

초광대역 개방형 스테르브 대역통과 여파기의 설계

Design of an Ultra Wide Band Band-pass Filter with Open-Stubs

윤기철*
(Ki-Cheol Yoon)

강철호**
(Chul-Ho Kang)

홍태의***
(Tae-ui Hong)

이종철****
(Jong-Chul Lee)

요약

본 논문에서는 SIR(Stepped Impedance Resonator) 구조를 이용한 초광대역(UWB:Ultra Wide Band) 개방형 스테르브 대역통과 여파기를 제안한다. 제안한 개방형 스테르브 대역통과 여파기는 초광대역을 구현하기 위해 스테르브 위치에 SIR 구조를 적용하였으며 낮은 삽입손실을 갖는다. 제안된 대역통과 여파기의 대역폭은 중심 주파수 5.8GHz에서 103% 이고, 삽입 및 반사손실은 각각 0.17dB 및 13.1dB이며 전체의 크기는 21.6×17.8mm² 이다.

핵심어 : 초광대역, 개방형 스테르브, SIR, 저삽입 손실, 협대역

Abstract

In this paper, an UWB (Ultra Wide Band) band-pass filter with open stubs using SIR (Stepped Impedance Resonator) structure is presented. The proposed band pass filter (BPF) has SIR structure instead of open stubs for UWB application with low insertion loss. The bandwidth of the proposed BPF is 103 % at the center frequency of 5.8GHz and the insertion and return losses are 0.17dB and 13.1dB, respectively. Also, the entire size of the proposed band-pass filter is 21.6×17.8 mm².

Keywords : UWB, open stub, SIR, low insertion loss, narrow bandwidth

† 본 연구는 2011년도 광운대학교 교내학술연구비로 수행 되었습니다.

* 주저자 : 광운대학교 RFIC 연구센터 교수

** 공저자 : 광운대학교 전자통신공학과 교수

*** 공저자 : 한국세라믹기술원 전략기획본부장(수석연구원)

**** 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

† 논문접수일 : 2013년 09월 12일

† 논문심사일 : 2013년 10월 10일

† 게재확정일 : 2013년 11월 12일

I. 서론

지능형 교통시스템 (ITS: Intelligent Transport System) 은 교통 혼잡성을 효율적으로 해결하기 위해 토목 건설, 도시환경 및 전자통신기술 등을 융합시킨 스마트 (smart) 도로망이라 할 수 있다[1]. 최근 ITS 시장은 효과적인 교통시스템을 실현시킴으로써 기존의 교통체계를 개선시키기 위해 민간 및 정부기관이 협력을 하여 첨단기술을 활용한 시스템 구축을 시도하고 있다[2]. 최첨단 도로 체계를 구축하기 위해서는 유·무선 통합 네트워크(network) 확대가 필수적이며 도로와 차량에서 수집된 동영상의 데이터들은 라우터 (Router)를 통하여 중앙처리 장치로 해당 광대역 채널(channel)을 통해 전송된다. 그러므로 동영상 및 각종 데이터들을 해당 채널 대역을 통해 전송하기 위해서 초광대역(UWB: Ultra wide Band) 대역통과 여파기 등이 사용되고 있으며 이를 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그중에서 참고문헌 [3]은 다중모드 (multi mode) 공진기를 이용한 마이크로스트립(microstrip) 형태의 여파기가 소개되고 있는데, 이는 매우 작은 슬롯(slot)의 수치로 인해 제작하는데 어려움이 따르고 있다. 낮은 특성 임피던스를 갖는 $\lambda_g/4$ 길이의 개방형 마이크로스트립 전송선로를 링(Ring) 공진기에 병렬로 연결하는 구조를 갖는 초광대역 대역통과 여파기는 광대역 특성을 얻기 위해 병렬 스텝브(stub)의 10 Ω 이하에 해당되는 매우 낮은 임피던스가 요구되지만 매우 낮은 임피던스로 인해 스텝브의 크기가 매우 커지므로 실제의 적용하는데 어려움이 따르게 된다[4]. 이러한 단점들을 극복하고자 본 논문은 2단 SIR(Stepped Impedance Resonator)을 이용한 초광대역 $\lambda_g/2$ 개방형 스텝브 대역통과 여파기에 대하여 제안을 한다. 제안된 초광대역 스텝브 대역통과 여파기는 광대역 특성을 얻기 위해 스텝브의 위치에 2단의 SIR을 적용하여 우수한 특성을 얻을 수 있도록 하였고, SIR의 특징은 삽입손실 면에서 매우 우수한 것으로 제시되고 있다[5]. 또한 SIR의 형태를 기본으로 하는 스텝브는 상단부와 하단부로 분리되어 임피던스 차이를 줌으로써 임피던스 값에 관계없이 실제의 크기에 제한받지 않으므로 시스템에 적용하는데 대

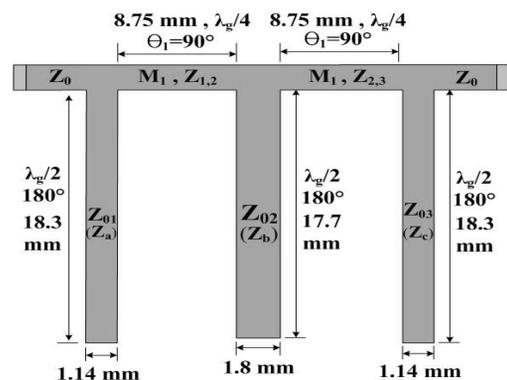
적으로 용이하다.

본 논문의 구성은 본문 II에서 기존의 문헌과 논문에서 제시한 스텝브 대역통과 여파기의 동향 분석에 대해 소개를 하며, 본문 III과 IV에서는 제안된 초광대역 대역통과 여파기에 대해 논의를 한다.

II. $\lambda_g/2$ 개방형 스텝브 대역통과 여파기의 분석

<그림 1>에서 소개되는 스텝브 대역통과 여파기는 참고문헌 [6]에서 명시된 것과 기본적으로 통과 대역 50%의 대역폭을 갖고 동작 하도록 제시되고 있다[6]. 그 이유는 스텝브 값과 스텝브의 실제의 넓이 값이 통과 대역폭에 연관되는데, 만일 통과 대역폭이 50%를 벗어나게 된다면 스텝브의 임피던스 값은 <표 1> 및 <표 2>와 같이 계산되어 스텝브의 실제 넓이가 PCB상에 제작하는데 어려움이 발생 된다[6].

<표 1> 및 <표 2>와 같이 협대역(10%)의 경우, 매우 낮은 임피던스 값으로 인해 스텝브의 넓이가 매우 커지므로 시스템에 적용하는데 어려움이 따르게 된다. 뿐만 아니라 참고문헌 [6]에서 제시되는 일반적인 스텝브 대역통과 여파기의 경우, 대역폭이 20%~60%가 해당 되는 데, 이는 특정 주파수 대역의 신호만을 통과시켜 주어야 하는 시스템의 특성 상



<그림 1> $\lambda_g / 2$ 개방형 스텝브 대역통과 여파기 (가로 전체 길이 : 21.58mm)

<Fig. 1> Conventional bandpass filter with $\lambda_g / 2$ open stubs (Length of horizontal : 21.58 mm)

이 여파기를 시스템에 적용하기는 어렵다[7]. 또한 상기 여파기가 초광대역(100% 이상)으로 넘어가게 된다면 스텐브의 넓이가 PCB상에서 실제의 제작하는데 어려움이 따르게 되어 공정하는데 비용이 초과될 것으로 판단된다.

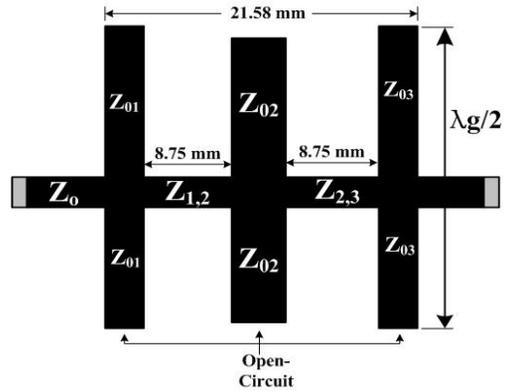
〈표 1〉 대역폭에 관한 스텐브의 임피던스 값의 비교
 〈Table 1〉 Comparison for value of impedance in stub corresponding to bandwidth

| Frequency [GHz] | Bandwidth [%] | Impedance of stub (Z_{oi}) [Ω] | |
|-----------------|---------------|---|----------------------|
| | | short ($\lambda/4$) | open ($\lambda/2$) |
| 5.8 | 10 | 4.2 | 2.2 |
| | 50 | 33 | 81 |
| | 103 | 143 | 128 |

〈표 2〉 대역통과 여파기의 스텐브에 대한 길이 및 넓이
 〈Table 2〉 Length and width corresponding to stubs of the band-pass filter

| Frequency [GHz] | Bandwidth [%] | Dimension of the stub (Z_{oi}) [mm] | | | |
|-----------------|---------------|---|-----------|------------|-----------|
| | | width | | length | |
| | | short stub | open stub | short stub | open stub |
| 5.8 | 10 | 29.2 | 57.1 | 8.2 | 16.3 |
| | 50 | 2.71 | 0.64 | 8.7 | 18.3 |
| | 103 | 0.14 | 0.2 | 9.4 | 18.8 |

또한 100 % 이상을 갖는 초광대역의 경우, 스텐브의 임피던스 값이 매우 커지게 되고, 따라서 스텐브의 넓이가 극히 좁아지므로, 실제 제작하는데 어려움이 따르게 된다. 한편, <표 3>에서는 기존에 제안되었던 스텐브 대역통과 여파기를 협대역과 광대역으로 구현할 수 있는 방법에 대해 소개를 하고 있는데, 협대역 스텐브 대역통과 여파기를 구현하기 위해서는 <그림 2>와 같이 스텐브의 임피던스 값 변화 없이 스텐브의 위치를 이동시킴으로써 Q_e (External Quality Facotr) 값의 변화에 따라 협대역으로 변화시키는 방법에 대하여 제안된 사례가 있다[7].



〈그림 2〉 협대역 개방형 스텐브 대역통과 여파기
 〈Fig. 2〉 Narrow band-pass filter with open stubs

〈표 3〉 협대역 및 광대역 스텐브 대역통과 여파기의 설계 사례

〈Table 3〉 Case designs of the stub band-pass filter for narrow and broad bandwidths

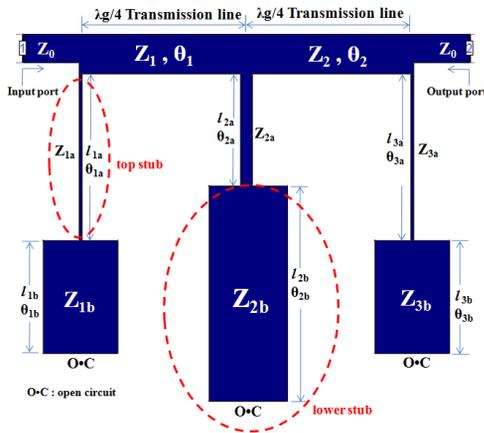
| # | frequency [GHz] | Bandwidth [%] | Method of Design | Characteristic |
|-----|-----------------|---------------|--|------------------|
| [7] | 2.0 | 10 | Variation of Q_e and position of stubs | Narrow Bandwidth |
| [8] | 5.8 | 95 | Z-Transform | Broad Bandwidth |

광대역 스텐브 대역통과 여파기를 구현하기 위해 <그림 3>과 같이 상단 스텐브(l_{1a} , l_{2a} , l_{3a})의 임피던스 값(Z_{1a} , Z_{2a} , Z_{3a})은 고정시킨 후 하단 스텐브(l_{1b} , l_{2b} , l_{3b})의 임피던스 값(Z_{1b} , Z_{2b} , Z_{3b})을 낮게 변화시킴으로써 광대역으로 구현할 수 있는 Z-변환 방법에 대해 제안된 사례가 있었다[8].

이는 주로 3G 통신 시스템에 적용하기에 매우 우수하며 특히, 삽입손실과 반사손실 그리고 광대역 특성 면에서 매우 우수할 뿐만 아니라 차단특성도 매우 우수하다. 그러나 최근 4G LTE 시대 흐름에 맞도록 사용되는 초고속 교통통신 시스템에서는 멀티미디어, 메시지, 음성, 사진, 동영상, 인터넷 등, 이에 대한 데이터들을 처리하기 위해 100% 이상의 대역폭을 갖는 초광대역 대역통과 여파기가 요구되고 있는 추세이다.

III. UWB 개방형 스테르브 대역통과 여파기의 구현 및 제작

현대 초고속 교통통신 단말기에서 고화질 동영상 및 대용량 멀티미디어 데이터를 초광대역으로 전송하기 위해서는 초광대역 대역통과 여파기를 필요로 하고, 낮은 삽입손실과 100%이상의 대역폭이 요구된다. 참고문헌 [8]에서 소개되는 Z-변환을 이용한 스테르브 대역통과 여파기는 대역폭을 증가시키기 위해 하단 스테르브의 넓이를 증가시키는 방법이 소개되고 있다.



〈그림 3〉 UWB 개방형 스테르브 대역통과 여파기
(Fig. 3) UWB band-pass filter with open stubs

그러나 본 논문에서는 참고문헌 [9]에서 소개되는 SIR을 이용하여 초광대역에 맞는 임피던스 값을 설정한 후 스테르브에 적용하는 방법을 제안하여 대역폭을 증가시키도록 하였다. 제안한 스테르브 대역통과 여파기의 장점은 삽입손실이 매우 우수한 특성을 나타낸다.

본 논문에서 제안한 초광대역 개방형 스테르브 대역통과 여파기는 <그림 3>과 같이 λg/4 전송선로와 SIR로 구현된 스테르브들로써 구성된다. 그림에서 Z1과 Z2는 전송선로에 대한 임피던스(impedance)이며 θ1과 θ2는 전송선로에 관한 전기적 길이를 의미한다. UWB의 동작을 위해 스테르브는 <그림 4>와 같이 2단의 개방형 SIR로 구성되며 스테르브를 바라보는

SIR의 입력 임피던스는 식 (1)과 같이 해석 된다[4].



〈그림 4〉 2단의 SIR 구조
(Fig. 4) Structure of the SIR with two stages

$$Z_{in} = jZ_{i,j} \frac{\tan\theta_{ia} + \tan\theta_{ib}}{K - \tan\theta_{ib}\tan\theta_{ia}} \quad (1)$$

$$K = Z_{ia}/Z_{ib}$$

$$\theta_{ia} = 2\pi l_{ia}/\lambda_g$$

$$\theta_{ib} = 2\pi l_{ib}/\lambda_g$$

위에서 언급되는 식의 Z_{ij} 에서 $i=1\sim3$, 그리고 $j=a, b$ 이고, 여기서 Z_{ia} 와 Z_{ib} 는 Z_{ij} 에 해당되며 이는 SIR 스테르브의 임피던스에 속하게 된다. 스테르브의 전기적 길이의 θ_{ia}, θ_{ib} 에서 $i=1\sim3$ 에 해당되며, 물리적 길이의 l_{ia}, l_{ib} 에서 $i=1\sim3$ 에 해당된다. 이때, 스테르브의 공진조건에서 입력 어드미턴스(admittance) $Y_{in}=0$ 이므로, $K=\tan\theta_{ia}\cdot\tan\theta_{ib}$ 로 취할 수 있다[5]. SIR 스테르브의 입력 임피던스 Z_{in} 와 각각의 스테르브 임피던스 (Z_{ia} 및 Z_{ib})의 정합 조건은 식 (2)와 같으며 결국 $Z_{ia}/Z_{ib}=Z_{in}$ 이 된다.

$$Z_{ia}/Z_{ib} = \frac{Z_{ia}Z_{ib}}{Z_{ia} + Z_{ib}} = Z_{in} \quad (2)$$

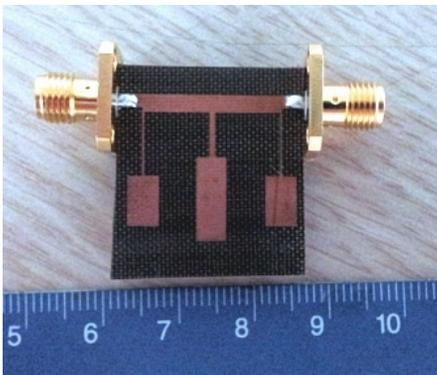
<표 4>는 <그림 3>에서 보여주고 있는 여파기의 임피던스와 크기 정보에 대해 제시되고 있다.

제안된 여파기의 설계를 위한 초기과정에서는 등방성(symmetric) 구조의 0.1dB에 해당하는 등리플(Chebyshev equal ripple) 형태를 기본으로 하는 저역통과 기본형(low-pass prototype)에 따라 구현을 하도록 하였는데[6], 이를 위해 IE3D tools(ver. 12.0)을 이용하여 설계를 하였고 제작을 위해 <그림 5>와 같이

유전율 2.54 그리고 기판 두께 0.54mm를 갖는 테프론(teflon) 기판을 적용하여 wet-etching을 수행 하였으며 여파기의 전체 크기는 21.6×17.8mm²이다.

〈표 4〉 제안된 여파기의 임피던스 및 크기
 〈Table 4〉 Size and impedance of the proposed filter

| Impedance, Z [Ω] | | | | | Dimension, l [mm] | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Z _{1a} , Z _{3a} | Z _{2a} | Z _{1a} , Z _{3a} | Z _{2a} | Z ₁ , Z ₂ | l _{1a} , l _{3a} | l _{2a} | l _{1b} , l _{3b} | l _{2b} | Θ ₁ , Θ ₂ |
| 142, | 81 | 25 | 26 | 33 | 8.1 | 5.76 | 6.2 | 10.4 | 8.43 |

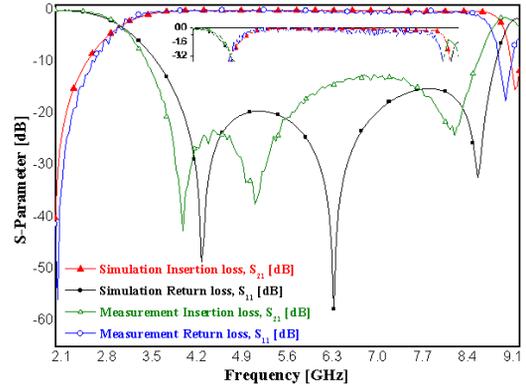


〈그림 5〉 제작된 UWB 스텐브 대역통과 여파기의 사진
 〈Fig 5〉 Photograph of the new UWB stub band-pass filter

IV. 실험결과 및 비교 고찰

제안된 초광대역 개방형 스텐브 대역통과 여파기의 실험결과는 <그림 6>에 제시되었고, 측정을 위해 HP-8510C 회로망 분석기(Vector Network Analyzer)를 사용하였으며 <표 5>에 실험결과 값들을 명시하였다.

제안된 초광대역 스텐브 대역통과여파기는 비교적 낮은 삽입손실을 갖고 있으며 장점은 SIR구조와 그에 해당되는 식을 이용하여 광대역 특성을 간편하게 얻을 수 있다.



〈그림 6〉 UWB 개방형 스텐브 대역통과 여파기의 실험 결과
 〈Fig 6〉 Experimental results of the UWB band-pass filter with open stubs

〈Fig 6〉 Experimental results of the UWB band-pass filter with open stubs

〈표 5〉 제안된 대역통과 여파기의 실험결과
 〈Table 5〉 Experimental results of the proposed band-pass filter

| Center Frequency [GHz] | Bandwidth [%] | Simulation Result | | Measurement Result | |
|------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | S ₂₁ [dB] | S ₁₁ [dB] | S ₂₁ [dB] | S ₁₁ [dB] |
| 5.8 | 103 | 0.12 | 15.2 | 0.17 | 13.1 |

하지만 <그림 6>에서 보여주고 있는 측정결과와 S11에서 두 번째 극(pole)이 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 약간 상이한 것이 뚜렷하게 보여주고 있다. 이는 여파기의 제작 과정과 측정 장비 내부의 오차로 인한 것으로 사료된다.

참고문헌 [6]에서 제시되는 스텐브 대역통과 여파기에서 협대역을 구현하는 방법과 광대역을 구현하는 방법은 참고문헌[7,8] 등의 논문들을 참고 할 수 있고, 광대역 보다 더 넓은 초광대역(UWB)을 구현하기 위한 방법은 본 논문에서 제안된 방법으로 설계가 가능할 것으로 기대한다. <표 6>은 지금까지 발표되었던 초광대역 대역통과 여파기의 논문들 중에서 낮은 삽입손실과 우수한 반사손실 그리고 본 논문에서 제시한 여파기에 대한 실험 결과의 비교에 대해 소개를 하고 있다.

〈표 6〉 여파기의 삽입손실 및 반사손실의 비교
 〈Table 6〉 Comparison for insertion and return losses of the BPFs

| ref. [#] | Center Frequency [GHz] | Bandwidth [%] | S ₂₁ [dB] | S ₁₁ [dB] |
|-----------|------------------------|---------------|----------------------|----------------------|
| This Work | 5.8 | 103 | 0.17 | 13.1 |
| [5] | 8.3 | 90 | 0.39 | 12.4 |
| [10] | 7.5 | 110 | 2.0 | 12.0 |
| [11] | 7.42 | 108 | 0.9 | 13.0 |

V. 결 론

본 논문에서는 SIR (Stepped Impedance Resonator) 을 이용한 초광대역 (UWB:Ultra Wide Band) 개방형 스텝드 대역통과 여파기에 대해 고찰 하였다.

제안한 스텝드 대역통과 여파기는 초광대역으로 구현하기 위해 스텝드 측에 2단의 SIR을 적용 하였고, 스텝드의 상단부와 하단부를 각각 나누어 임피던스 비를 달리 하도록 설계를 하였다.

지금까지 사용되었던 스텝드 대역통과 여파기를 광대역으로 구현하기 위해서는 임피던스 값의 문제로 인해 실제 구현하는데 매우 어려움이 따르게 되었는데 이를 극복하고자 본 연구에서는 스텝드에 SIR을 적용하여 여파기의 주파수 응답을 초광대역으로 구현할 수 있도록 실현 시켰다.

제안한 대역통과 여파기는 적용된 SIR 스텝드에 집적 급전 방식으로 인해 낮은 삽입손실을 갖고 있으며, 실험결과에서 삽입 및 반사손실은 각각 0.17 dB 및 13.1 dB이고 대역폭은 103% 그리고 중심 주파수는 5.8 GHz로써 ITS(Intelligent Transport System) 분야에 적용이 가능하도록 설계를 하였다.

제안한 초광대역 개방형 스텝드 대역통과 여파기는 평면 구조이므로 추후 IPD (Integrated Passive Device) 환경에 맞도록 재설계를 하여 공정을 하게 된다면 ITS 분야의 영상 및 방송 무선통신용 시스템에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] H. J. Lee, A study on ITS in domestic and advanced countries, *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 14, no. 2, pp.58-68, Apr. 1999.
- [2] H. D. Moon, Y. C. Lee, and D. I. Lee, "A study on worldwide & korea market trends of intelligent transportation system," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 17, no. 6, pp.48-58, Dec. 2002.
- [3] L. Zhu, S. Sun, and W. Menzel, "Ultra-wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator," *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, vol. 15, no. 11, pp.796-798, Nov. 2005.
- [4] H. Ishida and K. Araki, "Design and analysis of UWB bandpass filter with ring filter," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp.1307-1310, June 2004.
- [5] S. H. Shin, C. H. Choi, and K. S. Jun, "The implementation of UWB bandpass filter using SIR," *J. Korean Ins. of Communications and Information Sciences*, vol. 35, no.12, pp.1214-1218, Dec. 2010.
- [6] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, pp.15-153, John Wiley & Sons, 2001.
- [7] H. Nam, T. S. Yun, K. C. Yoon, and J. C. Lee, "Design of compact bandpass filter with $\lambda_g/4$ short stubs using transmission zero," *Proc. IEEE European Microwave Conf.*, pp.1252-1255, Sept. 2006.
- [8] D. W. Kim, Y. G. Choi, and B. K. Kim, "Design of the new compact broad band-pass filter using Z-transform technique," *Proc. IEEE Asia Pacific Microwave Conf.*, pp. 1-4, Nov. 2008.
- [9] M. Makimoto and S. Yamashita, *Microwave resonators and filters for wireless communication and theory, design and application*, pp. 11-18, Springer 2000.

[10] J. Liu, K. Song, T. Pan, J. H. Zha, Y. Fan, and C. Zhong, "Ultra-wideband (UWB) bandpass filter with inductance-loaded Y-shaped multiple-mode resonator," *Int. Workshop on Microwave and Millimeter wave Circuits and System Technology (MMWCST)*, pp.1-4, Apr. 2012.

[11] W. Tang, S. Yang, X. Wang, C. Wang, and Y. L. Chow, "A novel UWB bandpass filter using highpass and lowpass filters," *Proc. Int. High Speed Intelligent Communication Forum (HSIC)*, pp.1-2, May 2012.

저자소개



윤 기 철 (Yoon, Ki-Cheol)

2007년 2월 : 광운대학교 전자정보공과대학 전파공학과 (공학석사)
 2011년 8월 : 광운대학교 전자정보공과대학 전파공학과 (공학박사)
 2011년 9월 ~ 2012년 1월 : 전자부품연구원 에너지디스플레이 연구본부
 2012년 2월 ~ 2013년 2월 : 한국과학기술원 전자정보연구소
 2013년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 RFIC 연구센터(전파공학과) 교수
 e-mail : kcyoon98@kw.ac.kr
 연락처 : 02-940-5203



강 철 호 (Kang, Chul-Ho)

1975년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1988년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1977년 3월 ~ 1982년 2월 : 국방과학연구소 연구원
 1983년 3월 ~ 2013년 현재 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
 e-mail : chkang5136@naver.com
 연락처 : 02-940-5136



홍 태 의 (Hong, Tae-Ui)

2005년 5월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원 수석연구원 전략기획본부장
 2004년 3월 ~ 2005년 6월 : 경운대학교 멀티미디어공학과 객원교수
 2001년 8월 ~ 2004년 1월 : 요업기술원 미래전략사업부장, 전자부품연구원 연구기획부장
 1993년 2월 ~ 2001년 8월 : 전자부품연구원 정보통신개발사업팀장
 1986년 8월 ~ 1993년 1월 : 포스콘 기술연구소
 2010년 2월 : 광운대학교 전파공학과(공학박사)
 1987년 8월 : 인천대학교 전자공학과(공학석사)
 e-mail : hongtu@kicet.re.kr
 연락처 : 02-3282-7744



이 종 철 (Lee, Jong-Chul)

1996년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수
 1994년 4월 ~ 1996년 02월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원
 1994년 5월 : Texas A&M Univ., Dept. of Electrical Engineering (공학박사)
 1989년 12월 : Arizona State Univ., Dept. of Electrical Engineering (공학석사)
 e-mail : jclee@kw.ac.kr
 연락처 : 02-940-5203