

스위칭 트랜지스터를 이용하여 2.4/3.5/5.2 GHz에서 동작하는 다중 대역 저잡음 증폭기 설계

Design of Multi-Band Low Noise Amplifier Using Switching Transistors for 2.4/3.5/5.2 GHz Band

안 영 빈 · 정 지 채*

Youngbin Ahn · Jichai Jeong*

요 약

본 논문에서는 2.4, 3.5, 5.2 GHz의 대역에 맞추어 스위칭 동작을 하는 다중 대역 저잡음 증폭기를 CMOS 0.18 um 공정을 이용하여 설계하였다. 제안된 회로는 스위칭 트랜지스터를 이용하여 입력단에서는 트랜스 컨덕턴스, 게이트-소스 캐패시턴스를 조정하고, 출력단에서는 캐패시턴스를 조정하는 방식으로 다중 대역 입출력 정합을 이루었다. 제안된 저잡음 증폭기는 각 스위칭 트랜지스터의 동작 상태에 따라 2.4, 3.5, 5.2 GHz 대역에서 제안된 회로는 입출력단에서 각각 14.2, 12, 11 dB의 이득과 3, 2.9, 2.8의 잡음 지수 특성을 갖는다. 다중 대역 저잡음 증폭기는 1.8 V의 공급 전압에 대해서 4.2~5.4 mW의 전력을 소비한다.

Abstract

This paper presents a multi-band low noise amplifier(LNA) with switching operation for 2.4, 3.5 and 5.2 GHz bands using CMOS 0.18 um technology. The proposed circuit uses switching transistors to achieve the input and output matching for multi-band. By using the switching transistors, we can adjust the transconductance, gate inductance and gate-source capacitance at input stage and total output capacitance at output stage. The proposed LNA exhibits gain of 14.2, 12 and 11 dB and noise figure(NF) of 3, 2.9 and 2.8 dB for 2.4, 3.5 and 5.2 GHz, respectively.

Key words : LNA, Multi-Band, Switching Transistor, In/Output Matching

I. 서 론

최근 무선 통신 산업의 발달로 다양한 통신 표준이 확립되면서, 하나의 단말기에서 여러 대역을 처리할 수 있는 다중 대역 송수신기의 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 따라, 수신기의 초단에서 하나의 저잡음 증폭기로 여러 주파수를 처리하기 위한 기술

이 관심을 받고 있으며, 이에 따라 많은 연구가 진행되고 있다.

다양한 주파수를 처리하기 위한 기술로, 초기에는 두 개 이상의 저잡음 증폭기를 병렬로 연결하는 방식이 제안되었다^[1]. 이 방식은 각각의 목표 주파수에 대해 좋은 성능을 갖지만, 칩 크기가 커지면서 집적을 하는데 많은 비용이 들어가게 된다. 다중 대역을

「This research was supported in part by Brain Korea 21 project in 2010, WCU(World Class University) program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology(R31-10008), and IDEC(IC Design Education Center) for CAD tools.」

고려대학교 전자통신공학과(Department of Computer and Radio Communication Engineering, Korea University)

*고려대학교 뇌공학부(Department of Brain and Cognitive Engineering, Korea University)

· 논문 번호 : 20101126-01S

· 교신저자 : 정지채(e-mail : jcj@korea.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 1월 31일

처리하기 위한 또 다른 기술로, 여러 신호를 동시에 처리할 수 있는 광대역 저잡음 증폭기^[2]가 제안되기도 하였으나, 넓은 주파수 대역에 대해 좋은 잡음 특성을 갖기가 어렵다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 여러 주파수에 맞추어 스위칭 동작을 하며, 각각의 주파수에 최적화된 성능을 갖도록 하는 다중 대역 저잡음 증폭기가 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 스위칭 동작이 가능한 인덕터를 입력단에 추가하는 방법이나 스위치를 이용하여 입력단의 트랜지스터에 추가적인 트랜지스터를 병렬로 연결함으로써 입력단의 임피던스를 조정하는 방법 등이 제안되었다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 입력단에 두 개의 스위칭 트랜지스터를 이용하여 입력단의 트랜지스터에 병렬로 연결된 트랜지스터를 추가하는 방법과, 게이트 인덕터에 병렬 캐패시터를 추가하는 방법을 복합적으로 이용하여 입력 임피던스를 조정하고, 출력단에서도 스위칭 트랜지스터를 이용하여 캐패시턴스를 조정하는 방법으로 다중 대역에 맞춰 입출력 정합을 이룰 수 있는 다중 대역 저잡음 증폭기를 설계한다.

2장에서는 제안된 저잡음 증폭기의 회로 및 스위칭 트랜지스터의 동작 상태에 따른 입출력 정합을 보여주고, 3장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 저잡음 증폭기의 효율성을 보여주었다. 마지막으로 4장에서는 결론을 제시하였다.

II. 다중 대역 저잡음 증폭기 설계

본 논문에서는 입력단의 게이트 인덕터에 스위칭 캐패시터를 병렬로 연결하고, 스위치와 연결되는 트랜지스터를 추가함으로써 다수의 주파수에 맞춰 동작하는 다중 대역 저잡음 증폭기를 설계하였다. 그림 2는 제안된 다중 대역 저잡음 증폭기의 회로도이다. 저잡음 증폭기의 설계를 위해 캐스코드(cascode) 구조가 기본 구조로 사용되었다. 소스 인덕터 L_s 는 목표 주파수에서 이득 정합과 잡음 정합을 동시에 이루기 위해 사용되었으며^[5], 여기서는 목표로 하는 세 개의 주파수 대역에서의 평균적인 특성을 고려하여 인덕턴스 크기를 선택하였다. 주파수 선택적 동작을 위해 입력 정합단에서는 M_{S1} , M_{S2} , 출력 정합단에서는 M_{S3} , M_{S4} 가 각각 스위칭 트랜지스터로써 각

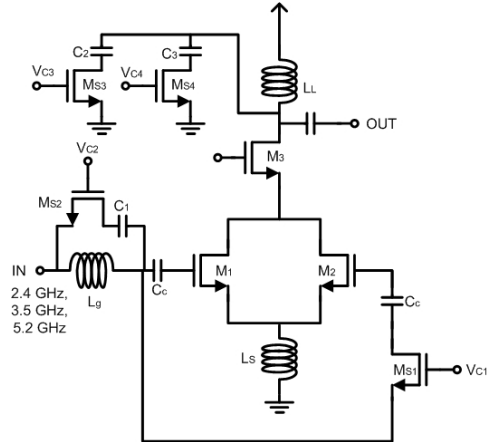


그림 1. 제안된 다중 대역 저잡음 증폭기
Fig. 1. Proposed multi-band LNA.

각 사용되었다. 각각의 스위칭 상태에 따라, 제안된 저잡음 증폭기는 2.4, 3.5, 5.2 GHz의 주파수에 맞춰 동작하게 된다.

2-1 다중 대역 입력 정합

스위칭 트랜지스터 M_{S1} , M_{S2} 가 모두 꺼져 있을 때 제안된 저잡음 증폭기의 고주파 대역에서 동작하게 되며, 이때의 입력단은 그림 2(a)와 같이 된다. 이것은 그림 2(b)와 같이 등가 회로로 나타낼 수 있다. 여기서 g_{m1} , C_{gs1} 은 각각 M_1 의 트랜스 컨덕턴스와 게이트-트-소스 캐패시턴스이다. 이로부터 입력 임피던스는 다음과 같이 구해지게 된다.

$$Z_{IN,\omega_H} = j\omega_H(L_s + L_g) + \frac{1}{j\omega_H C_{gs1}} + \frac{g_{m1}L_s}{C_{gs1}} \quad (1)$$

식 (1)로부터 적절한 L_g , g_{m1} , C_{gs1} 값을 선택함으로써

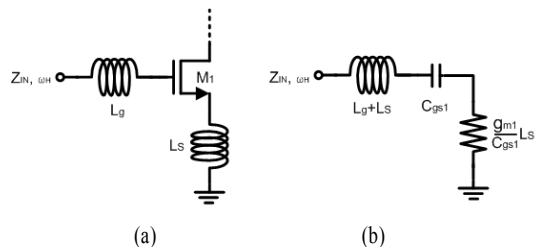


그림 2. (a) 고주파 대역 동작 상태에서의 입력단, (b) 등가회로
Fig. 2. (a) Input stage for high frequency mode, (b) Equivalent circuit.

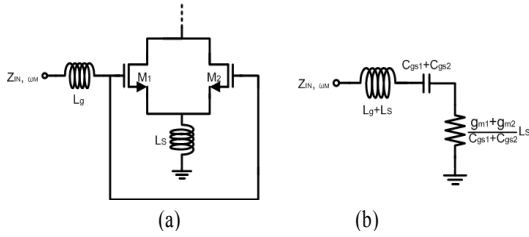


그림 3. (a) 중간 주파수 대역 동작 상태에서의 입력 단, (b) 등가회로
 Fig. 3. (a) Input stage for mid frequency mode, (b) Equivalent circuit.

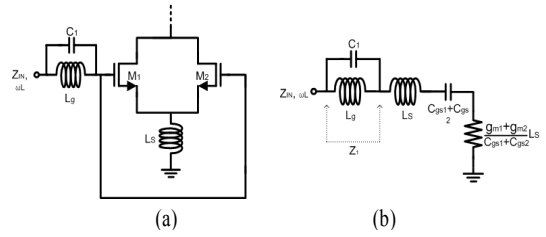


그림 4. (a) 저주파 대역 동작 상태에서의 입력 단, (b) 등가회로
 Fig. 4. (a) Input stage for mid frequency mode, (b) Equivalent circuit.

써 입력 임피던스를 조정할 수 있음을 알 수 있고, 이를 50 Ω에 맞추므로써 입력 정합을 이루었다.

이 상태에서 M_{S1} 이 켜지게 되면 제안된 회로는 중간 주파수 대역에서 동작하게 된다. M_{S1} 의 연결을 통해 제안된 회로의 입력단 쪽에 M_2 가 추가로 보이게 되고, 이로 인해 입력단의 트랜스 컨덕턴스와 캐패시턴스가 변하게 된다. 이때의 입력단은 그림 3(a)와 같이 보이게 되며, 이는 그림 3(b)와 같이 등가회로로 나타낼 수 있다. 여기서 g_{m2} , C_{gs2} 는 각각 M_2 로 인해 추가되는 트랜스 컨덕턴스, 게이트-소스 캐패시턴스를 나타낸다. 이로부터 다음과 같은 입력 임피던스가 구해지게 된다.

$$Z_{IN,\omega_M} = j\omega_M(L_s + L_g) + \frac{1}{j\omega_M(C_{gs1} + C_{gs2})} + \frac{(g_{m1} + g_{m2})L_s}{C_{gs1} + C_{gs2}} \quad (2)$$

위 식으로부터 적절한 g_{m2} , C_{gs2} 값을 선택함으로써 입력 임피던스의 실수부와 허수부를 조정할 수 있음을 알 수 있고, 이를 통해 중간 주파수 대역에서의 입력 정합을 이루었다. 여기서 필요한 g_{m2} , C_{gs2} 의 값은 M_2 의 폭을 적절히 조정해줌으로써 얻을 수 있었다.

제안된 회로에서 스위칭 트랜지스터 M_{S2} 가 켜지게 되면 캐패시터 C_2 가 게이트 인덕터 L_g 와 병렬로 놓이게 되고, 제안된 회로는 저주파 대역에서 동작하게 된다. 이때의 입력단은 그림 4(a)와 같이 보이게 되고, 이는 그림 4(b)와 같이 등가회로로 나타낼 수 있다.

그림 4(b)에서 병렬로 연결된 C_1 과 L_g 의 양 끝단으로 보이는 임피던스 Z_1 는 다음과 같다.

$$Z_1 = j\omega L_g // \frac{1}{j\omega C_1} = j\omega \frac{L_g}{1 - \omega^2 L_g C_1} \quad (3)$$

이 식으로부터 목표 주파수에서 $0 < \omega^2 L_g C_1 < 1$ 이 되도록 C_1 의 값을 조정하면 게이트 인덕턴스를 높이는 효과를 갖게 됨을 알 수 있다. 이때 그림 4(b)로부터 입력 임피던스는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{IN,\omega_L} = j\omega_L(L_s + L'_g) + \frac{1}{j\omega_L(C_{gs1} + C_{gs2})} + \frac{(g_{m1} + g_{m2})L_s}{C_{gs1} + C_{gs2}} \left(L'_g = \frac{L_g}{1 - \omega_L^2 L_g C_1} \right) \quad (4)$$

위 식으로부터 C_1 값을 적절히 선택함으로써 입력 임피던스를 조정할 수 있음을 알 수 있고, 이를 통해 저주파 대역에서의 입력 정합을 이루었다.

이와 같은 방법을 통해, 제안된 저잡음 증폭기는 스위칭 트랜지스터 M_{S1} , M_{S2} 의 동작 상태에 따라 2.4, 3.5, 5.2 GHz의 주파수 대역에 맞추어 입력 정합을 이루게 된다.

2-2 다중 대역 출력 정합

제안된 회로에서 다중 대역 출력 정합은 스위치와 캐패시터를 통해 각각의 동작 상태에 따라 출력단의 캐패시턴스를 조정하는 방법으로 구현하였다. 그림 5은 제안된 저잡음 증폭기의 출력단을 보여준다. 스위칭 트랜지스터 M_{S3} , M_{S4} 가 모두 꺼져 있을 때, 제안된 회로는 고주파 대역에서 동작하게 된다. 이때 L_L 은 5.2 GHz 대역에서 적합한 출력 정합을 이루도록 선택되었다. 여기서 M_{S3} 가 켜지게 되면, 출력단

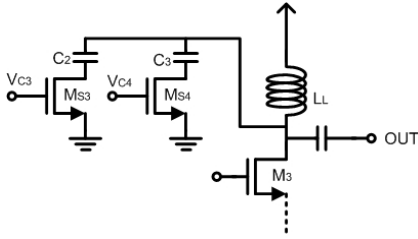


그림 5. 제안된 저잡음 증폭기의 출력단
Fig. 5. Output stage of proposed LNA.

에 캐패시턴스 C_2 가 병렬로 더해진다. 이로 인해 공진 주파수의 이동이 발생하게 되고, 여기서 C_2 값은 제안된 회로가 3.5 GHz 대역에서 출력 정합을 이루도록 선택되었다. 마찬가지로 방법으로 M_{s4} 가 커지게 되면 출력단에는 캐패시턴스 C_3 가 추가가 되고, 이를 통해 2.4 GHz 대역에서의 출력 정합을 이룰 수 있다. 이와 같은 방법을 통해 제안된 저잡음 증폭기는 2.4, 3.5, 5.2 GHz의 주파수 대역에 맞추어 출력 정합을 이루었다.

III. 시뮬레이션 결과

회로의 설계에는 TSMC 0.18 μm 공정이 이용되었고, 시뮬레이션에는 Cadence RF spectre를 이용하여 제안된 다중 대역 저잡음 증폭기의 유용성을 검증하였다. 그림 6, 7은 제안된 저잡음 증폭기의 입출력 반사 계수를 보여준다. 제안된 회로는 각각의 스위치의 동작 상태에 따라 입출력단 쪽으로 보이는 인덕턴스와 캐패시턴스가 조정되어 주파수 대역의 이동을 가져온다. 그림에서 보여지듯이, 제안된 회로는 2.4, 3.5, 5.2 GHz 대역에 맞추어 최적의 입출력 반사 특성을 보이며, 각 지점에서의 반사 계수는 -10 dB보다 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 8은 각각의 동작 상태에 따른 저잡음 증폭기의 이득을 나타낸다. 제안된 회로는 각각의 동작 주파수에서 정확한 입출력 정합을 이룸으로써 최적의 이득을 갖게 된다. 그림에서 보여지듯이 제안된 저잡음 증폭기는 2.4, 3.5, 5.2 GHz에서 각각 14.2, 12, 11.4 dB의 이득을 갖는다. 각 동작 상태에 따른 잡음 지수는 그림 9에 보여지고 있다. 그림과 같이 제안된 저잡음 증폭기는 2.4, 3.5, 5.2 GHz에서 각각 3, 2.9, 2.8 dB의 잡음 지수를 갖는다. 이 결과들을 통해

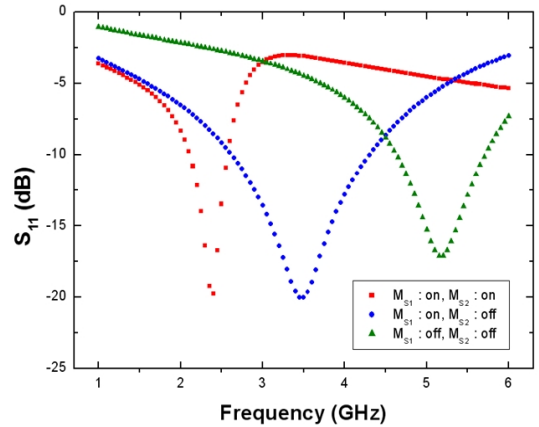


그림 6. 제안된 저잡음 증폭기의 입력 반사 계수
Fig. 6. Input reflection coefficient of proposed LNA.

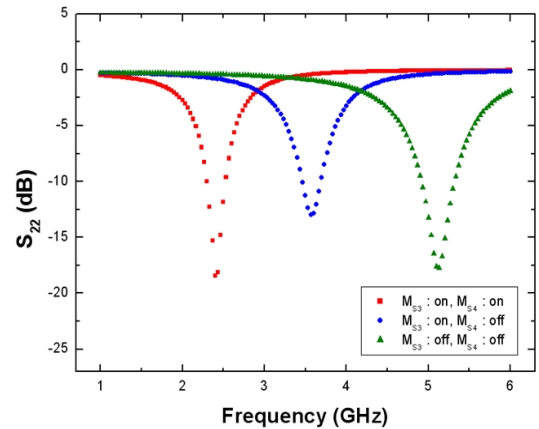


그림 7. 제안된 저잡음 증폭기의 출력 반사 계수
Fig. 7. Output reflection coefficient of proposed LNA.

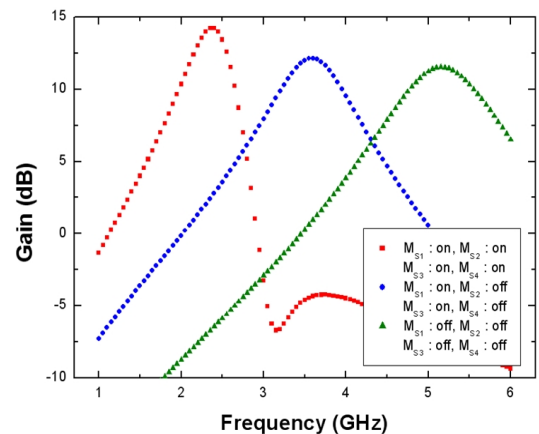


그림 8. 제안된 저잡음 증폭기의 이득
Fig. 8. Gain of proposed LNA.

표 1. 제안된 다중 대역 저잡음 증폭기의 성능 및 비교

Table 1. Performance summary of proposed multi-band LNA and comparison to others.

	Ref. [6]		Ref. [7]*		This work*		
Technology	0.18 um		0.18 um		0.18 um		
Frequency(GHz)	2.4	5.2	2.5	5.2	2.4	3.5	5.2
Gain(dB)	10.1	10.9	11.8	16	14.2	12	11.4
NF(dB)	2.9	3.7	4	2.6	3	2.9	2.8
S_{11} (dB)	-10.1	-11	-16	-30	-20.1	-20	-17.4
S_{22} (dB)	-10.5	-17	x	x	-18.8	-12.7	-17.6
IIP3(dBm)	4	-6	-8	-8	-6.9	-4.6	-5.2
Power(mW)	11.75	5.7	4.5	4.5	5.4	5.4	4.2

*시뮬레이션 결과

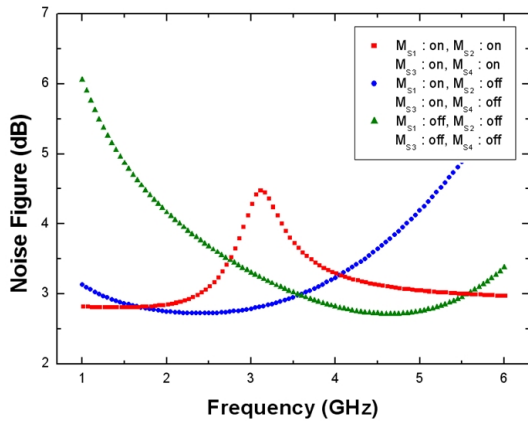


그림 9. 제안된 저잡음 증폭기의 잡음 지수

Fig. 9. Noise figure of proposed LNA.

제안된 회로가 세 개의 주파수 대역에 대해 저잡음 증폭기로서 동작할 수 있음을 확인할 수 있다. 표 1에는 제안된 다중 대역 저잡음 증폭기의 성능과 다른 연구와의 비교가 정리되어 있다.

IV. 결 론

본 논문을 통해 스위칭 트랜지스터를 이용하여 여러 주파수에 맞추어서 입력력 정합을 이룰 수 있는 다중 대역 저잡음 증폭기를 설계하였다. 입력단에서는 두 개의 스위칭 트랜지스터가 쓰였으며, 한쪽 스위치를 통해 캐스코드 구조에서 공통 소스 단의 트랜지스터를 추가함으로써, 입력단의 트랜스 컨덕턴스와 게이트-소스 캐패시턴스를 조정할 수 있었다. 한편, 게이트 인덕터와 병렬로 연결된 다른 한쪽 스

위치를 통해서 게이트 인덕터의 실효 인덕턴스를 조정할 수 있었다. 이와 같은 방법으로, 각각의 스위치의 동작 상태에 따라 제안된 회로는 세 개의 주파수에 대해 입력 정합을 이룰 수 있었고, 출력단에서는 두 개의 스위칭 트랜지스터를 이용하여 캐패시턴스를 조정하는 방법으로 각 주파수에 대해 출력 정합을 이루었다. 각각의 스위칭 트랜지스터의 동작 상태에 따라 제안된 저잡음 증폭기는 2.4, 3.5, 5.2 GHz 대역에서 동작할 수 있으며, 제안된 저잡음 증폭기는 각 주파수에 대해 14.2, 12, 11 dB의 이득과 3, 2.9, 2.8 dB의 잡음 지수를 갖는다.

참 고 문 헌

- [1] S. Wu, B. Razavi, "A 900-MHz/1.8 GHz CMOS receiver for dual-band applications", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 12, pp. 2178-2185, Dec. 1998.
- [2] S. Chehrazi, R. Bagheri, A. Mirzaei, and A. A. Abidi, "A 6.5 GHz wide-band CMOS low noise amplifier for multi-band use", *Proc. IEEE Custom IC Conf.*, San Jose, CA, pp. 801-804, Sep. 2005.
- [3] Sang-Sun Yoo, Hyung-Joun Yoo, "Optimization of switchable inductor and application to reconfigurable LNA with self-matched capacitor", *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007*, pp. 1-4, pp. 11-14, Dec. 2007.
- [4] Liang-Hung Lu, Hsieh-Hung Hsieh, and Yu-Shun

- Wang, "A compact 2.4/5.2-GHz CMOS dual-band low-noise amplifier", *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 685-687, Oct. 2005.
- [5] T. Kien, S. G. Lee, "CMOS low noise amplifier design optimization technique", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 5, pp. 1433-1442, May 2004.
- [6] L. -H. Lu, H. -H. Hsieh, and Y. -S. Wang, "A compact 2.4/5.2 GHz CMOS dual-band low-noise amplifier", *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 687-687, Oct. 2005.
- [7] V. K. Dao, B. G. Choi, and C. S. Park, "A dual-band CMOS RF front-end for 2.4/5.2 GHz applications", *IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 145-148, Jan. 2007.

안 영 빈



2008년 2월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학사)
 2010년 2월: 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 (공학석사)
 2008년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] RF 집적 회로 설계

정 지 채



1980년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1988년 2월: 미국 Carnegie-Mellon Univ. (공학박사)
 1982년~1985년: 한국과학기술연구원(KIST) 연구원
 1988년~1993년: AT&T Bell Lab. 연구원
 1993년~1995년: 포항공과대학교 교수
 1995년~2010년: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 교수
 2010년~현재: 고려대학교 뇌공학과 교수
 [주 관심분야] 초고속 광 네트워크, 광 변조 방식 기술, 회로 및 시스템, RF 집적 회로 설계