

이중구조 SAW 필터의 최적 설계법

이영진*, 이승화*, 노용래**

경북대학교 센서공학과

경북대학교 전자/전기공학부, 센서공학과

An Optimization method for the Dual type SAW ladder filter

Youngjin Lee*, Seunghee Lee*, Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

**Department of Sensor Engineering/School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

*yjlee@aslab.kyungpook.ac.kr, *leesh@aslab.kyungpook.ac.kr, **yryong@eeg.kyungpook.ac.kr

요 약

일반적인 SAW 필터에서 발생하는 선형성의 한계 및 천이대역의 특성을 개선하기 위한 새로운 구조의 이중구조 사다리형 SAW 필터의 최적 설계 방법을 제시하고 그 가능성을 확인하였다. 이중구조 SAW 필터는 일반적인 사다리형 필터의 구조를 바탕으로 하되, 두 개의 서로 다른 필터가 각각 주어진 대역사양을 반반씩 만족시켜 전체의 필터특성이 구현될 수 있도록 하였다. 특히 고주파 대역에서 만족시키기 어려운 정재파비 및 뛰어난 천이대역 특성을 만족시킬 수 있는 장점을 가지며, 이를 위해 withdrawal 가중기법 및 기판상에 onchip화된 마이크로 스트리플라인 인덕터를 이용하였다. 우선 이중 구조 필터구조를 결정한 후, microstrip 라인 인덕터의 위치 및 인덕턴스 변화에 따른 필터특성 변화를 살펴보고, 필터의 각종 형상변수의 변화에 따른 필터 특성변화를 조사하였다. 이상의 결과를 바탕으로 새로운 방법의 이중구조 SAW 필터의 설계방법을 제시하였으며 그 타당성을 검증하기 위해 1.8 GHz 대역의 RF 필터에 대한 설계 결과를 나타내었다.

1. 서 론

전형적인 사다리형 SAW 필터의 경우, 균일한 전극길이와 폭을 가지는 1단자 공진기가 대부분 사용되고 있으나 천이 대역의 주파수 특성이 크게 뛰어나지 못하고 각 공진기 자체의 특성조절이 제한되는 문제점을 가지고 있다. 하지만 가중기법을 공진기 내의 IDT에 적용할 경우, 가중기법의 효과 및 사다리형 필터가 가지는 효과를 모두 취할 수 있어 다양한 특성을 가지는 필터의 구현이 쉬운 장점을 가질 수 있다. 그 중 withdrawal 가중기법은 일정한 IDT 전극에서 선택적으로 몇 개의 IDT를 제거함으로써 이루어지며, 그 구조상 모든 IDT의 길이가 같으므로 SAW의 전파시 발생하는 왜곡현상을 최소화할 수 있어 다른 가중기법에 비해 뛰어난 위상 특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 withdrawal 가중기법을 사다리형 필터에 적용한다면, 우선 가중기법을 통한 필터 특성의 조절 효과를 증가시킬 수 있으며 왜곡의 최소화, 즉 뛰어난 선형성의 확보 및 천이대역의 특성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 필터의 천이대역의 특성을 추가적으로 향상시키기

위해 SAW 필터 내부에 있는 각각의 공진기 사이에 마이크로 스트리플라인을 이용한 인덕터를 배치할 수 있다. SAW 필터 내부에 인덕터를 배치할 경우 IDT가 가지는 전기적인 용량성분과의 결합을 통하여 필터의 특성을 보다 향상시킬 수 있으며, 또한 전기적인 정합효과까지 거둘 수 있어 별도의 추가적인 외부 정합이 필요치 않게 된다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 IF 대역 필터 설계에 많이 이용되는 withdrawal 가중기법을 적용한 사다리형 필터 설계법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 적용한 필터구조는 임의적으로 6개의 1단자 공진기를 조합한 사다리형이 두 개인 이중 구조를 가지며 각각 주어진 대역사양을 반반씩 만족시켜 전체의 필터특성을 구현하도록 하였다. 따라서 통과주파수 대역이 인접한 두 개의 필터를 동시에 사용하려면 상호간섭을 최소화해야 하며 이를 만족시키기 위해선 뛰어난 천이대역 특성, 즉 형상도가 매우 뛰어나야만 하는 조건이 필수적이다. 각 공진기의 형상변수 조절과 withdrawal 적용에 따른 전체 필터 특성의 변화를 살펴보고, 또한 각 공진기 사이에 인덕터를 배치할 경우의 영향을 조사함으로써 새로운 형태의 마이크로 스트리플라인이 포함된 이중구조 필터 설계 방법을 제시하고자 한다. 차후 이러한 설계방법은 이중형 필터 설계에만 적용될 수 있는 것이 아니라 최근 각광받고 있는 duplexer의 설계에도 응용될 수 있을 것이다.

II. 이중구조 필터의 구조

2.1. 필터 구조

본 연구에 적용한 사다리형 구조는 그림 (1)에 나타난 것과 같이 6개의 1단자 공진기의 조합으로 구성되어 있으며 T-망 회로의 직렬형태를 취하고 있다. S₁에서 S₄까지는 직렬공진기, P₁과 P₂는 병렬공진기를 각각 나타내고 있다. 1단자 공진기는 그림 (2)에 나타난 것과 같이 IDT와 양쪽에 위치한 반사기 (grating)로 구성되며, 일반적인 경우 내부 IDT는 균일한 전극길이와 간격을 가진다. 그러나 그림 (2)에서와 같이 전형적인 withdrawal 가중기법인 IDT의 제거와 위상반전을 통하여 공진기의 주파수 특성을 변화시킬 수 있다. 사다리형 필터는 두 개의 공진기의 조합으로 구성되며 기본적으로 직렬공진기의 공진주파수와 병렬공진기의 반공진주파수를 같게 하

여 전체적으로 개별 공진자보다 넓은 통과 주파수 대역과 큰 저지대역 특성을 구현한다. 병렬공진기가 필터대역의 왼쪽특성을 결정하고 직렬공진기는 오른쪽 특성을 결정하며 따라서 두 개의 공진기의 공진주파수 조절의 의해 필터의 중심주파수 및 대역폭을 결정한다.

내부 인덕턴스 삽입으로 인한 필터 전반의 영향을 고려하기 위하여 그림 (1)에 나타난 것과 같이 인덕터가 위치 가능한 곳을 표시하였다. 각각의 인덕터 L_{S1} 에서 L_{S6} 는 직렬로 삽입된 인덕터, L_{P1} 에서 L_{P3} 는 병렬로 삽입된 인덕터를 나타내며, 효과적인 인덕터 삽입위치와 인덕턴스 값을 구하기 위해 각각의 경우를 고려하여 최적의 내부 인덕터 삽입 위치를 구하고자 하였다.

2.2. Smith 등가회로 해석법 및 집중소자 해석법

본 연구에서는 SAW 필터 해석을 위해 Smith 등가회로 해석법 및 집중소자 해석법을 이용하였다. Smith 등가회로 해석법은 각각의 IDT부와 공극부, 반사기에 대해 6×6 의 전송행렬을 구하고 이를 연속적으로 계산하여 전체 필터를 해석하는 방법으로 구체적인 방법은 참고문헌 [1]에 소개되어 있다. Smith 회로해석법은 현재까지 알려진 해석법 중 가장 정확한 해석법이지만 연산시간이 오래 걸리는 단점이 있으며 이에 비해 집중회로 해석법은 중심주파수 대역에 대해서만 정확한 해석이 이루어지는 단점이 있으나 빠르고 간단하게 필터 특성을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 두가지 해석법을 모두 사용하였으며 내부인덕터 해석에는 집중회로 해석법을, 필터의 형상변수에 의한 영향 해석에는 Smith 등가회로 해석법을 이용하였다. 이는 Smith 해석법의 경우 지나치게 많은 변수를 고려함으로써 순수한 인덕터만의 영향을 고려하기에는 불필요한 연산시간이 많이 소요되기 때문이다.

III. 설계변수에 의한 성능변화 경향성 분석

3.1. 내부 인덕터의 위치에 따른 경향성 분석

필터의 성능을 나타내는 지수, 즉 성능변수는 중심주파수(center frequency: f_0), 대역폭(bandwidth: BW), 삽입손실(insertion loss: IL), 리플(ripple: RP), 저지대역 감쇠도(sidelobe rejection level: SL), 정재파비(voltage standing wave ratio: VSWR)와 형상도(shape factor: SF)가 있으며, 내부 인덕터의 위치와 그 값의 변화가 위에서 제시한 필터 성능에 미치는 영향을 고려하여 최적의 내부 인덕터 위치와 값을 구하고자 하였다. 이를 위해 그림 (1)과 같이 대칭형태의 사다리 구조를 가지며 중심주파수 1.8 GHz 대, 대역폭 44 MHz인 필터를 구성한 후, 해석시 입출력단에 50Ω의 저항을 두어 전기적인 정합효과를 고려하였다. 각 인덕터에 의한 독립적인 영향 조사는 하나의 인덕터와 대칭부분에 내부 인덕터를 추가하는 방법을 이용하였으며, 따라서 추가 가능한 경우는 L_{S1} - L_{S6} , L_{S2} - L_{S5} , L_{P1} - L_{P4} , L_{P3} 의 네 경우로 구분할 수 있다. 경향 분석결과, 직렬로 삽입되는 인덕터는 주로 통과대역의 왼쪽 부분에 큰 영향을 미치고, 왼쪽보다는 오른쪽 저지대역의 특성에, 병렬로 삽입되는 인덕터

는 통과대역의 오른쪽부분과 오른쪽 천이대역에 주로 영향을 미쳤다. 세부적인 결과를 그림 (3)에 나타내었다. L_{S1} - L_{S6} 의 추가는 정재파비, 리플, 저지대역 감쇠도, 삽입손실과 형상도에 나쁜 영향을 미치며 대역폭과 중심주파수의 감소를 일으키는 전반적인 역효과를 발생시킨다. L_{S2} - L_{S5} 의 경우에는 대역폭은 증가, 중심주파수의 감소를 유발하며, 정재파비, 리플, 삽입손실에 나쁜 영향을 미치지만 형상도에는 좋은 영향을 미친다. 이처럼 직렬로 삽입되는 인덕터의 값이 증가함에 따라 전반적으로 필터 성능에 악영향을 미침을 알 수 있다. 병렬로 추가된 L_{P1} - L_{P4} 의 경우에는 인덕터의 값이 감소함에 따라 정재파비, 대역폭 및 중심주파수는 증가하며 삽입손실, 리플, 저지대역 감쇠도와 형상도는 감소한다. L_{P3} 의 추가는 앞의 결과와 비슷하나 중심주파수가 감소하는 경향을 보인다. 따라서 병렬로 추가되는 인덕터의 영향이 직렬추가에 비해 바람직함을 알 수 있으며 L_{P1} - L_{P4} 의 위치에 내부 인덕터를 추가하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있다.

3.2. 필터 형상변수 변화에 의한 경향분석 및 최적화 설계변수 결정

본 연구에서 설정한 6개의 1단자 공진기로 구성된 사다리형 필터의 경우, 주어진 성능변수를 만족시키기 위하여 조절할 수 있는 설계변수를 정리하면 표 1과 같이 총 56 개로 나타낼 수 있다. 그러나 56 개의 모든 변수를 변화시켜 주어진 사양을 만족시킨다는 것은 현실적으로 불가능에 가까우므로 상관관계에 있는 변수 및 설계에 비중이 적은 변수를 줄이는 방법을 이용하였다. 앞 단계에서와 같이 기준 필터를 구성한 후, 각각의 설계변수를 독립적으로 변화시켰으며 그 일례로 설계변수 중 첫 번째 직렬 공진기의 IDT 수를 변화함에 따른 경향을 살펴보면 그림 (4)와 같다. IDT 수가 많아짐에 따라 통과대역폭이 증가하며 삽입손실, 정재파비, 형상도는 향상되지만 저지대역 특성은 저하되며 리플은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이와 같이 각각의 변수의 특성을 조사하여 설계변수의 조절 한계값을 설정할 수 있으며 성능에 큰 영향을 미치지 않는 변수는 고정시켜 설계변수를 다시 줄였다. 예를 들어 본 연구에서 추구하는 형상도를 개선하는데 우선순위를 둔다면, 모든 직렬공진기의 반사기의 주기(P_{S1})는 IDT 주기에 비해 1/1.03 배인 경우가 가장 유리함을 알 수 있었으며, 병렬공진기의 경우(P_{P1})에는 삽입손실과 정재파비를 모두 고려한다면 1/1.05 배인 경우가 가장 유리하였다. 또한 전극/공극비는 직렬공진기의 IDT(η_S)는 0.48, 반사기(η_P)는 0.52, 병렬공진기의 IDT(η_P)는 0.52, 그리고 반사기(η_P)는 0.52 경우가 가장 형상도 증가에 유리함을 알 수 있었다. 1단자 SAW 공진기의 경우 반사기의 유효개수는 침투깊이(penetration depth)로 구할 수 있으며[2], 따라서 설계변수를 다시 줄일 수 있다. 초기단계에서는 우선 모든 직렬공진기와 병렬공진기의 각 전극 주기와 반사기 주기를 동일하게 하였으며 ($P_{1S}=P_{2S}=P_{3S}=P_{4S}$, $P_{1P}=P_{2P}$, $P_{1S}=P_{2S}=P_{3S}=P_{4S}$, $P_{1P}=P_{2P}$), 전극의 수($NDT_{1S}=NDT_{2S}=NDT_{3S}=NDT_{4S}$, $NDT_{1P}=NDT_{2P}$), 반사기의 수($Nref_{1S}=Nref_{2S}=Nref_{3S}=Nref_{4S}$, $Nref_{1P}=Nref_{2P}$), 전극

길이($W_{1S}=W_{2S}=W_{3S}=W_{4S}$, $W_{1P}=W_{2P}$), 전극/공극비($\eta_{1S}=\eta_{2S}=\eta_{3S}=\eta_{4S}$, $\eta_{1P}=\eta_{2P}$), $\eta_{1S}=\eta_{2S}=\eta_{3S}=\eta_{4S}$, $\eta_{1P}=\eta_{2P}$)를 같게 두었다. 또한 인덕터의 영향을 독립적으로 최종단계에서 고려한다면 설계에 이용되는 변수는 최종적으로 표 2에 나타난 것과 같이 7개의 변수로 줄어든다.

7개로 줄어든 설계변수가 필터 성능에 주로 미치는 영향을 순서대로 정리한 우선순위표를 내부인덕터의 결과와 함께 표 3에 나타내었다. 중심주파수는 직렬 및 병렬공진기의 IDT 주기로 조절하며 대역폭은 직렬 및 병렬공진기의 IDT 주기, 직렬공진기의 IDT 수, 병렬공진기의 IDT 수의 순으로 영향을 미치는 것을 의미한다. 형상도를 향상시킬 경우에는 각 공진기의 IDT수와 위상반전을 이용해야 함을 나타낸다. 위상반전 및 IDT의 제거는 한번에 한해 영향을 분석하였으며 추가적인 경향분석이 필요하다. 하지만 한번만의 위상반전 및 IDT 제거를 통해 필터의 형상도의 증가를 확인하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

이상의 결과를 토대로 일반적인 사다리형 구조로는 구현하기 힘든 1.8 GHz 대역에서 40 MHz씩의 협대역을 가지는 필터를 이중 필터형태로 구성하여 시뮬레이션한 결과를 그림 (5)에 나타내었다. 단 한번만의 위상반전과 IDT의 제거로 인해 형상도가 좋지 못하며 이로 인해 상호대역간에 많은 중첩이 발생하는 것을 알 수 있으나 그림 (b)에서와 같이 직렬공진기에 한번의 위상반전의 유무에 따라 오른쪽 천이대역의 특성이 조금 개선되는 것을 볼 수 있다. 향후 다중 위상반전을 통한 천이대역의 개선 및 앞에서 선정한 설계변수를 자동으로 조절하여 주어진 사양을 만족시킬 수 있는 최적화 프로그램에 대해 연구할 계획이다.

V. 결론

일반적인 SAW 필터에서 발생하는 선형성의 한계 및 천이대역의 특성을 개선하기 위한 새로운 구조의 이중구조 사다리형 SAW 필터의 최적 설계방법을 제시하고 그 가능성을 확인하였다. 특히 고주파 대역에서 만족시키기 어려운 정제과비 및 뛰어난 천이대역 특성을 만족시킬 수 있는 장점을 가지며, 이를 위해 withdrawal 가중기법 및 기판상에 onchip화된 마이크로 스텀리프라인 인덕터를 이용하였다. 우선 이중 구조 필터구조를 결정한 후, microstrip 라인 인덕터의 위치 및 인덕턴스 변화에 따른 필터 특성 변화를 살펴보았으며, 필터의 각종 형상변수의 변화에 따른 필터 특성변화를 조사하였다. 이상의 결과를 바탕으로 새로운 방법의 이중구조 SAW 필터의 설계방법을 제시하였으며 그 타당성을 검증하기 위해 1.8 GHz 대역의 RF 필터에 대한 설계 결과로 그 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. 노용래, "사다리형 SAW 필터의 최적 설계," 한국

음향학회지, 18권 1호, pp. 16-24, 1999.

2. T. Nagatsuka, K. Misu, T. kimura, S. Wadaka, A. Sakai, and K. Murai, "A ladder type filter using SAW resonators with different grating periods between IDT and reflectors," Technical report of IECE, p.29, 1997.

Table 1. Design variables for the SAW ladder filter composed of one port resonators

$P_{1S}, P_{2S}, P_{3S}, P_{4S}$	IDT period of series res.
P_{1P}, P_{2P}	IDT period of para. res.
$P_{1SR}, P_{2SR}, P_{3SR}, P_{4SR}$	reflector period of series res.
P_{1PR}, P_{2PR}	reflector period of para. res.
$W_{1S}, W_{2S}, W_{3S}, W_{4S}$	aperture width of series res.
W_{1P}, W_{2P}	aperture width of para. res.
$\eta_{1S}, \eta_{2S}, \eta_{3S}, \eta_{4S}$	series IDT metallization ratio
η_{1P}, η_{2P}	para. IDT metallization ratio
$\eta_{1SR}, \eta_{2SR}, \eta_{3SR}, \eta_{4SR}$	series grating metallization ratio
η_{1PR}, η_{2PR}	para. grating metallization ratio
$NIDT_{1S}, NIDT_{2S}, NIDT_{3S}, NIDT_{4S}$	# of IDT fingers of series res.
$NIDT_{1P}, NIDT_{2P}$	# of IDT fingers of para. res.
$Nref_{1S}, Nref_{2S}, Nref_{3S}, Nref_{4S}$	# of reflector fingers of series res.
$Nref_{1P}, Nref_{2P}$	# of reflector fingers of para. res.
h	electrode thickness
RevPst	polarity reverse position(s)
SKP	IDT skip point(s)
$L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}, L_{S4}, L_{S5}, L_{S6}$	microstrip line inductances
$L_{P1}, L_{P2}, L_{P3}, L_{P4}, L_{P5}$	
Total : 56 variables	

Table 2. Reduced design variables

$P_S=P_{1S}=P_{2S}=P_{3S}=P_{4S}$	
$P_P=P_{1P}=P_{2P}$	
$P_{SR}=(1/1.03) \times P_S$	
$P_{PR}=(1/1.05) \times P_P$	
$W_S=W_{1S}=W_{2S}=W_{3S}=W_{4S}$	
$W_P=W_{1P}=W_{2P}$	
$\eta_S=\eta_{1S}=\eta_{2S}=\eta_{3S}=\eta_{4S}=0.48$	
$\eta_P=\eta_{1P}=\eta_{2P}=0.52$	
$\eta_{SR}=\eta_{1SR}=\eta_{2SR}=\eta_{3SR}=\eta_{4SR}=0.52$	
$\eta_{PR}=\eta_{1PR}=\eta_{2PR}=0.52$	
$NIDT_S=NIDT_{1S}=NIDT_{2S}=NIDT_{3S}=NIDT_{4S}$	
$NIDT_P=NIDT_{1P}=NIDT_{2P}$	
$Nref_S=Nref_{1S}=Nref_{2S}=Nref_{3S}=Nref_{4S}=NIDT_S \times C_1$	
$Nref_P=Nref_{1P}=Nref_{2P}=NIDT_P \times C_2$	
h	
Reverse	
SKIP	
→ optimize 11 variables	
* C_1, C_2 [1]	

Table 3. Design priority table

Performance factors	Design variables (in order)	inductor	
f_0	P_S, P_P		
RP ↓	P_S, P_P	$L_{S1} \downarrow, L_{P1} \downarrow, L_{S2} \downarrow$	
BW ↑	$P_S, P_P, NIDT_S \uparrow, NIDT_P \downarrow$	$L_{S3} \downarrow, L_{P1} \downarrow$	
IL, SL ↓	$W_S \uparrow, W_P \downarrow, NIDT_S \uparrow, NIDT_P \downarrow$	$L_{P1} \uparrow, L_{S2} \downarrow, L_{S1} \downarrow$	
SF ↑	Right	$NIDT_S \uparrow, Reverse_{S1} \& Reverse_{S2}$	$L_{S2} \uparrow, L_{P1} \downarrow$
	Left	$NIDT_P \uparrow, Reverse_{P1} \& Reverse_{P2}$	
VSWR ↓	$SKIP_{P1} \& SKIP_{P2}, SKIP_{S1} \& SKIP_{S2}, NIDT_S \uparrow, W_S \uparrow, W_P \uparrow, NIDT_P \uparrow$	$L_{S1} \downarrow, L_{S2} \downarrow, L_{P1} \downarrow$	

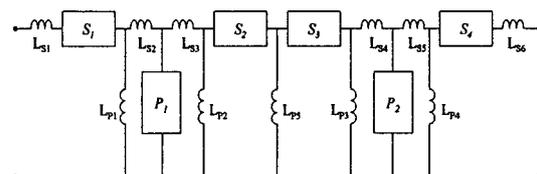


Fig. 1. Schematics of SAW ladder filter composed of 6 one port resonators.

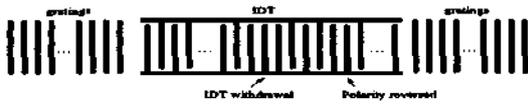


Fig. 2. Basic structure of the one port SAW resonator with a withdrawal weighting.

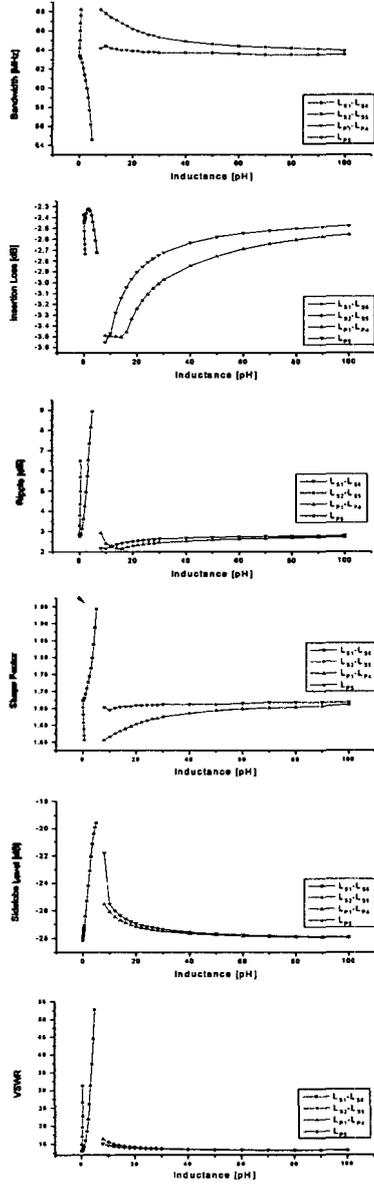


Fig. 3. Variation of the filter performance with the change of the microstrip line inductor.

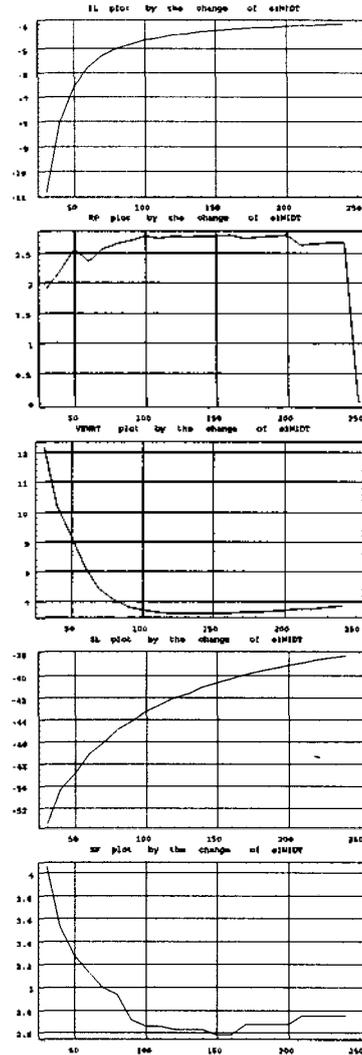
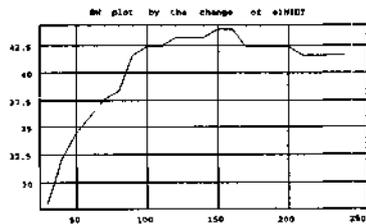


Fig. 4. Variation of the filter performance with the change of the number of IDT finger in first series resonator.

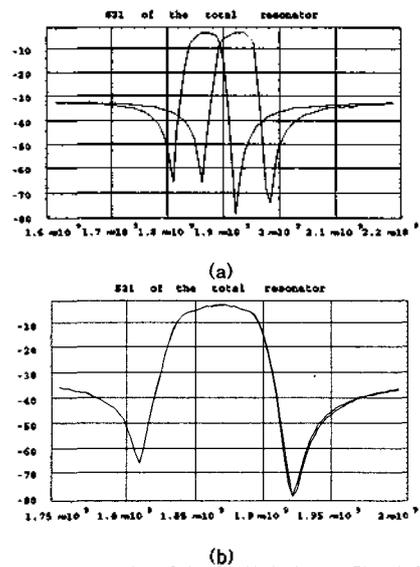


Fig. 5. Simulation results of the SAW dual type filter imbedded by the single polarity reverse and single IDT skip.