのサンプリングを中止する 2 種類の枝刈り法と、優良な解のみサンプル数 N を徐々に増やすサンプリング手法を考案して有効性を確認した。

図 6 にノイズを含む目的数 2 から 8 のテスト問題 (DTLZ1) で、2 種類の枝刈り法 (#U と #C) が削除した不良な解の数を示す。目的数が多いほどは #C の効果は大きくなる。

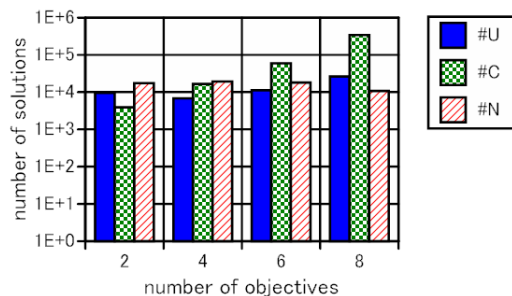


図 6 枝刈り法で削除された解の数

(3) 進化型多目的最適化手法

前述の通り、多目的最適化問題のパレート・フロントは広大であり解集団の大半が非劣解となる。非劣解の良さの妥当な評価基準として EH (Exclusive Hypervolume) があるが、EH は多項式時間では計算できない。そこで、新たに EH の近似値である PEH を提案し、PEH が多項式時間で計算可能なこと、EH と PEH で評価した解集団の順序には有意な相関関係があることを確認した。

本研究で開発した進化型多目的最適化手法は、DE をベースとして、上記の PEH に加え、実行不可能解の 2 段階選択法、DE の制御パラメータの適応的な調整機構、最新の NSGA-III で考案された参照点からの垂直距離に基づく非劣解の評価方法を採用した。

(4) SAW デバイスの多目的設計探査

図 2 に示した SAW デュプレクサの構造設計を 7 目的 7 制約の最適化問題として定式化し、本研究で開発した進化型多目的最適化手法を適用した。次に、得られた 567 個の実行可能な非劣解を幾つかの統計的手法を用いて解析した。目的関数空間における実行可能な非劣解の分布を図 7 に示す。また、設計パラメータの値から推定される SAW デュプレクサの実装面積が最小と最大になる 2 種類の実行可能解の目的関数値を図 8 に示す。

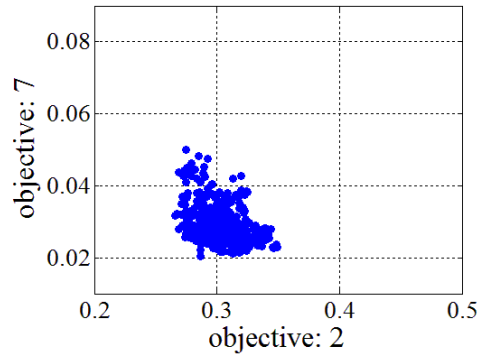


図 7 実行可能な非劣解の分布

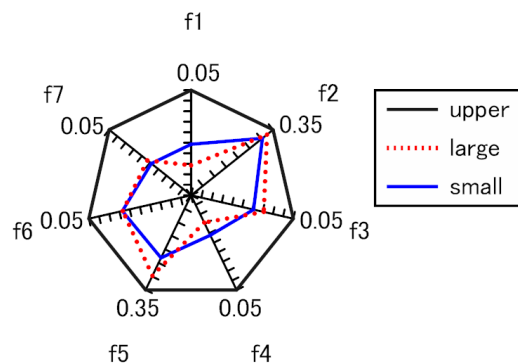


図 8 実装面積と目的関数値

精度保証付き多目的設計探査では、電極幅の加工誤差と SAW 速度の変動を不確実性の要因として、それらが SAW フィルタの周波数特性に及ぼす影響を調べた。ただし、想定した確率分布の妥当性の評価や、より厳密な統計モデルの構築は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 14 件)

K. Tagawa, S. Harada: Multi-noisy-hard-objective robust design of balanced surface acoustic wave filters based on prediction of worst-case performance; Proc. of 18th European Conference on the Applications of Evolutionary Computation, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9028, pp. 616–628, 2015. (査読有)

10.1007/978-3-319-16549-3_50

田川聖治: 差分進化の基礎と並行プログラミング; システム制御情報学会誌, システム/制御/情報, Vol. 59, No. 2, pp. 47 - 52, 2015. (査読無)

K. Tagawa, K. Takeuchi: Dynamic implementation techniques of concurrent differential evolutions for multi-core CPUs; Proc. of the 14th International Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems, pp. 13 - 18, 2015. (査読有)

田川聖治, 武内博和: マルチコア CPU における並行型差分進化の技法; 進化計算学会論文誌, Vol. 5, No. 2, pp. 16 - 31, 2014. (査読有)

K. Tagawa, T. Suenaga: Extended differential evolution algorithm for worst-case value minimization problems; International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 8, pp. 262 - 272, 2014. (査読有)

K. Tagawa, S. Harada: Multi-noisy-objective optimization based on prediction of worst-case performance; Proc. of Theory and Practice of Natural Computing Conference, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8890, pp. 23 - 34, 2014. (査読有)
10.1007/978-3-319-13749-0_3

K. Tagawa, A. Imamura, S. Harada: Multi-hard-objective optimum design of surface acoustic wave duplexers using adaptive differential evolution; Proc. of 15th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, pp. 409 - 414, 2014. (査読有)
10.1109/CINTI.2014.7028709

K. Tagawa (Editors: S. Cagnoni, M. Mirrolli, M. Villani): Concurrent implementation techniques using differential evolution for multi-core CPUs: a comparative study using

statistical tests; Evolution, Complexity and Artificial Life, Springer, pp. 261 - 280, 2014. (査読無)

K. Tagawa: Two-stage optimum design method for surface acoustic wave duplexers using differential evolution algorithms; International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 2, Vol. 7, pp. 103 - 111, 2013. (査読有)

K. Tagawa, K. Nakajima: Island-based differential evolution with panmictic migration for multi-core CPUs; Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 852 - 859, 2013. (査読有)
10.1109/CEC.2013.6557657

K. Tagawa, T. Suenaga: Pessimistic prediction-based evolutionary algorithm for uncertain optimization problems; Proc. of the 4th European Conference of Computer Science, pp. 38 - 43, 2013. (査読有)

K. Tagawa, A. Imamura: Many-hard-objective optimization using differential evolution based on two-stage constraint-handling; Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), pp. 671 - 678, 2013. (査読有)

K. Tagawa: Exploration of SAW duplexer design space by modified differential evolution; Proc. of 14th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, pp. 78 - 84, 2012. (査読有)

K. Tagawa: Concurrent differential evolution based on generational model for multi-core CPUs; Proc. of 9th

International Conference on Simulated Evolution and Learning, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8890, pp. 12 - 21, 2012. (査読有)

[学会発表](計 16 件)

原田翔一, 田川聖治: 最悪ケースの多数目的最適化問題に対する差分進化の適用; 第 102 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2015 年 3 月 4 日, 島原文化会館 (長崎県島原市)

武内博和, 田川聖治: 黄金分割探索を組み込んだ適応型差分進化; 第 102 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2015 年 3 月 4 日, 島原文化会館

今村晃啓, 原田翔一, 田川聖治: 適応型差分進化による SAW デュプレクサの多目的最適設計; 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2014 年 10 月 25 日, 福山大学 (広島県福山市)

武内博和, 田川聖治: 黄金分割探索を組み込んだ並行型差分進化; 第 7 回進化計算学会研究会, 2014 年 8 月 29 日, 近畿大学 (大阪府東大阪市)

原田翔一, 田川聖治: 最悪ケースの予測に基づく多目的差分進化; 第 7 回進化計算学会研究会, 2014 年 8 月 28 日, 近畿大学 (大阪府東大阪市)

田川聖治: 要求仕様を満たす SAW デュプレクサの電極構造設計; 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2014 年 8 月 21 日, 山形大学 (山形県米沢市)

今村晃啓, 田川聖治: SAW デュプレクサの多数目的最適化に対する差分進化の適用; 第 97 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2014 年 3 月 3 日, タウンプラザしまね (島根県松江市)

末永大樹, 田川聖治: 不確実性を含む最適化問題に対する差分進化の適用; 第 97 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2014 年 3 月 3 日, タウンプラザしまね

中島健一, 田川聖治: 島モデルに基づく適応型差分進化の性能評価; 第 97 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2014 年 3 月 3 日, タウンプラザしまね

今村晃啓, 田川聖治: 多数目的最適化問題に対する差分進化の適用; 情報処理学会関西支部大会, 2013 年 9 月 25 日, 大阪大学中之島センター (大阪府大阪市)

中島健一, 田川聖治: 島モデルに基づく差分進化の性能評価; 情報処理学会関西支部大会, 2013 年 9 月 25 日, 大阪大学中之島センター (大阪府大阪市)

末永大樹, 田川聖治: ロバスト最適化問題に対する差分進化の適用; 情報処理学会関西支部大会, 2013 年 9 月 25 日, 大阪大学中之島センター (大阪府大阪市)

田川聖治, 中島健一: 島モデルに基づく差分進化のマルチコア CPU による実装; 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2013 年 9 月 6 日, 北見工業大学 (北海道北見市)

田川聖治: A new differential evolution using pairwise exclusive hypervolume for many-objective optimization; 第 92 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2013 年 2 月 28 日, 武雄市文化会館 (佐賀県武雄市)

田川聖治: 離散世代モデルに基づく差分進化のマルチコア CPU における並列化; 電気学会電子・情報システム部門システム研究会, 2012 年 12 月 2 日, 近畿大学会館 (大阪府大阪市)

田川聖治: Exclusive Hypervolume の近似手法; 第 88 回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 2012 年 5 月 17 日, 名古屋大学 (愛知県名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 聖治 (TAGAWA, Kiyoharu)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 50252789