

# 탭 선로의 새로운 등가 회로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터 설계

## Design of Hair-Pin Band-Pass Filter Using New Equivalent Circuit of Tapped-Line

윤태순 · 권성수 · 홍태의 · 이종철

Tae-Soon Yun · Sung-Su Kwoun · Tae-Ui Hong · Jong-Chul Lee

### 요 약

본 논문에서는 대역 통과 필터의 입력부에 응용되는 탭 선로의 등가 회로를 제시하였고, 그 변수 값을 수식적으로 제시한다. 탭 선로의 등가 회로는 개방형 스텐브와 음의 전기적 길이를 갖는 전송 선로로 구현하며, 탭 선로의 위치와 공진기 길이는 공진기의 임피던스와 인버터 값으로 구할 수 있다. 이러한 새로운 등가 회로에 의한 설계는 기존의 방법에 비해 이론적으로 근접한 결과를 얻을 수 있게 한다. 새로운 탭 선로의 등가 회로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터는 중심 주파수 2 GHz에서 1.1 dB의 삽입 손실과 20 dB의 반사 손실 특성을 나타낸다.

### Abstract

In this paper, the equivalent circuit of tapped-line that is applied in the band-pass filter is suggested and the value of an equivalent circuit is mathematically defined. An equivalent circuit of tapped-line is composed by open stub and transmission line that has negative electrical length, and the position of tapped-line and the value of resonator's length can be obtained by the impedance of resonator and the inverter. The new design method using equivalent circuit leads to very good agreement compared with theoretical value. The hair-pin band-pass filter using equivalent circuit of tapped-line shows the insertion loss of 1.1 dB and the return loss of 20 dB at the center frequency of 2 GHz.

Key words : Tapped-Line, Equivalent Circuit, Hair-Pin, Band-Pass Filter

### I. 서 론

최근 이동 통신, 위성 통신 및 위성 방송 등이 실용화 됨에 따라 정보 통신 시장은 폭발적인 증가세를 보이고 있으며, 이동 통신에서의 동영상 중계나 실시간 중계와 같은 서비스의 고품질화가 각별히 요구되고 있다. 또한, 높은 주파수 선택도를 갖는 시스템과 선택도를 확보할 수 있는 필터가 요구되고 있다. 필터는 마이크로스트립 선로, CPW 선로, 도파관 선로 등과 같은 전송 선로를 기반으로 하여 설계하

는 방법과 인덕터, 커패시터 등과 같은 집중 소자를 통해 설계하는 방법, 그리고 FBAR(Film Bulk Acoustic Resonator)와 같이 특정 재료의 물리적 공진 특성을 이용하는 방법이 있다. 이러한 설계 방법 중 사용 주파수가 점차 고주파화 되어가는 상황에서 적절한 설계 방법은 전송 선로를 이용하는 방법이며, RF MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 기술에서는 이에 따른 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 전송 선로를 이용하는 필터 설계 방법의 하나인 탭 선로(tapped-line)를 이용한 대역 통과 필터는 1970년대

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음(HITA-2006-(C1090-0603-0008)).」

광운대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Kwangwoon University)

· 논문 번호 : 20060809-093

· 수정완료일자 : 2006년 11월 2일

이후 콤라인(comblin) 필터와 인터디지털(interdigital) 필터에 응용되면서 입, 출력 결합부의 높은 결합 계수를 해결하는 방법으로 제시되어 왔으며 현재는 전송 선로 구조를 갖는 대부분의 필터에서 응용되고 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 그러나, 탭 선로의 등가 회로가 명확히 제시되고 있지 않으며, 제시된 open-wire-line<sup>[1]</sup> 등가 회로와 같은 경우, 등가 회로의 변수들의 해석이 난해하고 제한적인 상황에서만 적용이 되고 있다. 따라서, 탭 선로를 이용하여 대역 통과 필터를 설계할 때에는 EM 해석을 여러 번 반복함으로써 탭 선로에서 구할 수 있는 external quality factor( $Q_e$ )를 구하여 근사적으로 해법을 제시하고 있다<sup>[2],[3]</sup>. 이러한 방법은 입, 출력부와 결합되는 필터의 결합도를  $Q_e$ 로 추출하는 방법이며, 비교적 정확한 해법을 제시하기는 하나, 기판의 종류, 구조의 종류, 주파수 등과 같은 모든 종류의 변수에 따라 변하는 값으로 각각의 경우에 EM 해석이 필요하고, 원하는  $Q_e$ 를 얻기 위해서는 수 차례 반복적인 작업이 요구된다. 본 논문에서는 탭 선로의 등가 회로를 제시하여 간단한 수식으로 탭 선로를 이용한 필터 설계가 가능한 방법을 제시한다.

## II. 탭 선로(Tapped-line)의 새로운 등가 회로

본 논문에서는 필터 설계에 있어 입, 출력단의 탭 선로의 등가 회로를 그림 1, 2와 같이 제안하여 탭 선로를 사용하는 필터 설계를 보다 간편화 하였다. 탭 선로는 필터에서 입, 출력부의 인터버를 대체한 것으로 필터에서의 탭 선로를 갖는 공진기와 입력부와 연결되는 첫 인버터( $J_{01}$ )는 그림 1과 같이 나타내어진다. 일반적으로 인버터는 그림 1(b)와 같이 음의 성분을 포함하고 있는데<sup>[3]</sup>, 이러한 음의 성분을 실제 필터에 적용하기 위해 그림 2(a)와 같이 인버터를 변형하게 된다. 변형된 인버터에 나타난 음의 성분은 병렬 공진기의 등가 회로에 포함되어 실제 필터를 구현하게 된다. 탭 선로의 등가 회로는 변형된 인버터의 등가 회로로부터 개방형 스텐브(open stub)와 음의 길이를 갖는 전송 선로로 제안되었다. 음의 길이를 갖는 전송 선로는 변형된 J 인버터의 음의 성분 ( $-C_{01}$ )과 같이 독립적으로는 의미를 갖지는 않으나, 필터 설계에 있어 탭 선로와 인접한 공진기의 길이를 감소시키는 역할을 하게 된다. 이와 같은 탭 선로

의 등가 회로는 선로의 임피던스와 스텐브 및 전송 선로의 전기적 길이라는 3개의 변수를 갖는다. 그림 2는 실제로 필터에 적용하기 위해 변형시킨 J 인버터와 탭 선로의 등가 회로를 나타내고 있다. 각각의 변수 값은 그림 2(b)에 나타난 B점의 어드미턴스를 구함으로써 얻어진다.

그림 1(b)에서 전송 선로의 정규화된 임피던스는  $z$ 이고 개방형 스텐브의 전기적 길이는  $\theta_1$ 이라 할 때, 점 A에서 개방형 전송 선로를 바라보는 임피던스는 아래의 식으로 주어진다.

$$z_{stub} = \frac{z}{j \tan \theta_1} \tag{1}$$

개방형 스텐브와 입력 어드미턴스는 병렬이므로 식 (1)에 의해, 점 A에서 입력을 바라 보는 임피던스는 다음과 같다.

$$z_A = \frac{1}{y_a + j \tan \theta_1} \tag{2}$$

음의 길이를 갖는 전송 선로의 전기적 길이를  $\theta_2$ 라 하면, 위 식 (2)를 전송 선로 임피던스 공식에 대

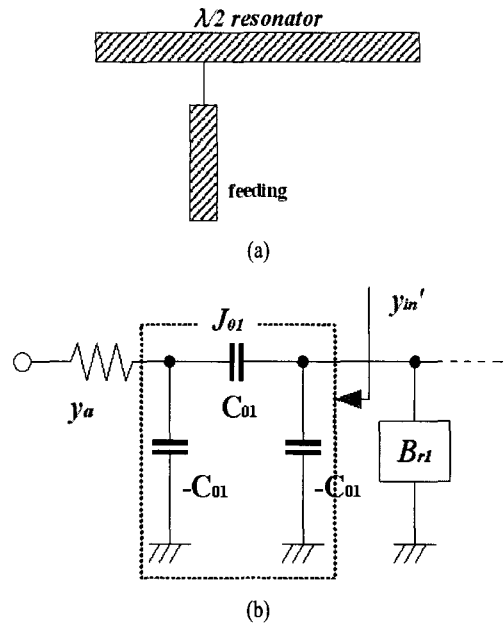


그림 1. 필터에서의 (a) 탭 선로를 갖는 공진기와 (b) J 인버터의 등가 회로  
Fig. 1. (a) Resonator with the tapped-line and (b) equivalent circuit of J-inverter for the band-pass filter.

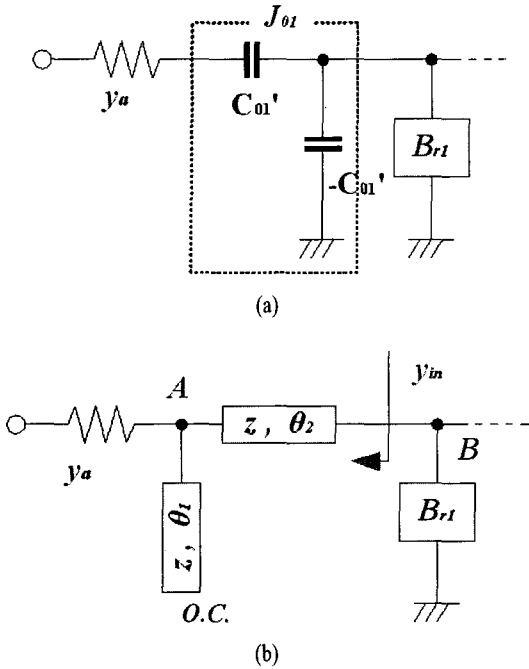


그림 2. (a) 실제 필터 구현을 위해 변형된 J 인버터와 (b) 탭 선로의 등가 회로  
 Fig. 2. (a) Equivalent circuit of modified J-inverter and (b) a tapped-line for the band-pass filter.

입하여 점 B에서 입력단 방향의 입력 임피던스를 구할 수 있다.

$$z_B = z \frac{z_A + jz \tan \theta_2}{z + jz_A \tan \theta_2} = z \frac{1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2 + j(z/z_a) \tan \theta_2}{z/z_a + j(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)} = Z_{in} \quad (3)$$

위 식 (3)에서 입력 어드미턴스는 입력 임피던스의 역수이므로 입력 어드미턴스를 구하면 다음 식과 같다.

$$y_{in} = y \frac{z/z_a + j(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)}{1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2 + j(z/z_a) \tan \theta_2} \quad (4)$$

일반적인 필터 이론에서 탭 선로는 인버터와 대체된 것이므로 필터의 입력단의 인버터 값( $J_{01}$ )과 필터 입력단의 어드미턴스  $y_a$ 를 이용하여 입력 어드미턴스를 구하면 정규화시켰을 때  $y_{in} = J_{01}^2 / y_a$ 을 얻을

수 있다. 탭 선로의 등가 회로는 인버터가 연결된 경우와 동일한 값을 얻어야 하므로, 입력 어드미턴스의 실수값과 허수값을 통해 아래 두 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Re}[y_{in}] &= \frac{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2) + \tan \theta_2 (\tan \theta_1 + \tan \theta_2)}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 + ((z/z_a) \tan \theta_2)^2} \\ &= \frac{y_a (1 + \tan^2 \theta_2)}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 + ((z/z_a) \tan \theta_2)^2} \\ &= f_{01}^2 / y_a \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}[y_{in}] &= \\ y \frac{(\tan \theta_1 + \tan \theta_2)(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2) - (z/z_a)^2 \tan \theta_2}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 + ((z/z_a) \tan \theta_2)^2} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

입력 어드미턴스의 허수값이 '0' 이라는 식 (6)에서 아래 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\tan \theta_1 + \tan \theta_2)(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2) \\ = (z/z_a)^2 \tan \theta_2 \end{aligned} \quad (7)$$

또한, 위 식 (7)을 입력 어드미턴스의 실수값을 구한 식 (5)에 대입하면 아래 식 (8)을 구할 수 있다. 그리고, 식 (8)의 결과 식을 식 (7)에 대입하면 다음 식이 구해진다.

$$\tan \theta_1 = \{(zJ_{01})^2 - 1\} \tan \theta_2 \quad (9)$$

개방형 스테브는 양의 전기적 길이를 갖고, 전송 선로는 음의 전기적 길이를 가지므로, 식 (8)과 식 (9)를 연립하여  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left\{ \left( \frac{1}{zJ_{01}} - zJ_{01} \right) \sqrt{\frac{1 - (zJ_{01})^2}{1 - (zJ_{01})^2}} \right\} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{zJ_{01}} \sqrt{\frac{1 - (zJ_{01})^2}{1 - (zJ_{01})^2}} \right\} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서 알 수 있듯이, 필터 설계 변수로 주어지는 인버터 값과 각 선로의 임피던스 값에 의해 탭 선로의 등가 회로의 변수인 개방형 스테브와 음의 길이를 갖는 전송 선로의 전기적 길이를 구할 수 있다. 개방형 스테브와 음의 길이를 갖는 전

$$\begin{aligned} \frac{f_{01}^2}{y_a^2} &= \frac{1 + \tan^2 \theta_2}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 + ((z/z_a) \tan \theta_2)^2} = \frac{1 + \tan^2 \theta_2}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 + \tan \theta_1 (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) (1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)} \\ &= \frac{1 + \tan^2 \theta_2}{(1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2)^2 (1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2 + \tan^2 \theta_1 + \tan \theta_1 \tan \theta_2)} = \frac{1}{1 - \tan \theta_1 \tan \theta_2} \end{aligned} \quad (8)$$

송 선로를 갖는 탭 선로의 등가 회로는 그 변수 값을 위 식에서와 같이 간단하게 구할 수 있을 뿐 아니라, 탭 선로를 사용함에 따라 부가적으로 생기는 필터의 제로(zero) 주파수를 식 (12)에 의해 수식적으로 도출할 수 있다.

$$f_{zero} = \frac{\pi/2}{\tan^{-1}\left\{\left(\frac{1}{z_0 J_{01}} - z_0 J_{01}\right) \sqrt{\frac{1 - (z_0 J_{01})^2}{1 - (z_0 J_{01})^2}}\right\}} \cdot f_0 \quad (12)$$

식 (12)에서  $f_{zero}$ 와  $f_0$ 는 각각 필터의 제로 주파수와 중심 주파수를 가리킨다.

### III. 탭 선로를 이용한 헤어핀 필터

탭 선로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터는 다양한 구조에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 하나의 방법으로는 헤어핀 공진기의 결합 계수와  $Q_e$ 를 반복적인 EM 해석을 통해 구하는 방법이다. 본 논문에서는 이러한 반복적인 방법을 벗어나기 위해 해석적 접근을 통해 탭 선로를 이용한 헤어핀 필터를 설계하였다. 이러한 수식적 설계 방법은 J. S. Wong<sup>[4]</sup>에 의해 제시되었다. 그림 3은 Wong에 의해 제시된 수식적 방법을 위한 탭 선로 결합을 갖는 헤어핀 공진기와 본 논문에서 제시하는 수식을 이용하기 위한 헤어핀 공진기이다.

그림 3와 같이 Wong에 의해 제시된 방법에 의하면 탭 선로의 위치  $t$ 는 다음 식에 의해 구할 수 있다<sup>[3],[4]</sup>.

$$t = \frac{2L}{\pi} \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{Q_e}}\right) \quad (13)$$

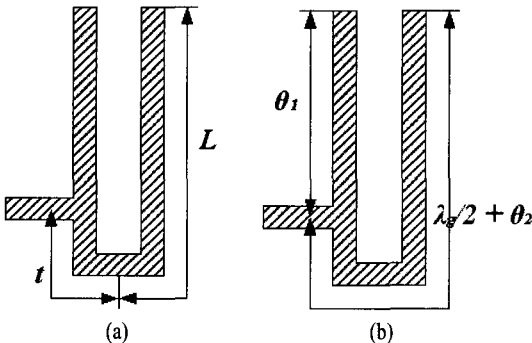


그림 3. (a) Wong과 (b) 본 논문의 수식을 위한 탭 선로 결합의 헤어핀 공진기  
Fig. 3. Tapped-line fed hair-pin resonator for equations by (a) Wong and (b) this paper.

식 (13)에서  $L$ 은 파장의 1/4의 길이를 갖고,  $z$ 는 정규화된 공진기의 임피던스이다. 또한,  $Q_e$ 는 다음 식에 의해 주어진다.

$$Q_e = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (14)$$

위 식에서  $g_0$ 와  $g_1$ 는 저역 통과 필터의 기본형에서 주어지는 값이고  $FBW$ 는 대역폭을 나타낸다. 본 논문에서는 5%의 대역폭을 갖는 탭 선로를 이용한 헤어핀 필터를 설계함으로써 제시된 탭 선로의 등가 회로를 이용하는 방법과 기존의 Wong에 의해 제시된 방법을 비교한다. 헤어핀 필터는 0.01 dB의 리플(ripple)을 갖는 3차의 체비세프 타입으로 설계되었고, 각 헤어핀 공진기는 80°의 커플링 영역을 갖는다. 이러한 경우에, Wong에 의한 방법에 의하면 탭 선로의 위치  $t$ 는 헤어핀 공진기의 임피던스가 특성 임피던스라 하였을 때, 식 (13)에 의해 20.69°의 값을 갖는다. 한편, 탭 선로의 등가 회로에 의해 제시된 식 (10), (11)에 의하면 개방형 스테브와 전송 선로의 전기적 길이( $\theta_1, \theta_2$ )는 각각 68.02°와 -70.54°가 된다. 탭 선로의 등가 회로에 의해 제시된 방법은 그림 3에 의해  $t=90^\circ - (\theta_1 + \theta_2)$ 로 주어지므로 유사한 값을 얻을 수 있다. 그러나, 입력부와 필터의 결합부의 인버터 값에 의한 공진기 길이 감소량을 정확히 찾을 수 있다는 장점이 있다. 그림 4는 Wong에 의해 제시된 방법과 탭 선로의 등가 회로를 이용하여 이상적 선로로 설계한 결과를 비교한 그래프이다.

그림 4에서 알 수 있듯이 음의 전기적 길이를 갖

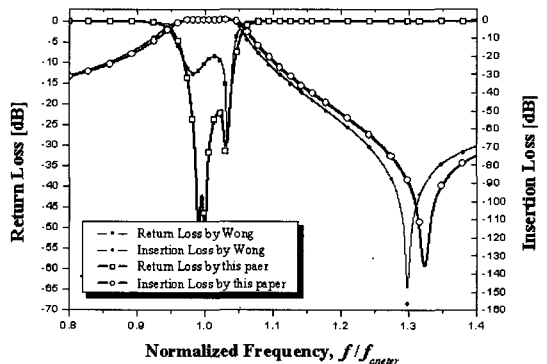


그림 4. 헤어핀 필터 설계 결과(이상적 선로)  
Fig. 4. Design results of hair-pin band-pass filter(ideal line).

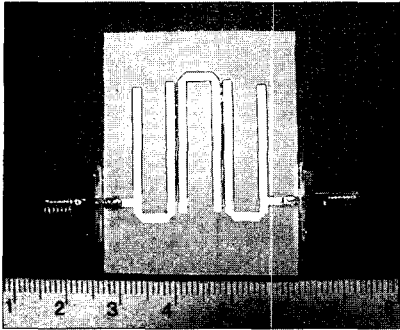


그림 5. 탭 선로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터의 사진

Fig. 5. Photograph for the tapped-line hair-pin BPF.

는 전송 선로로 인버터 값에 의한 영향을 보상해 줌으로써 보다 이론에 근접한 결과값을 얻을 수 있을 뿐 아니라 보다 정확한 제로(zero)값을 구할 수 있다.

그림 5는 새로운 탭 선로의 등가 회로를 이용하여 설계한 헤어핀 대역 통과 필터의 사진이다.

헤어핀 대역 통과 필터는 두께 0.54 mm를 갖는 유전율 2.54의 테프론 기판을 이용하여 제작되었고, 크기는 22.63×25.20 mm<sup>2</sup>이다. Zeland사의 IE3D<sup>[5]</sup>에 의해 최적화된 헤어핀 대역 통과 필터는 중심 주파수 2 GHz에서 삽입 손실 1.0 dB와 반사 손실 20 dB를 갖고, 측정 결과는 삽입 손실과 반사 손실이 각각

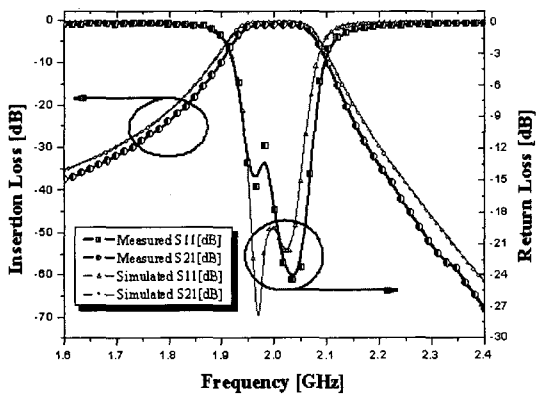


그림 6. 탭 선로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터의 설계 및 측정 결과

Fig. 6. Simulation and measurement results of the tapped-line hair-pin BPF.

1.1 dB, 20 dB를 가진다. 최적화된 필터의 특성과 측정 결과는 그림 6에 나타내었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 높은 커플링 특성을 가지며, 구현이 간단한 탭 선로(tapped-line)의 등가 회로 및 변수의 수식적 해석과, 이러한 탭 선로의 등가 회로를 이용한 헤어핀 대역 통과 필터의 설계 방법을 제시하였다. 제안된 탭 선로의 등가 회로는 개방형 스텐브(open stub)와 음의 전기적 길이를 갖는 전송 선로로 구현되었으며, 전송 선로의 임피던스와 개방형 스텐브, 그리고 전송 선로의 전기적 길이라는 변수를 갖는다. 변수 값이 간단한 수식으로 전개됨에 따라 기존의 반복적인 EM 설계에 의존하여 설계되었던 탭 선로에 비해, 본 논문에서 제안된 탭 선로의 등가 회로는 여러 구조의 대역 통과 필터 설계에 이론적으로 접근하여 쉽게 응용될 수 있으며, 기존의 Wong에 의해 제시된 수식적 방법에 비해 보다 정확한 필터 설계를 가능하게 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] E. G. Cristal, "Tapped-line coupled transmission lines with applications to interdigital and combline filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no. 12, pp. 1007-1012, Dec. 1975.
- [2] S. Caspi, J. Adelman, "Design of combline and interdigital filters with tapped-line input", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, no. 4, pp. 759-763, Apr. 1988.
- [3] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microwave Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2001.
- [4] J. S. Wong, "Microstrip tapped-line filter design", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 27, no. 1, pp. 44-50, Jan. 1979.
- [5] IE3D, ver. 10.2, Zeland Corp., CA, 2004.

윤 태 순



2000년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)  
2006년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)  
2006년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사후 연구과정

[주 관심분야] Ferroelectric tunable device, microwave & millimeter-wave device, RF MEMS

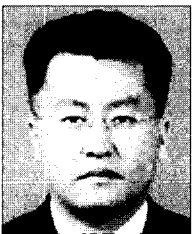
홍 태 의



1985년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)  
1987년 8월: 인천대학교 전자공학과 (공학석사)  
1992년 2월~2004년 2월: 전자부품연구원 책임연구원  
2004년 3월~2005년 6월: 경운대학교 멀티미디어공학과 객원교수

2004년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정  
2005년 7월~현재: 요업기술원 책임연구원  
[주 관심분야] RF MEMS, LTCC, 수동부품 및 소재

권 성 수



1999년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)  
2001년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 3월~현재: LG전자 정보통신사업부  
2001년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 박사과정

[주 관심분야] OFDM, VoWLAN, MIMO

이 중 철



1983년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
1985년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)  
1989년 12월: Arizona State Univ. EE Dept. (공학석사)  
1994년 5월: Texas A&M Univ. EE Dept. (공학박사)

1994년 6월~1996년 2월: 현대전자 광소자 개발실 선임연구원  
1996년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 전임강사/조교수/부교수  
[주 관심분야] 초고주파 및 광전자 공학, RF MEMS, 밀리미터파 능동 및 수동 소자