

# シミュレーテッドアニーリングによる ラダー型SAWフィルタの最適設計\*

Keiko Ando\*1, Mitsunori Miki\*2

## Optimum Design of Ladder Type SAW Filter Using A Simulated Annealing

Chikashi Ichikawa\*1 and Tomoyuki Hiroyasu\*2

\*1 Graduate School of Knowledge Engineering, Doshisha University

\*2 Department of Knowledge Engineering, Doshisha University  
1-3 tataramiyakodani kyoutanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Recently, mobile communication systems have developed. Surface Acoustic Wave(SAW) filter is a key device for mobile communication systems, and the demand for high performance and low-loss has increased. The most design procedures for practical SAW filters is a trial-and-error approach. The research on the design of the SAW filter that uses the optimization algorithm which is the local search method and Genetic Algorithm is done. In these researches, the SAW filter used IDT type. However, low-loss type for front-end with ladder type filters become the mainstream, and the research of the ladder type SAW filter design using the optimization algorithm has not done. So, in this paper, This paper describes the application of a ladder type SAW filter with simulated annealing.

**Key Words** : SAW filter, Ladder type, optimization algorithm, simulated annealing

### はじめに

近年, 携帯電話を始めとする移動体通信の普及とともに, ギガヘルツ (Giga Hertz : GHz) 帯で機能するフィルタへの需要が高まっている。なかでも, 誘電体や圧電体を用いたフィルタ開発が盛んに行われており, 表面弾性波 (Surface Acoustic Wave : SAW) を用いたフィルタは誘電体を用いたフィルタに比べて小型で形成できるため, SAW フィルタは高周波通信のキーデバイスの一つとなっている。これに伴い, 使用される高周波電子部品の高性能化および低損失化への需要が高まり, 性能向上のための様々な研究が行われている。

SAW フィルタとは, 圧電体基盤の表面を伝播する弾性波を介して, ある特定の周波数の信号のみを通過させるものであり, バンドパスフィルタの役割を担っている。携帯電話のアンテナ部分には, SAW フィルタをパッケージ化した SAW 共用器を用いる。これは, 送信側・受信側で共用し送受の信号を分離する。

このように SAW フィルタは, 現在の携帯電話に必要な不可欠なデバイスであり, 多くの企業で研究が進められている。また SAW フィルタの要求特性は, シス

テムや回路構成によって異なるため, ユーザのニーズに合わせて要求仕様に合う周波数特性を有するフィルタをその都度, 短期間で開発し提供しなければならず, またその要求も非常に厳しい。

現在 SAW フィルタの開発は, 主に専門家の経験を基に行われる。そのため過去の事例がなく一から開発する場合は, 開発に時間がかかるという問題がある。また, 開発したものが最適であるという保証が得られないため, 開発を終了する時期を決定することが難しい。このようなことから, 計算機シミュレーションによる SAW フィルタの設計が必要となる。

最適化手法による SAW フィルタの設計は局所探索法や遺伝的局所探索法などの研究が行われている。これらの手法は楕形電極 (IDT) と 2 つの SMSA (Shorted Metal Strip Array) 反射器を左右対称に並べた IIDT 型 (Interdigitated Interdigital Transducer) フィルタを対象としていた。しかし, 現在はさらなる低損失化が望まれており, 新たに提案されたラダー型のフィルタが主流となっているが, 最適化手法を用いるラダー型の SAW フィルタ設計に関する研究はなされていない。

そこで本論文では, ラダー型の SAW フィルタ設計を最適化問題として定式化を行い, 最適化手法を適用することで SAW フィルタの設計に用いることを提案する。これにより, 製品の性能向上および開発期間の

\* 原稿受付 2000 年 00 月 00 日

\*1 同志社大学大学院

\*2 同志社大学工学部

京田辺市多田羅都谷 1-3

Email: ando@mikilab.doshisha.ac.jp

短縮が図れると考えられる。

先に提案されている IIDT 型フィルタの最適化手法では対象問題としては IDT が 3 つの小規模の SAW フィルタを用いていたため、遺伝的アルゴリズム (GA) の適用が行われていたが、今回対象とする SAW フィルタは多くの SAW 共振器を有するため、SAW フィルタの設計に適用する手法として、計算コストが GA より低く、かつ局所探索に優れ複雑な対象問題も扱うことができるヒューリスティック手法の一つであるシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing:SA) を用いる。

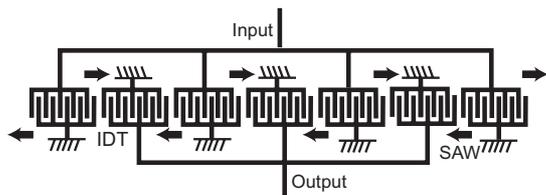


Fig. 1 IDT Type SAW Filter

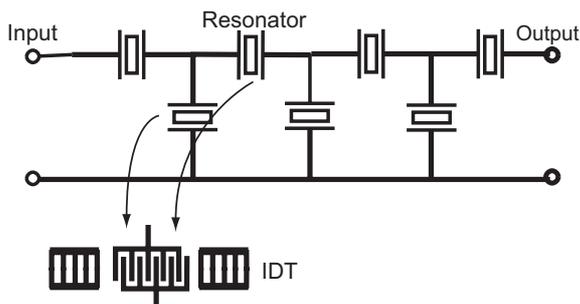


Fig. 2 Ladder Type SAW Filter

### 1. 弾性表面波フィルタ

**1.1 SAW フィルタの構成** SAW フィルタは圧電基板の上に櫛型の電極指貼り付けて形成されている。SAW フィルタの構造を Fig.3 に示す。圧電基盤には水晶などの誘電体を用いることが多いが、タンタル酸リチウム ( $LiTaO_3$ ) とニオブ酸リチウム ( $LiNbO_3$ ) を圧電体基盤として用いる。

入力側の電極指から信号を入力するとアースにつながれた電極との間に電位差が生じ、それにともなう圧電材料のひずみによって SAW が発生する。この現象を逆圧電効果という。

櫛型電極の間隔と通過させたい波長を合わせると、圧電体の表面波と異なっている波は打ち消され、通過させたい周波数の波のみが残りフィルタを通過する。この原理を利用して、SAW フィルタでは特定の周波数帯域の信号のみを通し、バンドパスフィルタの役割

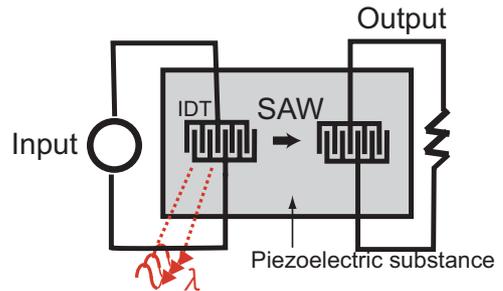


Fig. 3 Principle of SAW

を果たすことができる。櫛型電極の間隔を変えることで任意の波長の波をフィルタリングすることができる。

**1.2 SAW フィルタの設計問題** SAW フィルタは通過させる周波数を示した目標周波数特性が与えられるため、その目標周波数特性と設計されたフィルタの周波数特性との誤差を最小とすることで、フィルタの最適化を行うことができる。

SAW フィルタは対応する等価回路からそれぞれの伝送行列を求め、周波数特性を得ることができる。Fig.3 の SAW フィルタ全体に対する等価回路を Fig.4 示す。SAW フィルタの最適化は、実際にはこの等価回路の最適化を行うことになる。携帯電話と同じように電気信号を入力する外部端子として送信端子、アンテナ端子、受信端子がある。

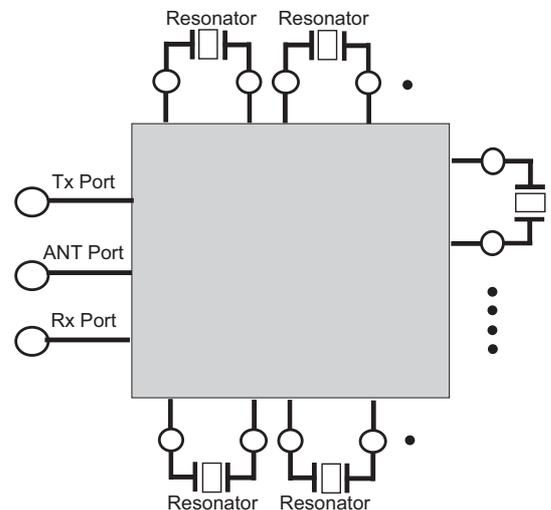


Fig. 4 Equivalent Circuit

また、回路の周りに付随するものは共振子と呼ばれるもので、共振回路と同じ働きをする。共振子は Fig.5 のような等価回路に表せる。Fig.3 に示した SAW フィルタは Fig.5 に示す共振子等価回路の素子を最適化することになる。共振子等価回路はインダクタンス (L)1 つ、抵抗 (R)1 つ、コンダクタンス (G)1 つおよびキャ

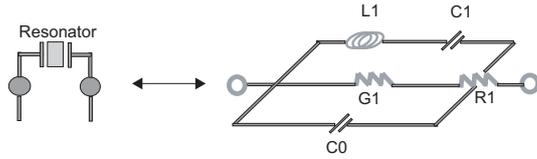


Fig. 5 Resonance Equivalent Circuit

パシタンス(C) 1つの5素子から構成されている．最適化するパラメータ(設計変数)の数は共振子数×5素子となる．

これらの素子は下記の式(1)から式(4)の式で表すことができる．そのため、実際に最適化する設計変数は静電容量(C0)、電子結合係数(K2)および共振周波数( $f_s$ )となる．

$$C_1 = k2 \times C0 \times \frac{8}{\pi^2} \quad (1)$$

$$G_1 = \frac{2\pi \times f_s \times \sqrt{1 + \frac{8 \times k2}{\pi^2} \times C0 \times (\frac{\pi^2}{8 \times K2} + 1)}}{Qa} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{1}{32 \times f_s^2 \times K2 \times C0} \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{\pi}{16 \times K2 \times C0 \times f_s \times Qs} \quad (4)$$

さらに、圧電体の材料により2素子( $Q_s$ および $Q_a$ )は固定でき、今回対象とする問題は電気結合係数(K2)を固定するため、設計変数の数は共振子数×2素子となる．また、制約条件は圧電体の材料によって異なる．

## 2. 評価関数

前章で示した設計変数を最適化するためには、評価関数が必要となる．SAWフィルタの周波数特性の評価値を計算するためには、条件となる以下のようなデータが必要となる．これらの条件は圧電体の材料により変わり、材料が $LiTaO_3$ 、 $LiNbO_3$ の場合Table??、??となる．

1. 送信信号の挿入損失の利得
2. 送信信号の減衰の利得
3. 受信信号の挿入損失の利得
4. 受信信号の減衰の利得
5. 受信信号(高周波帯)の減衰の利得
6. 送信信号の各外部端子の絶縁の利得
7. 受信信号の各外部端子の絶縁の利得
8. 送信端子に対しての跳ね返り量の利得
9. アンテナ送信端子間に対しての跳ね返り量の利得
10. アンテナ受信端子間に対しての跳ね返り量の利得
11. 受信端子に対しての跳ね返り量の利得

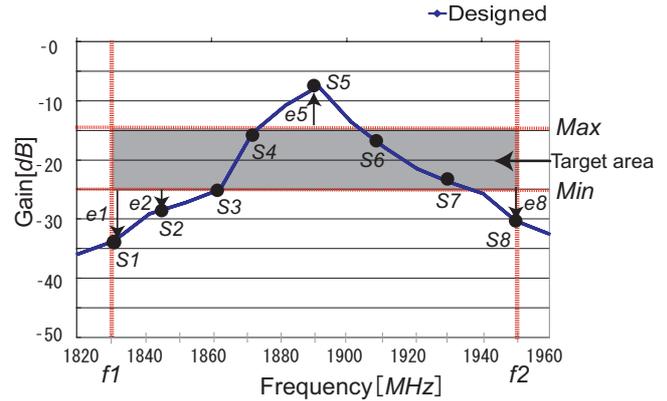


Fig. 6 The example of the target area and the profit characteristic of designed SAW

これらの条件をにおける評価値を求める．評価関数の式を式(5)に示す．Fig.6ようにある周波数 $f_1$ から $f_2$ の範囲において、サンプリングポイントごとに、要求されている最大周波数(Max)と最小周波数(Min)の範囲以内に入っているか判別する．MaxとMinは設計者の要求により変化し、この範囲以内に周波数特性が設計されるようにする．MaxとMinの範囲以内に入っていない計算値( $S_j$ )とMaxあるいはMinとの差である $e_j$ の2乗の総和を総サンプリングポイント数 $N$ で割った値をgoalとする．

$$goal = \frac{\sum_{j=1}^N e_j^2}{N} \quad (5)$$

$$if(S_j > Min) \& (S_j > Max), e_j = 0$$

最終的な誤差関数は式(6)のように、上記に示した11項目についてのgoalに重み付け( $w$ )を掛けた和と定義する．

$$ErrorFunction = \sum_{i=1}^{11} (w_i \times goal_i) \quad (6)$$

## 3. SAWフィルタ設計問題の特徴

3.1 SAWフィルタのランドスケープ 連続最適化問題では、目的関数のランドスケープを考察することにより、局所解の有無、設計変数間の依存関係の有無を把握でき、最適化手法を選択する上で重要な指標となる．多峰性関数のように複雑な景観を持つ関数であれば、ヒューリスティック手法(GAやSA)の適用が望まれ、単峰性関数であれば探索効率のよい数値計画法の適用が望まれる．そのため、可視化を行うことが重要となる．

SAWフィルタ設計問題にもちいる最適化手法を選択するために、SAWフィルタのランドスケープの可

視化を行う。SAW フィルタの代表的なランドスケープを図 7 および 10 に示す。これらの図の X, Y 軸は任意に選んだ 2 つの設計変数を、Z 軸は誤差値を表す。

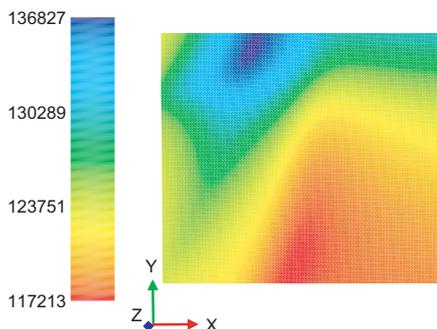


Fig. 7 landscape

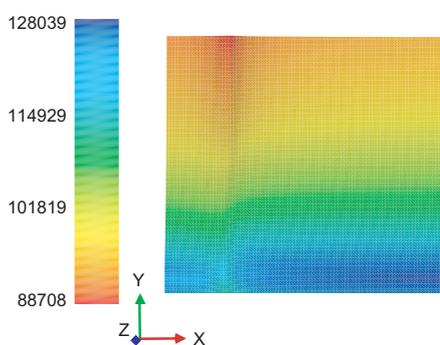


Fig. 8 landscape

**3.2 ランドスケープにおける考察** 2次元ごとに可視化した図を考察すると、多峰性ではないが局所解がいくつか存在し、設計変数間に依存関係が見られる。このことより、全設計変数(共振子数×2素子)の形状は、単純な単峰性関数ではないと考えることができる。そのため、ヒューリスティック手法を適用が必要であると考えられるが、多峰性の関数ではないためヒューリスティック手法の中でも局所探索性能に優れたSAの適用が有効であると考えられる。また比較手法として、数理計画法を単純化した手法である確率的山登り法を用い性能比較を行う。

#### 4. 最適化手法

**4.1 確率的山登り法** 確率的山登り法(Stochastic Hill-Climbing: SHC)<sup>(1)</sup>は解近傍の周辺でランダムサーチを繰り返し、解が良好な方向に遷移した場合のみを受理するアルゴリズムである。現在の解から各次元ごとに一定の近傍の範囲内にランダムに値を変化させ、解が現状態より良好である場合は、変化させた値を解とする。この手法の探索終了条件は解の変更が少なくなった場合である。

**4.2 シミュレーテッドアニーリング** SA(Simulated Annealing)はMetropolisらが1953年に発表した焼きなましと呼ばれる加熱炉内の固体の冷却過程をシミュレートするアルゴリズムに端を発し、最適化問題に有効なアルゴリズムである。SAでは、最小化すべき目的関数はエネルギーと呼ばれ、任意の非線形性を持った目的関数をほとんど処理できるという大きな利点がある<sup>(2)(3)(4)</sup>。局所探索法の暫定解の更新法として、目的関数を改善だけでなく改悪となるものも一定の制限のもので許すことで、局所解からの脱出を可能にする。

SAは4つの重要なプロセスから構成される。

**生成処理** 生成処理では、現在の状態  $x$  の近傍にランダムに推移すべき  $x'$  を生成する。

**受理判定** 受理判定は、次状態  $x'$  のエネルギー  $E'$  と現状態  $x$  のエネルギー  $E$  との差分  $\Delta E (= E' - E)$ 、および温度パラメータ  $T$  を用いて、その摂動が受理される確率を計算し、その確率に従って受理判定を行う。この確率を計算するために、式(7)で示すMetropolis基準を用いる。

$$P_{Accept} = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta E < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

**クーリング** クーリングでは、SAの第  $k$  番目の温度  $T_k$  を与えて、次の温度  $T_{k+1}$  を決定する。最適解への漸近収束性を保証するためには、式(8)で表す対数型クーリング以上に急速に冷やしてはならない<sup>(2)</sup>。

$$T_{k+1} = T_k / \log k \quad (8)$$

しかしながら、対数型クーリングでは解の収束があまりにも遅いため、運用上は真の最適解への収束性を犠牲にして式(9)に示す指数型クーリング<sup>(2)</sup>は最も代表的なクーリング方法として良く用いられる<sup>(2)</sup>。

$$T_{k+1} = \gamma T_k \quad (0.8 \leq \gamma < 1.0) \quad (9)$$

**終了条件** SAの終了条件としては、以下に示すいくつかの方法がある。

- 定めたステップ数分の繰り返しが終了した時点

- 受理がほとんど起こらなくなった時点
- 同じ状態が何度も生成されるようになった時点
- 温度が十分に低くなった時点
- エネルギーの変化またはエネルギーそのものが十分に小さくなった時点

このように SA は与えられた初期状態から出発し、エネルギーが確率的に小さくなるよう状態を変化させ、最終的に最良な状態になることが期待されるアルゴリズムである。

### 5. SAW フィルタ設計最適化問題への SA の適用

本章では SAW フィルタ設計問題に SA を適用した結果を示す。比較手法として数理計画法である SHC を用いる。用いたパラメータを Table1 に示す。

最高温度は最大の改悪を 50 % の確率で受理する温度に設定し、最低温度は最小の改悪をクーリング周期内で 1 回受理する温度とした。

Table 1 パラメータ

総計算回数	102400
近傍幅	設計空間 × 1/5
近傍生成方法	一様分布
最高温度	1.04E+5
最低温度	2.89E-7

#### 5.1 性能比較 SAW フィルタ設計問題に

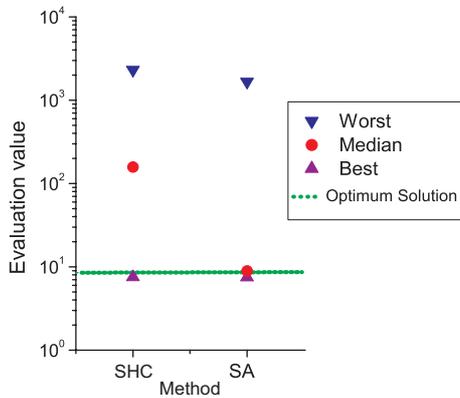


Fig. 9 landscape

お わ り に

文 献

- (1) Ackley, D. H. : "A Connectionist machine for Genetic Hillclimbing", Kluwer Academic Publishers, 1987.
- (2) 著者 , 著者 , 書籍題名 , 出版社 , ( 発行年 ), pp. -

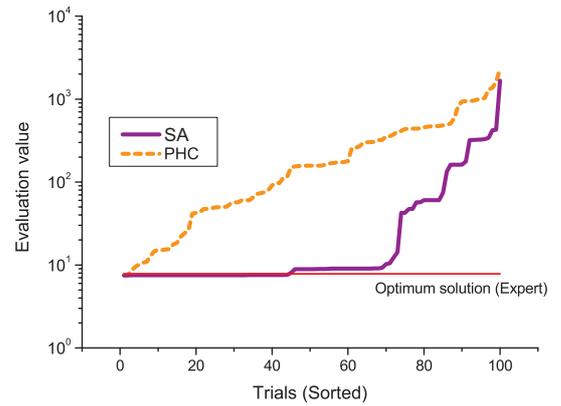


Fig. 10 landscape

- (3) 著者 , 著者 , 論文題名 , “ 雑誌名 ”, 巻 , 号 , ( 発行年 ), pp. -

執筆要綱改定により、文献は英語表記となっております。詳細はホームページで確認してください。