
동축선로내 대역억제필터의 최적화

정 봉 식*

Optimization of band-stop filter in coaxial line

Bong-Sik Jeong

이 논문은 1997학년도 동아대학교 학술연구조성비(신진과제)에 의하여 연구되었음.

요 약

본 논문에서는 고주파 발생기로부터 발생되는 원하지 않는 고조파 성분을 차단하기 위해 동축선로형 출력단의 내부에 대역억제필터를 삽입하고, 이필터를 등가회로 개념으로 해석하고 최적화하고자 한다. 동축선로 내부에 삽입되는 대역억제필터는 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조로서, 초크의 길이는 고조파 성분에 해당하는 파장의 $\frac{1}{4}$ 로 초기화한다. 이때 초크구조의 불연속 경계에서 나타나는 가장자리효과는 초크의 길이를 등가적으로 증가시켜 차단주파수를 감소시키므로 고조파 성분의 정확한 차단을 어렵게 한다. 여기서는 가장자리효과를 보상하기 위해 최적화 알고리즘(LMA)을 이용하여 대역억제필터를 최적화하고자 한다.

Abstract

In this paper band-stop filters that reject the undesired 3th and/or 5th harmonics generated from high frequency generator are analyzed using equivalent circuit concept, and optimized using iterative optimization algorithm. The length of the band-stop filter is setup initially a quarter of a wavelength of the harmonic, but initial filter structure is exactly unable to cutoff the harmonics because of the fringing effect at the discontinuous boundary. To reduce the mismatch between the cutoff frequency and the harmonics, iterative LMA(Levenberg-Marquardt Algorithm) is introduced and band-stop filters in coaxial line are optimized.

* 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수
접수일자 : 1999년 12월 11일

I. 서론

최근 많이 사용되고 있는 고주파 발생기는 원하지 않는 고조파 성분도 발생시킨다[1][2][3]. 고조파 성분은 원천적으로 발생을 억제하거나, 발생을 허용하는 대신에 발생기의 출력단에서 대역역제필터를 이용하여 차단하기도 한다. 원천적인 고조파 차단은 발생기 구조의 복잡성으로 인해 비용 상승을 유발하므로 원천적인 차단을 대신하여 발생기의 출력단에 대역역제필터를 삽입하여 고조파 성분의 흐름을 차단하는 방법이 주로 사용된다.

필터는 주로 삽입손실법(insertion loss method)과 영상법(image method)으로 설계한다[4]. 삽입손실법은 이항분포 또는 체비셰프(Chebyshev) 응답 특성을 만족하는 저역통과필터를 먼저 구하고, 이를 변환하여 원하는 필터특성을 얻는 방법으로 필터의 진폭특성 및 위상특성을 쉽게 조절할 수 있다. 영상법은 2단자 필터구조를 중속 연결하여 특정한 차단주파수와 감쇠특성을 얻는 방법으로, 영상임피던스가 일정해야 하며, 영상임피던스가 주파수의 함수인 경우에는 원하는 주파수 특성을 얻기 위해서는 반복계산을 하여야 한다.

본 논문에서는 길이가 제한되어 있는 동축선로형 출력단을 갖는 고주파 발생기로부터 발생하는 3고조파 및 5고조파 성분을 출력단의 내부에 삽입한 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조의 대역역제필터로 차단하고자 한다. 이때 고조파 성분을 정확하게 차단하기 위해서 동축선로형 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크의 길이를 매개변수로 하여 최적화하여야 한다.

최적화 알고리즘에는 기율기법과 확률기법이 있다. 확률기법에는 적자생존에 기초한 생물학적 진화론을 모델링한 Genetic Algorithm(GA)[5]과 열역학에 기초한 열처리 과정을 모델링한 Simulated Annealing Algorithm(SAA)[6]이 있다. 확률기법은 비용함수의 현재값과 이전값을 비교하여 확률에 기초하여 비용함수가 감소하는 방향으로 매개변수를 변화시키지만, SAA는 한 개의 매개변수 분포를, GA는 여러 개의 매개변수 분포를 이용하는 점에서 다르다. 한편, 기율기법에는 비용함수의 기율기가 음이 되도록 매개변수를 변화시켜 최종적으로 비용함수의 기율기가 '0'이 되게 하는 매개변수

를 구하는 뉴턴형 알고리즘이 있다. 본 논문에서는 적절한 초기값의 설정으로 확률기법에 비해 상대적으로 수렴속도가 빠른 뉴턴형 알고리즘의 일종인 Levenberg-Marquardt Algorithm(LMA)[7]를 이용하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 동축선로내부에 삽입된 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조의 대역역제필터를 정의하고, 필터를 세분화하여 영역과 경계에 대한 등가회로를 얻고, III장에서 뉴턴형 최적화 알고리즘인 LMA를 살펴보고, IV장에서 필터의 해석 결과를 고찰하고, 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 대역역제필터 해석

본 논문은 고주파 발생기로부터 발생하는 고조파 성분을 길이가 1λ 로 제한되어 있는 동축선로형 출력단의 내부에 대역역제필터를 삽입하여 차단하고자 한다. 대역역제필터는 동축선로형 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조로 되어 있다. 동축선로형 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조는 길이가 고조파 성분에 해당하는 파장의 $\frac{1}{4}$ 인 분기도체를 동축선로의 내부도체와 외부도체 사이에 삽입하고 분기도체의 한 측면을 외부도체에 단락시킨 형태이다. 출력단의 길이가 제한되어 있으므로 하나의 고조파 성분을 하나의 초크를 사용하여 차단하게 한다.

이러한 필터구조의 해석은 영상법에 기초하여 해석하고자 한다. 필터구조는 먼저 몇 개의 영역으로 세분화하고, 각 영역과 경계면에서 등가회로를 정의하고, 이어서 등가회로로부터 ABCD 행렬과 산란행렬을 계산한다.

1. 동축선로형 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조

그림 1은 동축선로형 출력단의 내부에 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조를 삽입한 대역역제필터의 2차원 구조이다. 그림 1의 구조는 세 영역(영역 I, 영역 II, 영역 III)으로 나뉜다. 영역 I과 III은 동축선로의 기본구조이고, 영역 II는 동축선로의 내부도체와 외부도체의 중간에 분기도체가 삽입된 구조로서, 분기도체의 한 측면이 동축선로의 외부도체에 단락되어 있다. 분기도체는 고조파 성분의 $\frac{1}{4}\lambda$ 에 해당하는

길이를 가지므로 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크라고 한다. 여기서 분기도체의 두께는 매우 작다고 가정한다.

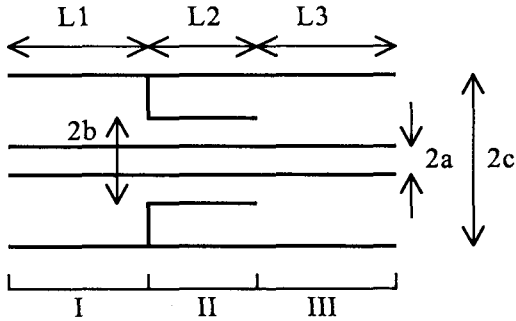


그림 1. 동축선로내 대역역제필터
Fig. 1. Band-stop filter in coaxial line

2. 단위 등가회로(8,9,10)

1) 영역 I과 영역 III

그림 2는 길이가 L, 내부도체의 반경이 a, 외부도체의 반경이 c인 동축선로(영역 I과 영역 III)의 구조와 그 등가회로이다. 등가회로에 대한 ABCD 행렬은 다음과 같다.

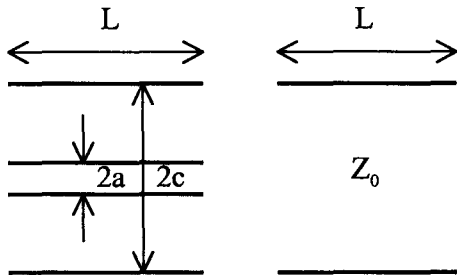


그림 2. 동축선로와 등가회로
Fig. 2. Coaxial line and equivalent circuit

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ \frac{j \sin \beta l}{Z_0} & \cos \beta l \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{c}{a}$ 와 β 는 동축선로의 특성임피던스와 위상정수이고, ϵ, μ 는 동축선로내

매질의 유전율과 투자율이다.

2) 영역 I과 영역 II의 경계

그림 3은 내경이 동일하고 외경이 서로 다른 동축선로가 접해있는 영역 I과 영역 II의 경계면 부근의 구조와 그 등가회로이다. 등가회로에 대한 ABCD 행렬은 다음과 같다.

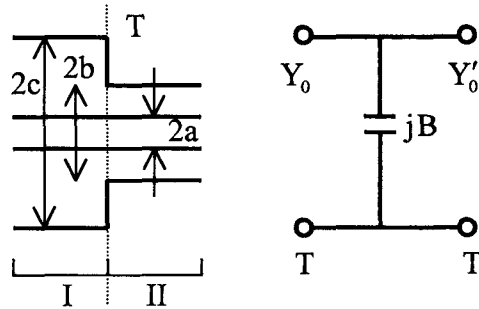


그림 3. 외경이 서로 다른 동축선로의 경계와 등가회로

Fig. 3. Junction of two coaxial lines of unequal outer radii and equivalent circuit

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

여기서

$$B = \omega C = 2\epsilon_r \pi \omega a C'$$

$$C' = \frac{\epsilon}{100\pi} \left[\frac{1+a^2}{a} \ln \left(\frac{1+a}{1-a} \right) - 2 \ln \left(\frac{4a}{1-a^2} \right) \right]$$

$$+ 4.12 \times 10^{-15} (0.8 - a) (\tau - 1.4)$$

$$a = \frac{b-a}{c-a}, \quad \tau = \frac{c}{a} \quad \text{이다.}$$

3) 영역 II와 영역 III의 경계

그림 4는 영역 II와 영역 III의 경계면 부근의 구조와 경계면 부근의 등가회로이다. 등가회로에 대한 ABCD 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y}{Y_2} & \frac{1}{Y_2} \\ Y_1 + Y + \frac{Y_1 Y}{Y_2} & 1 + \frac{Y_1}{Y_2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

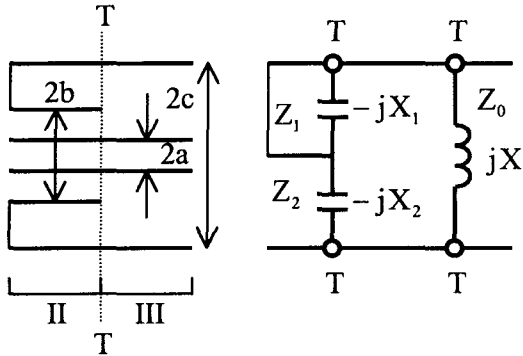


그림 4. 영역 II와 III의 경계와 등가회로
Fig. 4. Boundary of region II and III, and equivalent circuit

여기서

$$Y_1 = j\frac{1}{X_2}, Y_2 = j\frac{1}{X_1}, Y = -j\frac{1}{X}$$

$$\frac{X}{Z_0} = \cot \frac{2\pi d}{\lambda}$$

$$\frac{X_1}{Z_0} = \frac{b_1}{b_0} \cot \frac{2\pi d}{\lambda}, \frac{X_2}{Z_0} = \frac{b_2}{b_0} \cot \frac{2\pi d}{\lambda}$$

$$\frac{\pi d}{b_0} \cong \frac{b_1}{b_0} \ln \frac{b_0}{b_1} + \frac{b_2}{b_0} \ln \frac{b_0}{b_2}$$

$$b_0 = c - a, b_1 = c - b, b_2 = b - a$$

$$\frac{Z_1}{Z_0} = \frac{\ln \frac{c}{b}}{\ln \frac{c}{a}}, \frac{Z_2}{Z_0} = \frac{\ln \frac{b}{a}}{\ln \frac{c}{a}}, Z_0 = Z_1 + Z_2$$

..... (4)

이다. 식(4)의 d는 경계면 부근에서 가장자리효과 (fringing effect)에 의해 등가적으로 증가하는 분기도체 길이의 증가량을 의미한다.

3. 필터의 산란특성

그림 1의 산란특성은 영역 I, 영역 I과 영역 II의 경계, 영역 II의 안쪽영역, 영역 II와 영역 III의 경계, 영역 III에 대한 ABCD 행렬을 순차적으로 곱한 후, 변환식[4]을 이용하여 산란행렬을 구한다. 이때 그림 4에서 한쪽면이 단락되어 있는 영역 II의 바깥 영역인 초크영역은 영역 II와 영역 III의

경계면에 대한 ABCD 행렬에 포함된다.

III. 최적화 알고리즘

대역역제필터의 차단주파수는 차단하려는 고조파 성분에 정확히 일치해야 한다. 이때 차단주파수가 분기도체(초크)의 길이에 의존하므로 초크의 길이를 $\frac{1}{4}\lambda$ 로 설정한 대역역제필터는 차단주파수를 낮추는 가장자리효과를 보상하기 위해서 초크의 길이를 매개변수로 설정하여 최적화하여야 한다. 본 논문에서 사용하고자 하는 최적화 알고리즘은 확률기법에 비해 상대적으로 수렴속도가 빠른 뉴튼형 알고리즘의 일종인 LMA를 이용한다.

그림 5는 LMA의 흐름도를 보여주고 있다. 목표산란계수는 초크의 초기구조로부터 계산한 산란특성에서 최소투과계수를 주는 주파수를 차단주파수로 이동하여 구한 것이고, 비용함수는 목표산란계수와 반복 계산된 산란계수와의 차이의 제곱의 합으로 정의한다. 매개변수는 차단주파수를 결정하는 초크의 길이로 설정한다.

- ① 목표산란계수 (F^s)를 정의한다.
- ② 매개변수 ω 를 초기화한다.

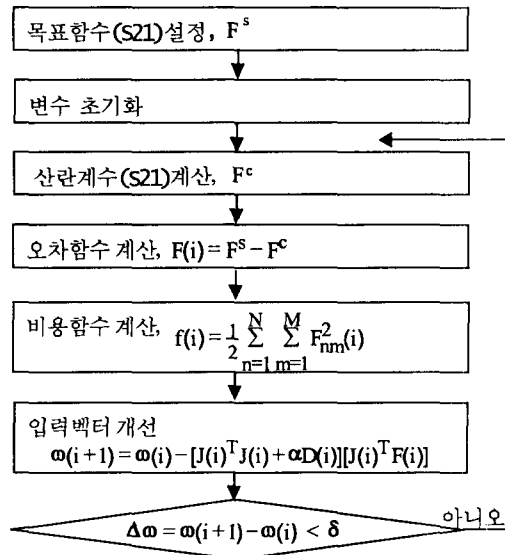


그림 5. LMA의 흐름도
Fig. 5. Flowchart of LMA

- ③ 매개변수에 대한 산란계수(F^c)를 구한다.
- ④ 오차함수와 비용함수를 구한다.
- ⑤ 오차함수에 대한 Jacobian 행렬을 구한다.
- ⑥ 매개변수 $\omega(i+1)$ 를 개선한다.
- ⑦ $\Delta\omega = \omega(i+1) - \omega(i) < \delta$ 인지 체크한다. δ 는 수렴 반경이다.
- ⑧ $\Delta\omega < \delta$ 일 때까지 과정③-⑦을 반복한다.

IV. 계산결과 및 검토

먼저, 3고조파 성분만을 차단하는 단일 초크구조의 대역억제필터를 고찰하고, 이어서 3고조파 성분과 5고조파 성분을 동시에 차단하는 이중 초크구조의 대역억제필터를 고찰하고자 한다.

1) 단일 대역억제필터

그림 6은 기본주파수(1GHz)와 3고조파(3GHz) 성분이 섞여 있는 신호에서 3고조파 성분을 차단하기 위해 그림 1과 같이 단일 초크구조가 삽입된 대역억제필터에 대해서 LMA로 최적화하기 이전과 이후의 주파수에 따른 산란특성이다. 이때 동축선로의 내경(a)은 1mm, 외경(c)은 6mm, 분기도체가 위치한 반경(b)는 4mm로 하였다. 그리고 초크의 길이는 3고조파 성분(3GHz)에 해당하는 파장의 $1/4$ 로 초기 설정하였고, 이를 매개변수로하여 최적화하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 최적화 이

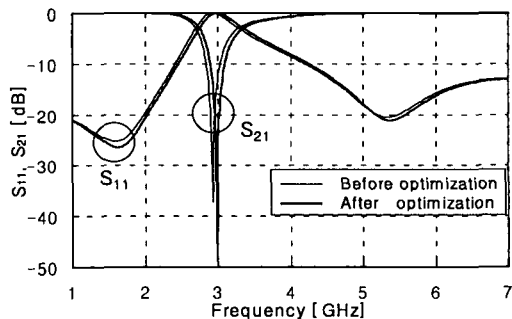


그림 6. 단일대역억제필터의 산란특성
Fig. 6. Scattering characteristics of single band-stop filter

전의 차단주파수는 2.925GHz로 3고조파 성분인 3GHz 비해 다소 낮은 값을 갖는다. 이는 영역 II와 III의 경계면 부근에서 가장자리효과로 인해 식 (4)의 d만큼 초크의 길이가 증가적으로 증가하였기 때문이다. 초크의 길이를 최적화하여 구한 차단주파수는 3고조파 성분에 일치하였다.

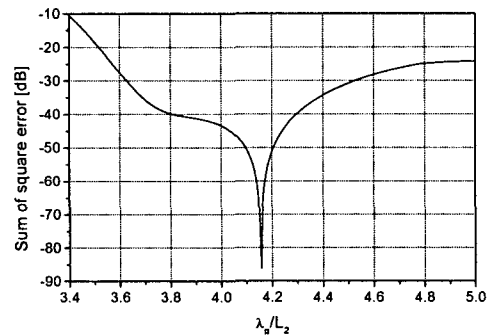


그림 7. 분기도체의 길이에 따른 오차
Fig. 7. Error as function of bifurcation length

그림 7은 초크의 길이에 따른 단일 대역억제필터의 차단특성을 보여주고 있다. 초크의 길이가 차단파장의 $1/4$ 이 아닌 $1/4.16$ 에서 3고조파 성분을 정확하게 차단함을 알 수 있다. 여기서 0.16은 가장자리효과로 인해 초크의 길이가 증가적으로 늘어나는 정도를 의미한다.

2) 이중 대역억제필터

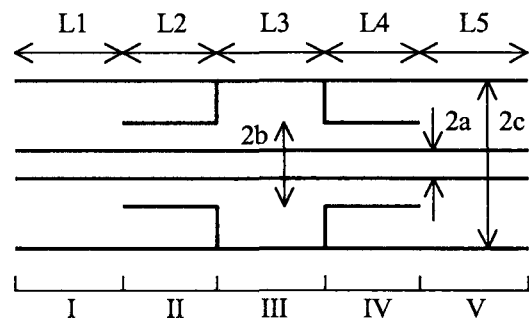


그림 8. 이중대역억제필터
Fig. 8. Double band-stop filter

그림 8은 기본주파수가 1GHz이고, 3고조파와 5고조파 성분이 섞여 나오는 신호에서 3고조파 성분과 5고조파 성분을 동시에 차단하는 이중 대역역제필터의 2차원 구조이다. 이때 영역 II의 초크 구조는 3고조파 성분을 차단하고, 영역 IV의 초크 구조는 5고조파 성분을 차단하도록 설계하였다.

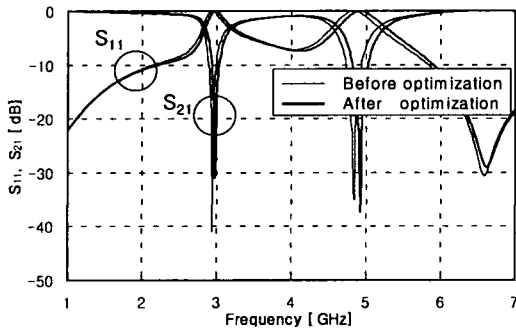


그림 9. 이중대역역제필터의 산란특성
Fig. 9. Scattering characteristics of double band-stop filter

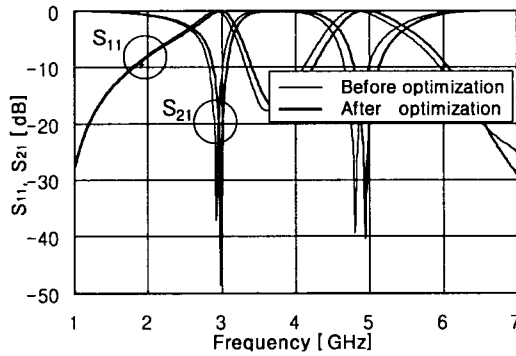


그림 10. 이중대역역제필터의 산란특성(L3=0)
Fig. 10. Scattering characteristics of double band-stop filter(L3=0)

그림 9는 이중 대역역제필터(그림 8)를 최적화하기 이전과 이후의 주파수에 따른 산란특성이고, 그림 10은 그림 8에서 영역 III이 없는(L3=0) 구조에 대한 최적화 이전과 이후의 산란특성이다. 그림 9와 그림 10은 단일 대역역제필터와 마찬가지로 초크의 길이를 최적화함으로써 차단특성이 대폭 개

선되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 제한된 길이의 동축선로형 출력단을 갖는 고주파 발생기로부터 발생하는 고조파 성분을 차단하기 위해 동축선로 내부에 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조를 삽입한 대역역제필터를 고려했다.

일반적으로 $\frac{1}{4}\lambda$ 초크구조가 삽입된 동축선로형 대역역제필터는 차단하려는 고조파 성분에 해당하는 $\frac{1}{4}\lambda$ 를 초크의 초기 길이로 설정하지만, 불연속 경계부근에서 나타나는 가장자리효과로 인해 초크의 길이가 증가적으로 증가하기 때문에 차단주파수가 낮아지는 경향이 있다. 이러한 차단주파수의 감소를 보상하기 위해 최적화 알고리즘(LMA)을 이용하여 초크의 길이를 최적화함으로써 고조파 성분에 정확하게 일치하는 차단주파수를 갖는 대역역제필터를 설계할 수 있었다.

향후 본 논문에서 제시한 해석기법과 최적화 알고리즘(LMA)을 다른 형태의 필터구조에 대해서 확대 적용하여 검토하고자 한다.

참고문헌

- [1] A. M. Buckbaum, "Microwave Oven Door Seal Characteristics", IMPI, pp.67-71, 1981.
- [2] J. M. Osepchuk, J. E. Simpson, and R. A. Foerstner, "Advances in Choke Design for Microwave Oven Door Seal", Journal of Microwave Power, Vol.8, No. 3/4, 1973.
- [3] J. M. Osepchuk, "A History of Microwave Heating Application", IEEE Trans. on MTT, Vol.32, No.9, pp.1200-1224, Sept. 1984.
- [4] David M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [5] R. L. Haupt and S. E. Haupt, Practical genetic algorithms, John Wiley, 1998.
- [6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," Science, vol.220, no.4598, pp.670-680, May 1983.

- [7] 박천석, 2차원 유전체의 영상재현을 위한 반복 수치계산 방법의 연구, 한국과학기술원 박사학위논문, 1995.
- [8] Brian C. Wadell, Transmission Line Design Handbook, Artech House, 1991.
- [9] N. Marcuvitz, Waveguide Handbook, Boston Technical Publishers, 1951.
- [10] G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones, Microwave filters, Impedance Matching Networks, And Coupling Structure, Artech House, 1980.



정 봉 식(Jeong Bongsik)

1987년 경북대학교 전자공학과
공학사

1990년 한국과학기술원 전기및
전자공학과 공학석사

1995년 한국과학기술원 전기및
전자공학과 공학박사

1995년~1997년 LG전자 선임연구원

1997년~현재 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부
교수

*주관심분야 : 전자파해석, 초고주파회로, 안테나.