

능동 인덕터를 이용한 주파수 가변형 대역통과 필터 설계

이석진¹, 최석우^{2*}

¹OCl, ²전북대학교 전기공학과

Frequency-Tunable Bandpass Filter Design Using Active Inductor

Seok-Jin Lee¹ and Seok-Woo Choi^{2*}

¹OCl, ²Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University

요 약 최근 이동통신 시장의 급속한 증가에 따라 단말기 설계는 다표준 방식으로 발전하고 있다. 본 논문에서는 다표준 이동통신 시스템에 적용할 수 있는 주파수 가변형 능동 RC 대역통과 필터를 능동 인덕터를 사용하여 설계하였다. 기존의 대역통과 필터 설계법에서는 저지대역의 감쇠 특성과 통과대역의 주파수 선택도를 향상시키기 위하여 필터의 차수를 높게 하거나 극점 Q를 증가시키는 설계법을 사용한다. 본 논문에서는 극점 Q가 높은 능동 인덕터로 대역통과 필터를 설계하여 주파수 특성이 향상되었다. 또한 설계된 대역통과 필터는 튜닝 회로를 이용하여 필터의 중심주파수와 이득을 간단히 조절할 수 있도록 제안하였다. 설계된 능동 RC 대역통과 필터 특성은 TSMC 0.18 μ m 공정 파라미터를 이용하여 해석하였다. 시뮬레이션 결과, Q=20.5를 갖는 능동 인덕터를 이용한 필터는 1.86GHz 중심주파수에서 90MHz의 대역폭을 갖고, 튜닝 회로의 커패시터 값으로 중심주파수를 1.86~2.38GHz 범위까지 튜닝이 가능하여 다표준 무선통신 시스템에 적용할 수 있다.

Abstract The fast-growing market in wireless communications has led to the development of multi-standard mobile terminals. In this paper, a frequency-tunable active RC bandpass filter for multi-standards wireless communication system is designed using an active inductor. The conventional bandpass filter design methods employ the high order filter or high quality factor Q to improve the stopband attenuation characteristics and frequency selectivity of the passband. The proposed bandpass filter based on the high Q active inductor has an improved frequency characteristics. The center frequency and gain of the designed bandpass filter is tuned by employing the tuning circuit. We have performed the simulation using TSMC 0.18 μ m process parameter to analyze the characteristics of the designed active RC bandpass filter. The bandpass filter with Q=20.5 has 90MHz half power bandwidth at the center frequency of 1.86GHz. Moreover, the center frequency of the proposed bandpass filter can be tuned between 1.86~2.38GHz for the multi-standards wireless communication system using the capacitor of the tuning circuit.

Key Words : Active inductor, Bandpass filter, Frequency-tunable, Multi-standards, Selectivity

1. 서론

무선통신 단말기 시스템의 수신단에서는 주파수 선택 기능을 하는 필터로 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터를 사용하고 있다. SAW 필터는 우수한 필터 특성으로 인해 일반적으로 70~160MHz 대역의 IF(Intermediate

Frequency) 필터와 800~2,000MHz 대역의 RF(Radio Frequency) 필터로 활용되고 있다. 그러나 SAW 필터는 물질 구조에 의존하는 필터이기 때문에 집적화가 어렵고 가격이 높다는 단점이 있다. 또한 기존의 능동 RC 필터는 연산 증폭기와 트랜스컨덕터의 제한적인 동작 주파수와 집적화시킬 때 발생하는 CMOS의 기생성분 때문에

본 논문은 전북대학교 국내(외) 연구교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Seok-Woo Choi(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-3698 email: swchoi@jbnu.ac.kr

Received March 7, 2013

Revised (1st June 16, 2013, 2nd July 10, 2013)

Accepted July 11, 2013

높은 주파수에서 동작하는 필터를 설계하기 어렵고, RF 수동 필터는 도전체 손실과 기판에서의 손실로 인해 큰 삽입 손실을 갖는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 능동 인덕터를 이용하여 대역통과 필터를 설계하는데 이는 적은 삽입 손실과 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 회로 적용 시 집적화가 가능하여 소형화가 가능하고, 원하는 주파수 대역에서 부정 저항 특성을 갖게 하여 삽입 손실이 아닌 이득을 얻을 수 있는 장점이 있다[1-3].

본 논문에서는 무선통신 시스템의 수신단에 사용되고 있는 RF 대역용 SAW 필터를 집적화할 수 있도록 능동 인덕터를 이용하여 CMOS 능동 RC 대역통과 필터를 설계하였다.

일반적으로 대역통과 필터의 저지대역 감쇠 특성과 중심주파수 대역폭을 좁게 하여 선택도(Selectivity)를 향상시키는 설계법은 필터의 차수를 높게 하거나 Q 지수(Quality factor)를 증가시키는 설계법 등을 이용한다.

본 논문에서는 기존의 능동 인덕터의 Q 지수를 개선한 능동 인덕터를 이용하여 대역통과 필터의 중심주파수 선택도와 저지대역 감쇠 특성이 향상된 무선통신 시스템용 RF 대역통과 필터를 설계하였다. 또한 튜닝 회로를 이용하여 대역통과 필터의 중심주파수를 가변할 수 있도록 하였다. 설계된 능동 RC 대역통과 필터는 TSMC 0.18 μ m 공정 파라미터로 시뮬레이션하여 주파수 특성을 분석하였다.

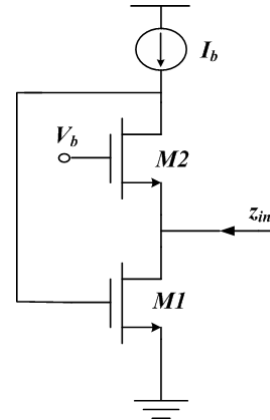
2. 대역통과 필터용 능동 인덕터 설계

연산증폭기를 이용한 기존의 능동 RC 필터는 RF 대역용 고주파수 필터를 설계하기 어렵고, RF 수동 필터는 큰 삽입 손실을 갖는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 능동 인덕터를 이용하여 능동 RC 대역통과 필터를 설계하는 방법이 연구되고 있다[4-6].

일반적으로 대역통과 필터의 특성을 결정하는 중요한 요소는 통과대역의 대역폭과 저지대역 감쇠 특성이다. 필터의 대역폭을 좁게 하면 원하는 주파수 대역 신호만 선택하여 통과시킬 수 있다. 대역통과 필터의 특성을 개선하기 위한 가장 일반적인 방법은 필터의 차수를 높게하는 설계법과 대역통과 필터의 대역폭 B는 $B = 1/Q$ 이므로 Q 지수를 증가시켜 필터의 대역폭을 좁게하여 선택도를 향상시키는 설계법이 있다.[7] 차수를 높게하는 설계법은 차수의 증가에 따라서 소자 수가 증가하여 전력소모가 증가하고, 또한 집적회로로 구현하는 경우 칩 면적이 증가하는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 대역통과 필터의 선택도와 저지대역 특성을 개선하기 위하여 필터의 차수 증가없이 고주파수 대역통과 필터 설계가 가능하도록 높은 Q 지수를 갖는 능동 인덕터를 이용하였다.

접지 능동 인덕터는 능동 인덕터를 구현하는 가장 일반적인 구조이다. 접지 능동 인덕터는 Fig. 1과 같이 두 개의 트랜지스터로 구성되며, 간단한 자이레이터(Gyrator)-C 구조를 갖는다.



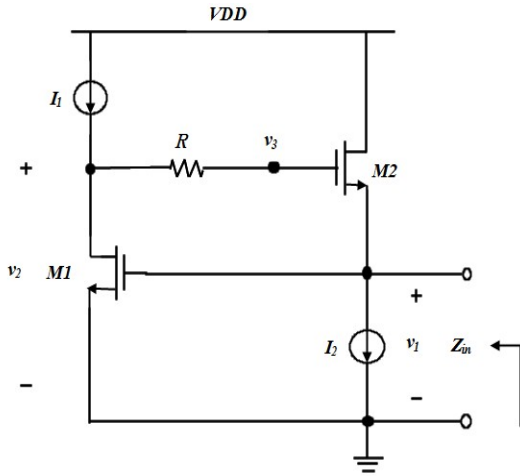
[Fig. 1] A typical grounded active inductor

리액턴스 성분은 M1과 M2 트랜지스터의 기생 커패시터로 인하여 발생하게 된다. Fig. 1에서 모의된 인덕턴스 값과 Q 지수는 소신호 해석을 이용하여 식 (1), (2)와 같이 구할 수 있다. 그러나 이러한 접지 능동 인덕터는 높은 인덕턴스 값과 높은 Q 지수를 구현하기 어렵다는 단점이 있다[5].

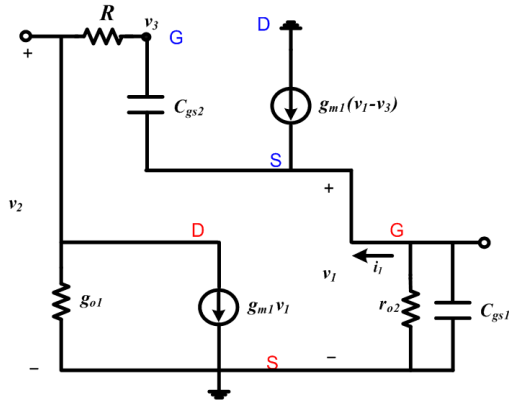
$$L = \frac{C_{gs1}}{g_{m1} g_{m2}} \tag{1}$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m2} C_{gs1}}{g_{m1} C_{gs2}}} \tag{2}$$

Fig. 1의 접지 능동 인덕터의 Q 지수를 증가시키기 위하여 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 M2의 게이트에 궤환(Feedback) 저항을 이용하여 일반적인 접지 능동 인덕터에 비해 높은 Q 지수를 구현 하였다. 능동 인덕터의 특성 해석을 위한 소신호 등가 회로는 Fig. 3과 같다.



[Fig. 2] The active inductor with high Q



[Fig. 3] Small signal equivalent circuit of the active inductor

이 때 g_{o1} 은 트랜지스터의 게이트와 드레인 사이의 출력 컨덕턴스이고, 일반적인 능동 인덕터와 동일한 방법의 소신호 해석을 위해 MOS 트랜지스터가 saturation 영역에서 동작하면 $C_{gs} \gg C_{gd}$ 이므로 게이트와 드레인의 커패시턴스 C_{gd} 는 무시하였다[5].

Fig. 3의 노드 v_1 , v_2 , v_3 에서 KCL을 적용하면 식 (3)~(5)와 같고, 이를 이용하여 소신호 등가 회로의 노드 v_1 에서 바라본 입력 임피던스 Z_{in} 은 식 (6)과 같다.

$$i_1 = -g_{m2}(v_3 - v_1) + sC_{gs2}(v_1 - v_3) \quad (3)$$

$$0 = g_{o1}v_2 + g_{m1}v_1 + \frac{v_2 - v_3}{R} \quad (4)$$

$$0 = sC_{gs2} \left(v_3 - v_1 + \frac{v_3 - v_2}{R} \right) \quad (5)$$

$$Z_{in} = \frac{v_1}{i_1} \approx \frac{1}{\frac{1}{(1+Rg_{o1})g_{m1}} + \frac{g_{o1}}{sC_{gs2}g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}g_{m1}} + \frac{1}{sC_{gs2}(1+Rg_{o1})g_{m2}g_{m1}}} \quad (6)$$

입력 임피던스 Z_{in} 과 Fig. 4의 능동 인덕터 RLC 등가 회로의 소자 등을 비교하여 구한 인덕턴스 값과 Q 지수는 식 (7), (8)과 같다.

$$L = \frac{C_{gs2}(1+Rg_{o1})}{g_{m2}g_{m1}} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m2}C_{gs1}(1+Rg_{o1})}{g_{m1}C_{gs2}}} \quad (8)$$

궤환 저항 R이 삽입된 능동 인덕터는 소신호 해석 결과, 식 (7)과 (8)의 분자항에 $(1+Rg_{o1})$ 이 곱해져 Fig. 1에서 구한 식 (1), (2)와 비교하여 인덕턴스 값과 인덕터의 Q 지수가 증가하였다. 따라서 Q 지수의 증가로 대역통과 필터의 선택도를 개선시킬 수 있다.

3. 능동 인덕터를 이용한 대역통과 필터 설계

무선통신 시스템용 능동 RC 대역통과 필터를 Q 지수가 개선된 능동 인덕터를 이용하여 설계하였다. 특히 논문에서는 튜닝 회로를 이용하여 대역통과 필터의 중심 주파수와 이득을 쉽게 튜닝할 수 있도록 필터를 설계한다.

이와 같이 필터의 중심주파수를 가변하면 집적회로 제작과정에서 발생하는 오차를 보정할 수 있고, 서로 다른 중심주파수를 갖는 다표준 무선통신 방식의 필터 설계에도 적용할 수 있다.

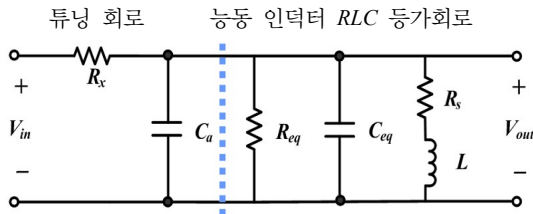
Table 1은 무선통신 시스템 수신단의 대역통과 필터 설계명세조건이고, 이를 만족하는 2차 바터워스 대역통과 함수 필터는 식 (9)와 같다[8].

$$H(s) = \frac{(1.89 \times 10^{10})s}{s^2 + (1.89 \times 10^{10})s + (1.17 \times 10^{10})^2} \quad (9)$$

[Table 1] Design specification of the 1.86GHz bandpass filter

	Design Specification
Filter function	2 nd order Butterworth function
Center Frequency	1.86GHz
Passband loss	≤ 3dB

Fig. 4는 식 (9)의 2차 대역통과 필터를 능동 인덕터의 수동 RLC 등가회로와 중심주파수 및 이득을 튜닝할 수 있는 튜닝 회로와 함께 구현한 것이다. Fig. 4의 대역통과 필터 전압 전달함수는 식 (10)과 같고, 중심주파수와 중심주파수에서의 이득은 식 (11), (12)와 같다.



[Fig. 4] Proposed 2nd order active RC bandpass filter

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{C_a R_s} s}{s^2 + \left(\frac{1}{C_a R_x} + \frac{R_s}{L} + \frac{1}{C_a R_{eq}} \right) s + \left(\frac{1}{L C_a} + \frac{R_s}{R_x L C_a} \right)} \quad (10)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{(C_{eq} + C_a)L}} \quad (11)$$

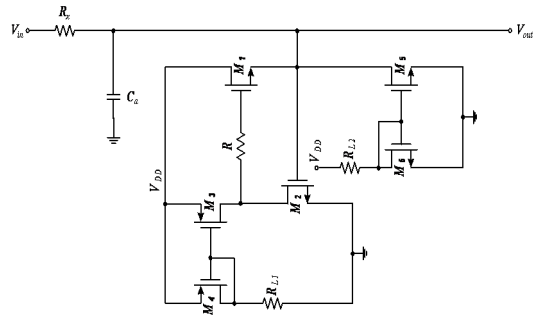
$$A_o = \frac{R_s \parallel R_{eq}}{R_x + (R_s \parallel R_{eq})} \quad (12)$$

기존의 접지 능동 인덕터를 이용하여 구현된 RF 대역의 대역통과 필터는 능동 인덕터의 함수를 이용하여 대역통과 필터를 구현하였다[9-10]. 그리고 접지 능동 인덕터의 전류량을 높이거나 트랜지스터의 전원과는 별도로 능동 인덕터의 M2 트랜지스터의 제어전압(V_i) 조절을 통하여 중심주파수와 능동 인덕터의 Q 지수를 높이고자 하였다.

그러나 본 논문에서 제안한 Fig. 4와 같은 대역통과 필터는 C_a가 C_{eq}를 무시할 수 있을 정도로 큰 값을 가지면 설계된 능동 인덕터의 복잡한 소신호 해석을 다시 하지 않고 C_a와 R_x값의 조절을 통해 대역통과 필터의 중심주

파수와 이득을 간단히 조절할 수 있는 장점이 있다.

설계된 능동 인덕터를 이용한 무선통신 시스템 수신단의 2차 대역통과 필터를 CMOS로 구현한 회로는 Fig. 5와 같다. 이 회로에서 트랜지스터 M1과 M2는 능동 인덕터이고, M3~M6은 능동 인덕터에 전류 공급을 위한 바이어스 회로를 구현하였으며 R_{L1}과 R_{L2}는 바이어스 회로의 부하 저항이다.



[Fig. 5] Circuit of designed bandpass filter

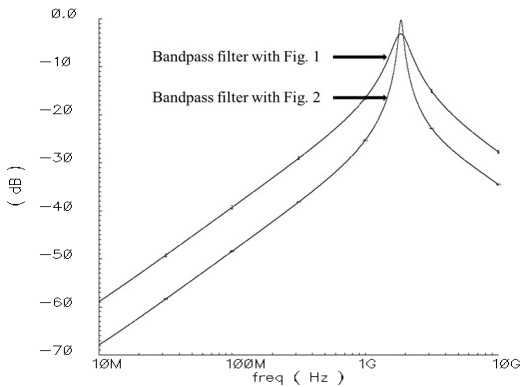
4. 시뮬레이션 및 고찰

Fig. 5의 회로는 TSMC 0.18μm CMOS 공정 파라미터를 이용하여 BSIM3v3의 트랜지스터 소신호 해석 레벨로 시뮬레이션 하였으며, 각 트랜지스터의 채널 폭과 길이는 Table 2와 같다.

Fig. 6은 본 논문에서 높은 Q 지수를 갖는 Fig. 2의 능동 인덕터와 Fig. 1의 접지 능동 인덕터를 이용하여 대역통과 필터를 설계하였을 때의 크기 특성을 시뮬레이션한 결과이다. Table 3과 같이 제안된 2차 능동 RC 대역통과 필터는 Q 지수가 크게 증가함에 따라 3dB 대역폭이 500MHz에서 90MHz로 감소하여 대역통과 필터의 중요한 특성인 주파수 선택도가 향상됨을 확인할 수 있다.

[Table 2] Channel length and width of the designed bandpass filter

Tr.	W [μm]	L [μm]	Type
M1	3.6	0.18	NMOS
M2	3.6	0.18	NMOS
M3	4.18	0.18	PMOS
M4	1.8	0.18	PMOS
M5	3.56	0.18	NMOS
M6	1.8	0.18	NMOS

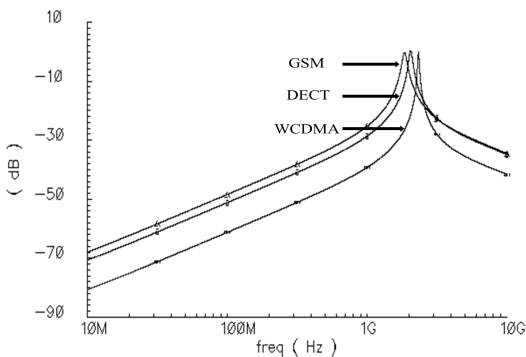


[Fig. 6] Compared magnitude characteristics of the designed bandpass filter

[Table 3] Comparison of the bandpass filter simulation

	Proposed filter (Filter with Fig. 2)	Filter with Fig. 1
Center frequency	1.86GHz	1.86GHz
Bandwidth(3dB)	90MHz	500MHz
Quality factor	20.5	3.72

또한 튜닝 회로의 C_a 를 이용하여 설계된 대역통과 필터의 주파수 튜닝 범위를 확인한 결과 Fig. 7과 같이 1.86~2.38GHz의 범위에서 중심주파수를 튜닝할 수 있어 단일 대역통과 필터로도 C_a 를 가변하여 GSM/DECT/WCDMA와 같은 무선통신 단말기의 수신단 설계에 활용할 수 있다. 주파수 튜닝과 함께 튜닝 회로의 R_x 값을 조절하여 필터 이득이 0dB가 되도록 한 튜닝 회로의 C_a 와 R_x 값은 Table 4와 같다.



[Fig. 7] Center frequency and gain tuning of the designed bandpass filter

[Table 4] Element value of the tuning circuit at the center frequency

Center frequency[GHz]	C_a [pF]	R_x [Ω]
1.86	10	110
2.06	7.25	175
2.38	4.5	700

5. 결론

이동통신 단말기 수신단에 사용되는 RF용 SAW 필터를 CMOS 공정기술로 one chip화하는 설계법 중 본 논문에서는 능동 RC 필터를 능동 인덕터로 설계하여 집적화가 가능하도록 하였다.

특히 대역통과 필터의 주파수 특성을 개선하기 위하여 높은 Q 지수를 갖는 능동 인덕터와 이를 이용한 대역통과 필터를 설계한 결과, 주파수 대역폭과 저지대역 감쇠 특성이 향상되었다.

또한 설계된 대역통과 필터를 다른 이동통신 방식에 적용하는 경우에는 필터의 중심주파수를 튜닝할 필요가 있다. 기존의 RF 대역통과 필터는 트랜지스터의 전원 전압과 별도의 제어 전압이 필요하지만, 본 논문에서는 간단한 튜닝 회로를 이용하여 대역통과 필터의 중심주파수와 이득을 쉽게 조절할 수 있게 설계하였다.

제안된 대역통과 필터를 TSMC 0.18 μ m CMOS 공정기술로 시뮬레이션 한 결과 중심주파수는 1.86~2.38GHz 범위에서 튜닝이 가능하여 다표준 무선통신 단말기의 수신단 설계에 활용할 수 있다.

References

- [1] K. W. Kobayashi and A. K. Oki, "A Novel Heterojunction Bipolar Transistor VCO Using an Active Tunable Inductance," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 4, No. 7, July 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/75.298251>
- [2] Hitoshi H., Masahiro M., Yohtaro U., and Takatomo E., "A High-Q Broad-Band Active Inductor and Its Application to a Low-Loss Analog Phase Shifter," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 44, pp. 2369-2374, Dec. 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/22.554562>
- [3] Ler Chun Lee, Abu Khari bin A'ain, and A. V.

- Kordesch, "A 2.4-GHz CMOS Tunable Image-Rejection Low-Noise Amplifier with Active Inductor," *IEEE APCCAS 2006 Circuits and Systems*, Vol. 10, pp. 1679-1682, Dec. 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342107>
- [4] S. V. Krishnamurthy, K. El-Sankary, and E. El-Masry, "Noise-Cancelling CMOS Active Inductor and Its Application in RF Band-Pass Filter Design," *International Journal of Microwave Science and Technology*. pp. 1-8, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/980957>
- [5] Y. Wu, X. Ding, and M. Ismail, "RF Bandpass Filter Design Based on CMOS Active Inductors," *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Vol. 50, pp. 942-949, Dec. 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCSII.2003.820235>
- [6] M. Wu, P. Yen, C. Chou, and J. Yang, "A Radio Frequency CMOS Band Pass Amplifier Using High-Q Active Inductor Loads with Binary Code for Multi-Band Selecting," *Proc. of the 6th WSEAS International Conf.*, pp. 138-143, Apr. 2007.
- [7] R. Schaumann, M. S. Ghauri, and K. R. Laker, *Design of Analog Filters*, Prentice- Hall, Inc. 1990.
- [8] Anemogiannis, K. and Russer, P., "SAW Microstrip Front-end for Mobile Communication Systems in the GHz Range," *IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, Vol. 3, pp. 973-976, June 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSYM.1991.147172>
- [9] M. Ismail, R. Wassenaar, and W. Morrison, "A High-speed Continuous-time Bandpass VHF Filter in MOS Technology," *Proc. of IEEE Int. Symp. Circuit and system*, pp. 1761-1764, May 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.1991.176249>
- [10] D. Li and Y. Tsvividis, "A 1.9 GHz Si Active LC Filter with On-chip Automatic Tuning," *Proc. of IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, pp. 369-372, Feb. 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSCC.2001.912677>

이 석 진(Seok-Jin Lee)

[정회원]



- 2006년 2월 : 전북대학교 전기전자공학부 (공학사)
- 2008년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2008년 4월 ~ 현재 : OCI(주) 군산공장 공무센터 계기팀

<관심분야>
아날로그 집적회로 설계

최 석 우(Seok-Woo Choi)

[정회원]



- 1988년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1994년 8월 : 전북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 전북대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
회로 및 시스템, 아날로그 집적회로 설계