바렉터 다이오드를 이용하지 않은 광대역 Push-Push 전압제어 발진기

A Novel Varactor Diodeless Push-Push VCO with Wide Tuning Range

이 문 규 · 문 성 모* · 민 상 보**

Moon-Que Lee · Seong-Mo Moon* · Sangbo Min**

요 약

본 논문에서는 저가형 구조에 이용 가능한 X-band 대역의 push-push형 VCO를 제안하였다. 제작된 push-push형 발진기는 부가적인 바렉터 다이오드를 사용하지 않고, 컬렉터 바이어스를 가변하여 X-band에서 넓은 주파수 가변을 얻었다. 측정 결과 컬렉터 바이어스 전압을 4~9 V 가변하였을 때 10.9 GHz~11.8 GHz의 900 MHz의 주파수 가변, -30 dBc 이하의 우수한 f_0 억압 특성, -115 dBc/Hz @ 1 MHz의 위상 잡음 특성을 가졌다.

Abstract

An X-band push-push VCO for low cost applications is proposed. The designed push-push oscillator achieves a wide tuning range in the X-band by the collector bias tuning instead of extra varactor diodes. The measurement shows a wide tuning bandwidth of 900 MHz from 10.9 GHz to 11.8 GHz with a drain bias voltage varying from 4 to 9 V, excellent fundamental suppression of -30 dBc and good phase noise of -115 dBc/Hz @ 1 MHz offset.

Key words : Push-Push, Voltage-Controlled Oscillator, Varactor Diodeless

Ⅰ. 서 론

Push-push형 발진기는 기본 주파수 성분에 대한 불요 성분과 구현되는 회로가 기본 주파수 발진기에 비해 복잡하다는 단점에도 불구하고 마이크로웨이브 응용분야에 널리 적용되고 있다. 이는 push-push형 발진기는 능동 소자의 발진 주파수 제한의 한계 이상에서 발진 신호를 얻을 수 있으며[1], 주파수 가변을 위한 바랙터의 기생소자 효과가 적어 기본 주파수 발진기에 비해 더 넓은 주파수 가변 영역을 갖는 장점이 있다[2]. 또한 push-push 구조는 주파수 체배기를 이용한 방법에 비해 두 개의 발진 신호의 위상 잡음간의 상관성이 없어 더 우수한 위상잡음 특성을 가지며[3]-[5], 두 개의 동일한 발진 신호가 출력단에서 가상 접지되어 동작하기 때문에 pulling-figure 특성이 우수하다.

본 논문에서는 저가의 레이더 신호 검출기에 적용할 수 있는 새로운 광대역 전압 제어 발진기 구조를 제안한다. 상용되는 바렉터 다이오드는 패키지 효과에 의한 series 인덕턴스로 인하여 SRF(Self Resonance Frequency)가 낮다. 제안된 push-push형 전압제어 발진기에서는 주파수 가변을 위해 일반적인 바렉터 다이오드를 사용하지 않고, 발진기의 능동소자 트랜지스터의 컬렉터 바이어스에 의한 비선형 커패시터의 변화를 이용한다. 본 논문에서 제안된 바렉터를 이용하지 않은 방법을 적용함으로써 X-band 이상

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(Department of Electrical & Computer Engineering, University of Seoul)

*서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부, 인티그런트 테크놀로지즈(주)(Department of Electrical & Computer Engineering, University of Seoul, Integrant Technologies Inc.)

**엑시옴(Axiom Wireless Technologies, Inc.)

· 논 문 번 호 : 20041021-140

· 수정완료일자 : 2005년 3월 14일

에서 기존의 구조에 비하여 보다 우수한 주파수 가변 특성을 얻을 수 있다. 고주파 회로 발진 주파수 가변에 관한 특성은 발진기의 선형 발진 모델을 통해 설명한다.

Ⅱ. 바렉터를 사용하지 않은 Push-Push형 전압제어 발진기

2-1 구조

제안된 전압 제어 발진기의 회로도는 그림 1과 같다. 제안된 구조는 각각이 180도의 위상 차이를 가지며 작동하는 두 개의 동일한 발진기로 구성되어 있다. 각각의 전압 제어 발진기의 베이스 단에는 낮은 위상 잡음 특성을 갖게 하는 hair-pin 공진기가 연결되어 있다. 또한 $\lambda/4$ 길이의 마이크로스트립 라인으로 컬렉터 단의 RF short 임피던스를 구현하였다. 두 개의 동일한 발진기는 트랜지스터의 에미터 단에 연결된 전력 결합기에 의해 기본 주파수를 포함한 기모드 성분은 상쇄되고, 제 2고조파 성분을 포함한 우모드 성분은 더해지게 된다.

트랜지스터의 베이스 단의 전원은 외부의 9 V 전압 공급원에서 전압 분배에 의해 고정하였다. 이렇게 고정된 전압은 컬렉터 전압의 변화에 영향없이 트랜지스터에 일정한 전류를 제공한다. 주파수 가변을 위해서 컬렉터 바이어스는 4 V에서 9 V까지 변화시킨다. 컬렉터 바이어스 전압을 변화함에 따른

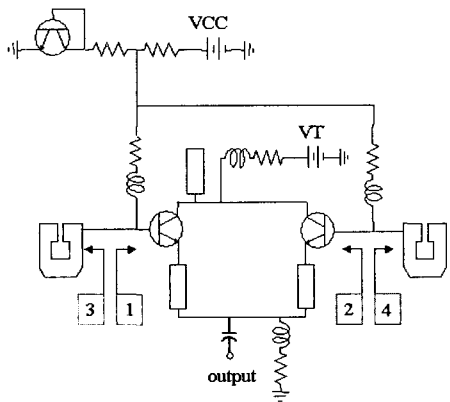


그림 1. 바렉터 다이오드를 이용하지 않은 push-push 형 전압제어 발진기

Fig. 1. The proposed varactor diodeless push-push VCO.

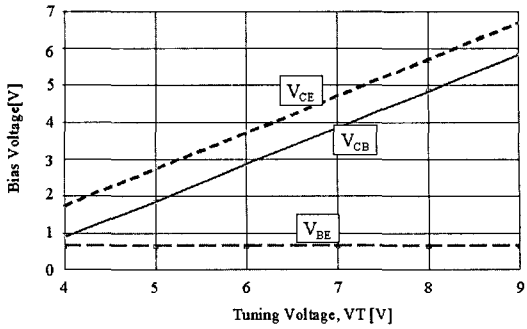


그림 2. 바이어스 전압에 대한 가변 전압(컬렉터 전압)

Fig. 2. Bias voltage versus the tuning voltage, VT (collector bias).

트랜지스터의 각 노드의 전압을 그림 2에 나타내었다. 바이어스 전압의 변화에 비례하여 컬렉터-베이스 바이어스는 변화하는 반면, 컬렉터 전류는 9.4 mA에 일정하게 유지하였다.

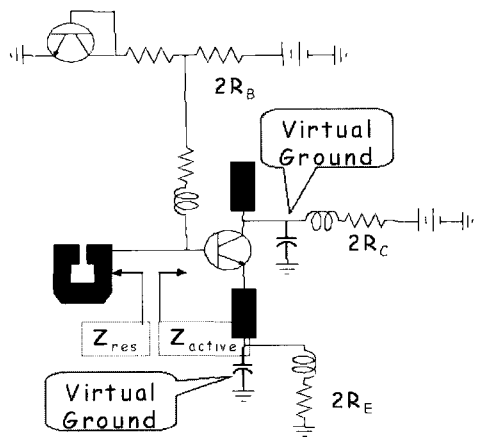
2-2 분석

Push-push형 발진기의 정확한 소신호 분석은 Series Ⅳ Libra를 이용하였으며, 각각의 발진기가 차동 동작 상태에서 동작하므로 차동 반회로(differential half-circuit)를 이용하여 선형회로 분석을 통해 수행할 수 있다[6].

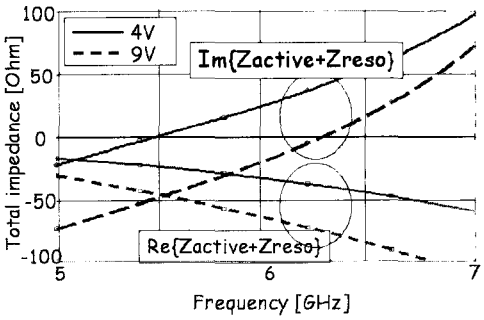
그림 3에서는 제안된 구조에 대한 반회로의 선형 시뮬레이션에서 컬렉터 전압을 4~9 V까지 변화시켰을 때 기본 발진 주파수는 500 MHz 이상의 가변 특성을 나타내었다.

본 논문에서 채택한 회로는 바랙터 다이오드를 사용하지 않는 발진기로 컬렉터 전압 변화에 대해 주파수 가변 특성을 보였다. 가변 발진 특성에 대한 메커니즘을 분석하기 위해 트랜지스터의 내부 파라메터 중에서 어떤 소자 파라메터가 발진기의 주파수 가변에 주된 역할을 하는지를 분석하였다. 그림 4는 Si-BJT인 2SC5508의 내부의 등가회로를 보여주고 있다. 그림 4에서 트랜지스터의 컬렉터의 가변 전압에 따라 변할 수 있는 비선형 소자는 R_{be}, C_{be}, C_{cb}, 그리고 전달 컨덕턴스인 g_m이 있다.

그림 5는 시뮬레이션을 이용하여 컬렉터 바이어스 전압에 의한 내부 파라메터의 변화를 보여주고 있다. 상기 4개의 내부 파라메터에 대한 기모드의 반회로를 통해 선형 발진을 조사하면 발진 가변 특



(a)



(b)

그림 3. (a) Push-push 모드의 차동 반 회로, (b) 가변 전압(VT 또는 collector 전압)에 따른 소신호 발진조건

Fig. 3. (a) A differential half circuit for push-push mode, (b) Small-signal oscillation test with respect to the tuning voltage.(VT or collector bias).

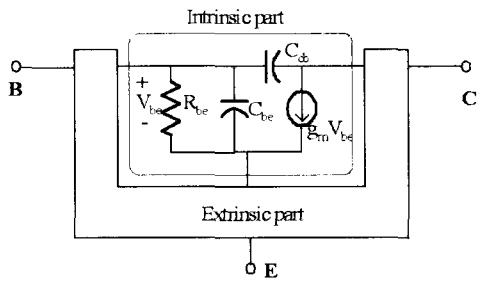


그림 4. 2SC5508의 등가회로

Fig. 4. The equivalent circuit of 2SC5508.

성을 알아볼 수 있다.

선형 발진 시뮬레이션 결과 컬렉터 전압 변화에

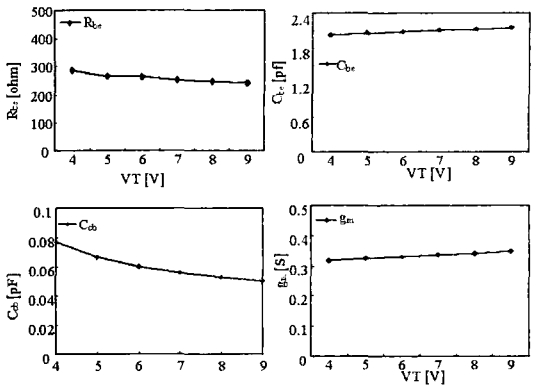


그림 5. 가변전압(VT)에 의한 내부 파라메터의 값 변화

Fig. 5. The variations of the intrinsic parameters with respect to tuning voltage VT.

표 1. 가변 전압에 의한 내부 파라미터의 변화

Table 1. Variations of intrinsic parameters with respect to control voltage.

Control voltage	R_{be} [Ohm]	C_{cb} [pF]	C_{bc} [pF]	g_m [S]
4 V	0.0932	0.0793	0.017	235.6
9 V	0.1213	0.0521	0.039	231.7

표 2. 내부 파라미터 중 한 가지 파라미터 변화에 따른 발진 주파수

Table 2. Oscillation frequency with respect to one parameter at intrinsic parameter.

Variable factor	R_{be}	C_{cb}	C_{bc}	g_m
Freq.(GHz)	5.832	5.818	5.944	5.852

대한 트랜지스터의 내부 파라메터의 변화값을 다음 표 1과 같이 얻었다. 제어 전압이 4 V일 때의 파라미터 값을 이용한 소신호 결과 5.83 GHz에서 발진하였으며, 각각의 내부 파라미터에서 4 V를 중심으로 1 V의 전압 변화에 대한 각가의 내부 파라미터의 변화에 대한 주파수 변화는 표 2와 같다.

표 1과 표 2의 변화율을 이용하면 제어 전압이 변했을 때의 각 내부 파라메터의 변화로 인한 발진주파수의 변화를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\left.\frac{\partial f_o}{\partial R_{be}}\frac{\partial R_{be}}{\partial V}\right|_{VT=4V} = -1.2MHz/V \quad (1)$$

$$\left.\frac{\partial f_o}{\partial C_{cb}}\frac{\partial C_{cb}}{\partial V}\right|_{VT=4V} = 110.6MHz/V \quad (2)$$

$$\left.\frac{\partial f_o}{\partial C_{be}}\frac{\partial C_{be}}{\partial V}\right|_{VT=4V} = -14.9MHz/V \quad (3)$$

$$\left.\frac{\partial f_o}{\partial g_m}\frac{\partial g_m}{\partial V}\right|_{VT=4V} = 18.1MHz/V \quad (4)$$

식 (1)~(4)를 살펴보면, C_{be} 효과의 경우, C_{be}의 변화에 대한 발진주파수의 변화율은 크나 제어 전압에 대한 베이스 전압의 고정으로 인해 C_{be}의 변화가 매우 작아 상대적으로 발진 주파수의 변화에 대한 영향이 작음을 알 수 있다. 발진주파수에 가장 영향을 많이 주는 내부 비선형 소자는 컬렉터-베이스 커패시턴스인 C_{cb}로 컬렉터와 베이스 사이의 역전압에 의한 p-n 다이오드의 공핍영역의 변화에 의해 생성되는데, 이 소자가 컬렉터의 가변 전압에 따라 발진기에서 가변 커패시터로 동작함을 알 수 있다.

또한 본 논문에서는 push-push형 발진기의 비선형(nonlinear) 시뮬레이션을 위하여 그림 6과 같이 시뮬레이션을 위한 회로를 구성하였다. 그림 6에서 두개의 독립된 발진기는 정확히 차동 모드에서 동작한다고 가정을 하고 비선형 발진 조건을 찾기 위해 OSCTEST를 각 발진기에 삽입하고, 두 OSCTEST에 인가하는 전압파를 인위적으로 180도의 위상 차이를 갖도록 한 후, 일반적인 비선형 발진 전력과 주파수를 구하는 과정으로 시뮬레이션을 수행하였다.

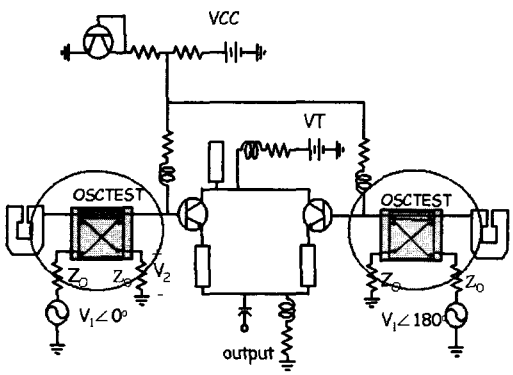


그림 6. Push-push형 발진기의 비선형 시뮬레이션을 위한 test bench

Fig. 6. The test bench for a nonlinear simulation for the push-push type oscillator.

Ⅲ. 실험 결과

설계된 push-push 발진기는 20 mil의 두께를 갖는 Teflon 기판에 그림 7과 같이 하이브리드 기법으로 구현하였다. 능동소자(Si-BJT, 2SC5508)는 V_{ce}=3 V, I_c=30 mA의 조건에서 25 GHz 이하의 ft를 가지고 있는 트랜지스터를 사용하였다.

측정 결과는 컬렉터 바이어스를 4 V~9 V 변화하여 10.9 GHz에서 11.8 GHz까지 900 MHz의 주파수 가변을 얻었다. 컬렉터 바이어스의 가변을 이용한 push-push 전압 제어 발진기는 14 dB의 출력 전력 변화를 가졌다. 이처럼 큰 출력 변화는 리미터 특성을 갖는 포화 증폭기를 발진기 다음 단의 버퍼 증폭기로 사용하여 5 dB의 편차로 줄일 수가 있었다. 모든 고조파 억압 특성은 -30 dBc 이하로 측정되었다.

그림 8과 그림 9는 컬렉터 바이어스에 따른 발진

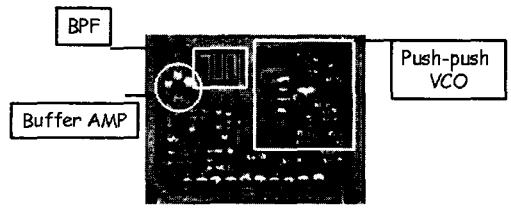


그림 7. 제작된 push-push VCO 사진

Fig. 7. Photograph of designed push-push VCO.

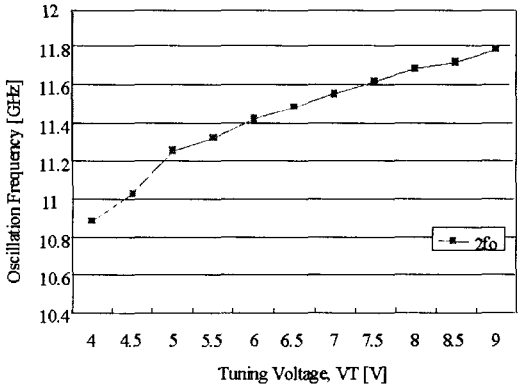


그림 8. 가변 바이어스 전압(VT)에 대한 발진 주파수 변화

Fig. 8. The variation of the oscillation frequency with respect to tuning voltage(VT).

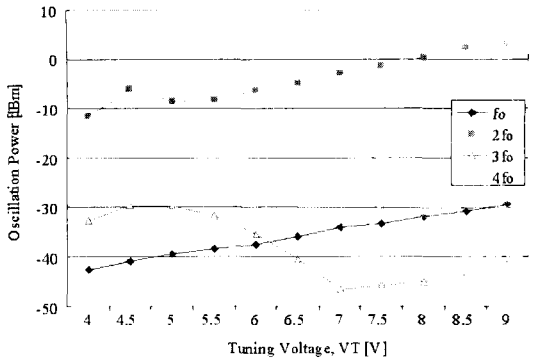


그림 9. 설계된 push-push 발진기의 측정된 출력 전력 및 하모닉 특성(버퍼증폭기가 없을 때)

Fig. 9. The measured power output of fundamental and harmonics of the designed push-push oscillator without the buffer amplifier.

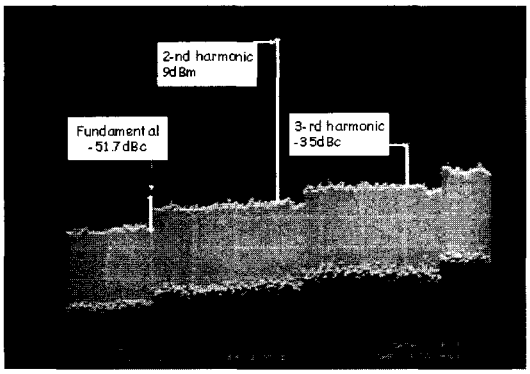


그림 10. 버퍼증폭기가 있는 push-push VCO의 출력 스펙트럼. 중심주파수: 11.4 GHz, Span: 10 GHz, REF: 10 dBm, and 10 dB/DIV

Fig. 10. The measured harmonic spectrum of the buffed push-push oscillator. Center freq.: 11.4 GHz, Span: 10 GHz, REF: 10 dBm, and 10 dB/DIV.

주파수와 고조파 억압특성을 보이고 있다.

그림 10은 버퍼 증폭기가 더해진 발진기의 발진 특성을 보여주고 있다. 이때 기본 주파수의 억제는 -50 dBc 정도로 매우 우수함을 볼 수 있다.

그림 11은 출력 전력의 위상 잡음 특성을 측정한 그림으로 -115 dBc/Hz @ 1 MHz offset 위상잡음 특성을 보였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 레이더 신호 검출기와 같은 저가

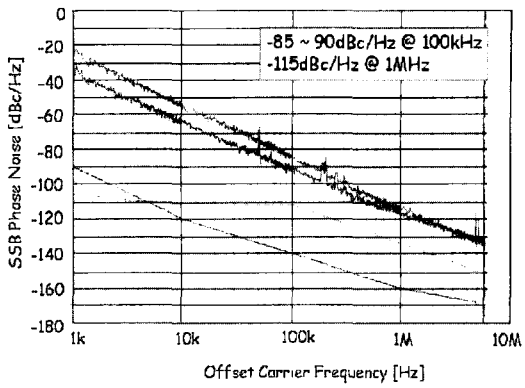


그림 11. 측정된 위상잡음 특성. -85~90 dBc/Hz @ 100 kHz, -115 dBc/Hz @ 1 MHz

Fig. 11. The measured phase noise. -85~90 dBc/Hz @ 100 kHz and -115 dBc/Hz @ 1 MHz.

형 구조에 응용에 가능한 새로운 형태의 전압 제어 발진기를 설계, 측정하고, 분석하였다. 주파수 가변에 대한 분석 결과 주파수 가변에 가장 영향을 많이 주는 트랜지스터의 내부 파라메터는 컬렉터-베이스 간의 비선형 커패시턴스로 해석이 되었다. 제안된 발진기는 회로에 부가적인 바렉터 다이오드를 사용하지 않으면서 X-band에서 900 MHz의 주파수 가변을 얻었다. 900 MHz의 넓은 가변 범위 내에서 -115 dBc/Hz @ 1 MHz의 우수한 위상잡음 특성을 얻었다.

참 고 문 헌

[1] F. X. Sinnesbichler, H. Geltinger, and G. R. Olbrich, "A 38-GHz push-push oscillator based on 25-GHz ft BJT's", *IEEE Microwave Guided Wave Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 151-153, Apr. 1999.

[2] Y. Baeyens et al., "Compact InP-based HBT VCOs with a wide tuning range at W- and D-Band", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 12, pp. 2403-2408, Dec. 2000.

[3] A. -S. Hyun et al., "K-band hair-pin resonator oscillators", *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 725-728, Jun. 1999.

[4] Y. Sun, T. Tieman, H. Pflug, and W. Velthius, "A fully integrated dual-frequency push-push VCO for 5.2 and 5.8 GHz wireless application", *Microwave Journal*, pp. 64-74, Apr. 2001.

[5] Franz X. Sinnesbichler, "Hybrid millimeter-wave push-push oscillators using silicon-germanium HBTs", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 2, Feb. 2003.

[6] L. Dussopt, D. Guillois, and G. M. Rebeiz, "A lowphase noise silicon 9 GHz VCO and an 18 GHz push-push oscillator", *2002 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 695-698, Jun. 2002.

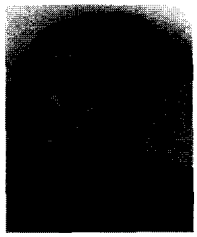
이 문 규

1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
1999년 2월~2002년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
2002년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(MMIC, Hybrid) 및 수동 부품회로 설계

문 성 모

2003년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2005년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2005년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정
2005년 2월~현재: Integrant Technologies Inc. 전임연구원
[주 관심분야] RFIC, 마이크로파 /밀리미터파 능동 부품 회로 설계(MMIC, Hybrid)

민 상 보



1989년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 경남대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 11월~2004년 5월: (주)마이크로라인 연구소장
2001년 2월~현재: 경남대학교 전자공학과 박사 과정
2004년 5월~2005년 1월: 헤드라인 정보통신(주) RD 사업부 이사
2005년 2월~현재: Axiom Wireless Technologies, Inc. CTO.
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동 및 수동 부품 회로설계