

# 초광대역 응용 시스템을 위한 L밴드 전압제어발진기 설계

## L-band Voltage Controlled Oscillator for Ultra-Wideband System Applications

구본산 · 신금식 · 장병준\* · 류근관\*\* · 이문규

Bonsan Koo · Guem-Sik Shin · Byung-Jun Jang\* · Keun-Kwan Ryu\*\* · Moon-Que Lee

### 요 약

본 논문에서는 TV set-top tuner용으로 사용할 수 있는 옥타브 밴드를 갖는 전압제어 발진기를 설계하였다. 측정 결과, 주파수 튜닝 범위는 0.9 GHz~2.2 GHz로써 1.3 GHz의 발진 대역을 갖는다. 광대역 튜닝과 선형성, 그리고 일정한 위상 잡음 성능을 유지하기 위해 트랜지스터의 베이스와 에미터부에 모두 4개의 배랙터 다이오드를 사용한 것이 특징이다. 개발된 전압제어발진기는 0 V~20 V의 제어 전압과 10 V, 15 mA의 공급 전력을 필요로 한다. 출력 전력은 5.3 dBm을 중심으로 약 ±1.1 dB의 편차를 갖고, 위상 잡음은 전 발진 대역에서 -94.8 dBc/Hz @ 10 kHz offset 이하의 값을 보인다. 선형성은 평균적으로 65 MHz/V이고 ±10 MHz의 편차를 보인다.

### Abstract

In this paper an octave tuning voltage controlled oscillator which is used in set-top TV tuner was designed. Oscillation frequency range is 0.9 GHz~2.2 GHz with 1.3 GHz bandwidth. By using 4 varactor diodes in base and emitter of transistor, wide-band tuning, sweep linearity and low phase noise could be achieved. Designed VCO requires a tuning voltage of 0 V~20 V and DC consumption of 10 V and 15 mA. Designed VCO exhibits an output power of 5.3 dBm ±1.1 dB and a phase noise below -94.8 dBc/Hz @ 10 kHz over the entire frequency range. The sweep linearity shows 65 MHz/V with a deviation of ±10 MHz.

Key words : VCO, Voltage Controlled Oscillator, Oscillator, Wideband Oscillator

### I. 서 론

일반적으로 옥타브 밴드 이상의 초광대역을 갖는 전압제어발진기를 설계할 때 고려할 점은 광대역에서의 발진 조건, 일정한 위상 잡음 특성, 우수한 선형성, 출력 전력의 평탄도 등을 들 수 있다. 이러한 특성들은 서로 독립적인 것이 아니라 상호간에 trade-off 관계를 갖고 있기 때문에 모두 동시에 만족시키기는 어렵다. 즉, 광대역 전압제어발진기 설계 시 중요한 점은 넓은 주파수 대역에서의 발진 조건

을 어떻게 충족시키는가 하는 것과 발진 조건을 확보함으로써 악화될 수 있는 위상 잡음 성능이나 선형성, 출력의 평탄도 특성을 어느 정도 수준까지 일정하게 유지할 수 있는가 하는 것이 설계의 주안점이다. 또한 광대역을 구현하기 위해서는 소자의 선형도 중요한데 첫째, 최대 동작 주파수와 튜닝 대역폭을 제공할 수 있는 배랙터 다이오드를 선택해야 하고 둘째, 관심 대역에서 충분한 부성 저항을 제공할 수 있는 능동 소자를 선택해야 한다<sup>[1]</sup>. 능동소자를 선택하는 방법은 1/f 잡음 특성과 동작 주파수를

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(Department of Electronics Computer Engineering, University of Seoul)

\*한국정보통신연구진흥원(Institute of Information Technology Assessment)

\*\*한밭대학교 정보통신공학부(Department of Information Communication Engineering, Hanbat National University)

· 논문 번호 : 20040204-013

· 수정완료일자 : 2004년 7월 23일

고려하여 선택하여야 한다.  $1/f$  잡음은 Si-BJT가 MESFET이나 HEMT와 비교하여 20~30 dB 정도 우수한 것으로 알려져 있으므로 Si-BJT를 선택하는 것이 위상 잡음 면에서 유리하다<sup>[2]</sup>. BJT의 경우 일반적으로  $1/f$  잡음은 에미터 면적에 반비례하므로  $I_c$ ,  $\max(\text{최대 허용 컬렉터 전류})$ 가 큰 소자를 선택한다<sup>[3]</sup>.

이 경우에는 베이스 저항도 함께 감소되어 베이스 저항으로 인한 잡음특성도 개선할 수 있다. 능동 소자의 차단 주파수는 동작주파수를 고려하여서는 최대 발진 주파수의 최소 3배 이상이 되는 소자를 선택한다. 배랙터 다이오드의 선정시 옥타브 밴드의 경우, 최대 용량값과 최소 용량값의 비가 이상적으로 4 : 1 이상이 되어야 하므로 이보다 충분히 큰 소자를 선택한다. 그리고 트랜지스터의 베이스와 소스 각각에 배랙터 다이오드를 사용하면, 주파수가 높아질수록 나타나는 트랜지스터 내부의 기생 커패시턴스의 영향을 상쇄시킴으로써 대역폭을 향상시키고, 출력의 평탄도를 높일 수 있다<sup>[4]</sup>.

## II. 발진기 구조

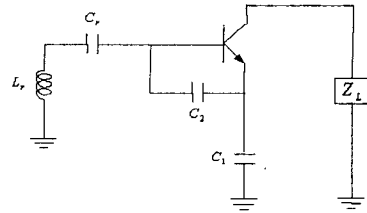
대부분의 광대역 전압 제어 발진기에서 Colpitts 구조와 Hartley 구조를 많이 사용한다. 그 중에서 Colpitts 발진기는 발진에 필요한 부성 저항을 제공하기 위해 커패시턴스 피드백 네트워크를 이용하고 공진부를 인덕터로 동작하도록 구성한다. 그림 1은 기본적인 Colpitts 발진기의 구조와 이에 대한 소신호 등가 모델을 나타낸다.

그림 1(b)의 소신호 등가 모델에서 피드백 커패시턴스와 부성 저항의 관계를 알아보기 위해 베이스 단자에 KVL을 적용하면, 아래의 수식 (1)과 같이 된다.

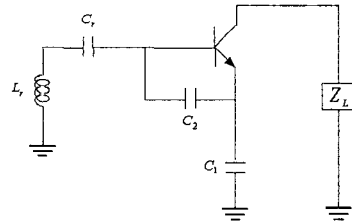
$$\begin{aligned} v_b &= \frac{i_b}{j\omega C_1} + (i_b + g_m v_{be}) \frac{1}{j\omega C_2} \\ &= \frac{i_b}{j\omega C_1} + (i_b + g_m \frac{i_b}{j\omega C_1}) \frac{1}{j\omega C_2} \\ &= \frac{i_b}{j\omega C_1} + \frac{i_b}{j\omega C_2} - \frac{g_m i_b}{\omega^2 C_1 C_2} \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 트랜지스터의 베이스에서 바라 본 임피던스는 아래의 수식 (2)와 같다.

$$Z_{in} = \frac{i_b}{v_b} = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} - \frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2} \quad (2)$$



(a) 콜피츠 발진기  
(a) Colpitts oscillator



(b) 소신호 등가 모델  
(b) Small signal equivalent model

그림 1. 기본적인 콜피츠 발진기 구조와 소신호 등가 모델

Fig. 1. Basic Colpitts oscillator and its small signal equivalent model.

식 (2)를 등가 회로로 표현하면 그림 2와 같다.

따라서 두 개의 피드백 커패시턴스 C1, C2의 곱으로써 부성 저항이 만들어짐을 알 수 있다. 그리고 트랜지스터의 베이스에서 본 리액턴스가 커패시턴스이므로, 발진 조건을 충족시키기 위해서는 공진부의 리액턴스가 인덕턴스이어야 한다.

옥타브 정도의 초광대역 발진 특성을 얻기 위한 방법으로 공진기로 YIG를 검토할 수 있으나, YIG 공진기는 Tuning Speed가 느리고, 고가인 관계로 계측기 등에 응용이 가능하지만 TV Tuner나 저가의 응용시스템 등에서는 사용이 어렵다. 본 논문에서는

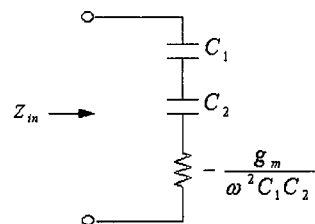


그림 2. 베이스에서 본 임피던스의 등가 회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of impedance seen looking into base.

Tuning speed가 빠르고 저가인 Si Varactor 다이오드를 이용하여 공진부를 구현하였다.

일반적으로 공진부는 직렬 LC나 병렬 LC 탱크 회로를 사용하는데, 발진기의 tunability와 위상 잡음 성능에 가장 직접적인 영향을 준다. 콜피츠 형태의 광대역 발진구조에서는 LC 직렬 공진을 이용한다. 이는 LC 병렬 공진에 비해 비교적 높은 주파수에서도 충분한 인덕턴스 값을 제공해 줄 수 있으므로, 광대역을 필요로 하는 발진기에서 보다 유리한 공진 구조라 할 수 있다.

발진기의 튜닝 범위는 LC 탱크 회로가 공진 주파수를 얼마만큼 변화시킬 수 있는가에 따라 결정된다. 탱크 회로의 공진 주파수는  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  로 정의되고 회로의 기생 효과를 무시하는 경우 발진기의 튜닝 영역은 아래 식 (3)에 의해 결정된다.

$$Tuning\ Range = \sqrt{\frac{C_{max}}{C_{min}}} \quad (3)$$

따라서 옥타브 이상의 튜닝을 위해서는  $C_{max} : C_{min}$ 이 최소 4 : 1인 커패시턴스 튜닝 범위가 필요하다.

이러한 콜피츠 구조를 바탕으로 본 논문에서는 그림 3과 같은 발진기 구조를 제안하였다.

그림 3은 바이어스 회로를 포함한 전체 발진기 구조를 나타낸다.

트랜지스터의 베이스부에 연결된 마이크로스트립 라인  $ML_1$ 과 배랙터 다이오드  $D_b$ 의 LC 직렬 공진 회로는 넓은 주파수 대역에서 능동 소자가 불안정 영역(Unstable region)에 놓이도록 함으로써, 광대역에서의 발진 조건을 충족시켜준다. 베이스와 에미터

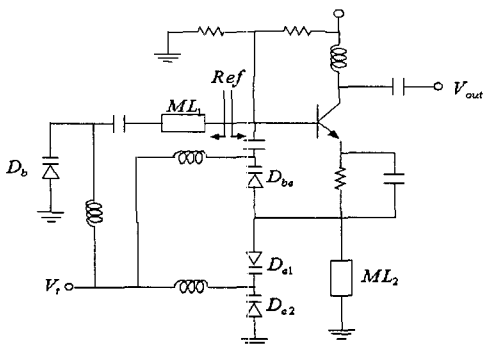


그림 3. 1~2 GHz 전압제어발진기 구조  
Fig. 3. 1~2 GHz voltage controlled oscillator.

사이의 배랙터 다이오드  $D_{be}$ 는 전 대역에서 발진에 필요한 부정 저항을 크게 함으로써 선형 발진 조건을 충족시켜주고, 출력 전력의 평탄도를 높여줄 뿐만 아니라, 일정한 위상 잡음 성능을 유지하도록 한다. 에미터부에서 두 개의 back-to-back으로 연결되는 배랙터 다이오드  $D_{e1}$ 과  $D_{e2}$ 는 제어 전압에 대한 발진 영역에서 선형 발진 조건을 충족시켜 줌과 동시에 마이크로스트립 라인  $ML_2$ 와의 병렬 공진을 통해 위상 잡음 성능을 개선한다. 에미터에 배랙터 다이오드를 back-to-back으로 연결한 이유는 RF 전압에 대해 정류현상을 방지하기 위한 목적이다. 배랙터 다이오드가 RF 전압에 대해 순시적으로 Turn-on이 되면 다이오드의 PN 접합부에 DC 전류가 흐르게 되어 shot noise에 의한 잡음이 발생하게 되는데, 이 잡음에 의해 위상잡음 특성이 악화되므로 RF 정류현상을 막기 위해 배랙터 다이오드를 back-to-back으로 구성한다. 발진기의 튜닝 범위는 에미터부의 배랙터 다이오드  $D_{e1}$ ,  $D_{e2}$ 에 의해 주로 결정된다.

### III. 광대역 전압제어발진기 설계

본 논문에서 설계한 광대역 전압 제어 발진기를 Agilent사의 ADS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 4는 그림 3의 트랜지스터의 베이스에서  $ML_1$ ,  $D_b$ 를 바라 보았을 때, LC 직렬 공진의 리액턴스에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

그림 4에서 1~2 GHz의 관심대역에서 충분한 인덕턴스를 제공함을 볼 수가 있고, 이것이 능동 소자의 커패시턴스와 더해져서 발진 조건을 충족시키게 된다.

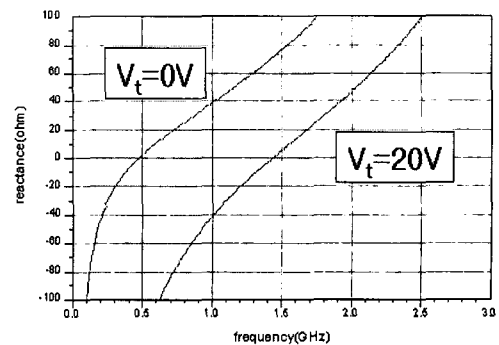


그림 4. 제어 전압에 따른 리액턴스 특성  
Fig. 4. Reactance vs. tuning voltage.

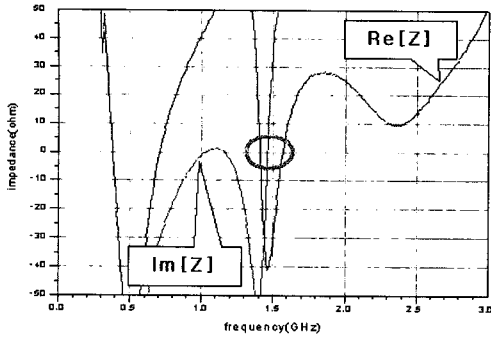


그림 5. 발진 조건  
Fig. 5. Oscillation condition.

그림 5는 그림 3에 표시한 기준면에서 발진기의 튜닝 전압이 10 V일 때 주파수에 따른 공진부 및 발진부의 임피던스 합을 나타낸 것으로, 약 1.5 GHz 근처에서 40 ohm의 부성 저항과 0 ohm의 리액턴스를 가짐으로써 선형 발진 조건이 충족됨을 확인할 수 있다. 튜닝 전압을 0~20 V까지 가변시키면서 선형 발진 조건을 보았을 때, 약 0.8~2.2 GHz의 대역에서 일정한 부성 저항을 가지면서 발진 조건이 충족됨을 확인할 수 있었다.

이러한 선형 발진 조건 아래에서 Harmonic Balance 기법을 이용하여 발진기의 튜닝 전압 대 주파수 특성 및 출력 전력, 위상 잡음 특성 등을 시뮬레이션하였다.

그림 6은 제어 전압 대 주파수 특성으로 제어 전압이 0~20 V일 때 발진 주파수가 0.8~2.2 GHz인 시뮬레이션 결과를 얻었다.

그림 7은 발진 대역에서의 출력 전력 및 평탄도를

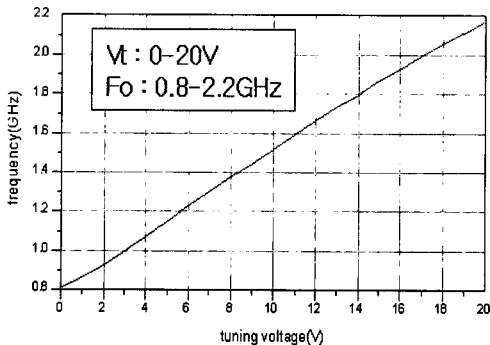


그림 6. 제어 전압 대 출력 주파수 특성  
Fig. 6. Oscillation frequency vs. tuning voltage.

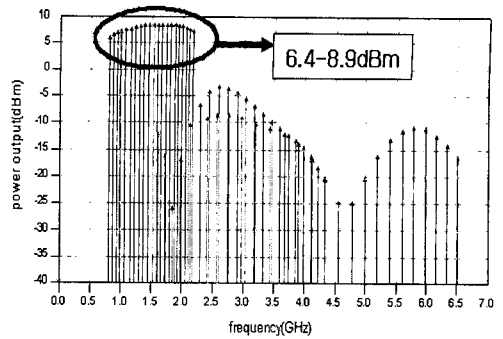


그림 7. 출력 전력 및 평탄도  
Fig. 7. Power output and flatness.

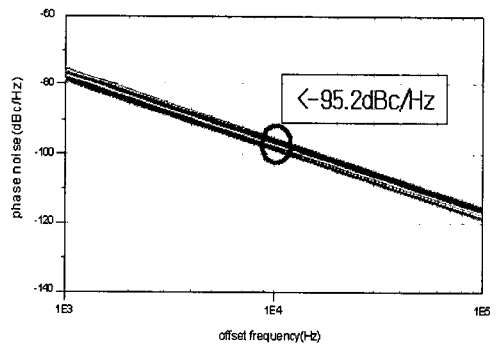


그림 8. 위상 잡음 특성  
Fig. 8. Phase noise characteristics.

보인 것으로, 6.4~8.9 dBm의 값을 갖는다.

그림 8은 위상 잡음 성능으로 10 kHz 오프셋에서  $-95.2$  dBc/Hz 이하의 값을 갖는다. 위상잡음의 simulation에서는 제조사의 Flicker noise model이 제공되지 않아 ADS™의 Flicker 잡음의 기본값인  $KF=0$ ,  $AF=1$ 로 고려하였다.

#### IV. 제작 및 측정 결과

지금까지 기술한 내용을 바탕으로 0.9 GHz~2.2 GHz의 광대역 전압 제어 발진기를 유전율이 4.5이고 탄젠트 손실이 0.02인 FR4 기판에 제작하였다. 전체 회로의 크기는 12.7 mm × 12.7 mm × 0.8 mm이다. VCO/PLL 신호 분석기를 이용하여 제어 전압 대 주파수 특성 및 출력 전력과 위상 잡음 특성을 측정하였고, 이를 그림 9, 10, 11에 제시하였다. 출력 주파수는 0~20 V에서 0.9~2.2 GHz이고, 출력 전력은  $5.3 \text{ dBm} \pm 1.1 \text{ dB}$ 이며, 위상 잡음 특성은 10 kHz off-

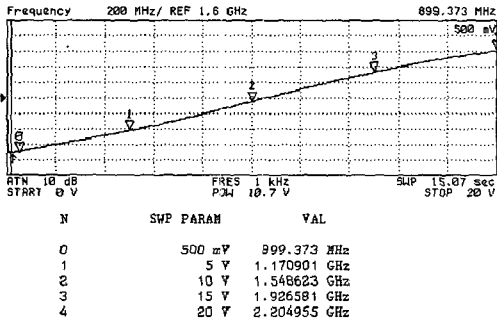


그림 9. 제어 전압 대 주파수 측정  
Fig. 9. Measured output frequency vs. control voltage.

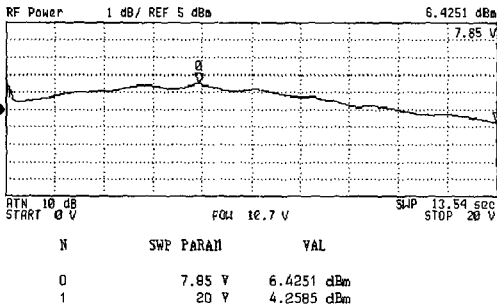


그림 10. 출력 전력과 평탄도 측정  
Fig. 10. Measured power and flatness.

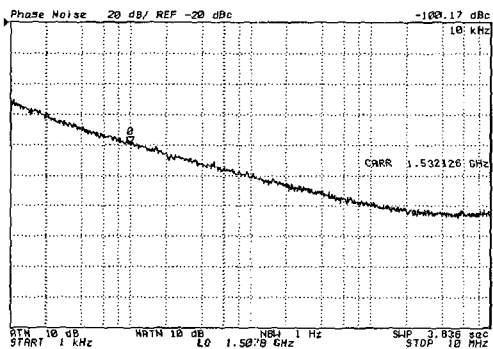


그림 11. 위상 잡음 특성  
Fig. 11. Phase noise characteristics.

set에서 1 V일 때  $-94.8$  dBc/Hz, 5 V일 때  $-97$  dBc/Hz, 10 V일 때  $-100.5$  dBc/Hz, 15 V일 때  $-98.2$  dBc/Hz, 20 V일 때  $-100.5$  dBc/Hz로 전 대역에 걸쳐  $-94.8$  dBc/Hz 이하의 값을 얻었다. 고조파 억압 특성은  $-15$  dBc 이하이고, 선형성은 평균  $65$  MHz/V이다.

그림 12는 제작한 전압제어발진기의 사진을 나타낸다.

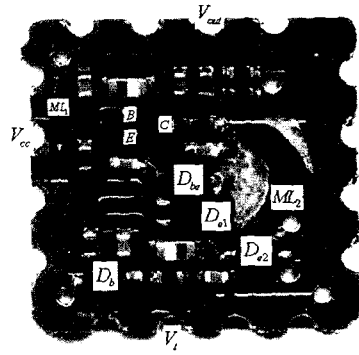


그림 12. 전압제어발진기 실물 사진  
Fig. 12. Photograph of VCO.

## V. 결 론

본 논문에서는  $0.9$  GHz~ $2.2$  GHz의 약  $1.3$  GHz의 대역폭을 갖는 광대역 전압 제어 발진기를 개발하였다. 베이스와 에미터 각각에 배랙터 다이오드를 사용하여 광대역을 확보하고 선형성을 좋게 하였으며, 또한 베이스와 에미터 사이에 배랙터 다이오드를 사용하여 전 대역에 걸쳐  $-94.8$  dBc/Hz @  $10$  kHz offset 이하의 일정한 위상 잡음 특성을 유지할 수 있었다. 또한 출력의 평탄도도  $\pm 1$  dB 이내에 들어오도록 하였다. 개발된 광대역 전압 제어 발진기는 위성 수신기의 IF인 L밴드의 주파수 합성기의 전압제어발진기로 사용이 가능한 스펙이나, 저가형 계측 장비나 산업용 UWB 레이다 등에 적용이 가능하다<sup>[5]</sup>.

## 참 고 문 헌

- [1] Yao-Huang Kao, Tzung-Hsiang Wu, "Study of wide-band VCO at low microwave band", 1999 Asia Pacific Microwave Conference Digest, vol. 1, pp. 48-51.
- [2] Allen Sweet, *MIC & MMIC Amplifier and Oscillator Circuit Design*, Artech House, pp. 188-189, 1990.
- [3] 남상욱, RF/Microwave 발진기 설계기술, 전파교육연구센터, 2003년.
- [4] J. C. Clifton, "A design approach for broadband varactor-tuned oscillators", *Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas*, IEE Collo-

quium on, May 1989.

[5] J. Park, C. Nguyen, "An ultra-wideband microwave radar sensor for characterizing pavement subsur-

face", 2003 International Microwave Symposium Digest, vol. 3, pp. 1443-1446.

### 구 본 산



2003년 2월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)  
2003년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 능동 및 수동 회로 설계, VCO, PLL

### 류 근 관

현재: 한밭대학교 정보통신공학과  
[주 관심분야] 초고주파 회로(MMIC, Hybrid) 설계, 안테나 설계

### 신 금 식



1997년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)  
1997년 3월~2004년 1월: (주)한국쌍신전자 통신연구원  
2004년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 발진기

및 주파수 합성기 설계

### 이 문 규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)  
1999년 2월~2002년 2월: 한국전자

통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원  
2002년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수  
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(MMIC, Hybrid) 및 수동 부품회로 설계

### 장 병 준

현재: 한국정보통신연구진흥원 선임연구원  
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로(MMIC, Hybrid) 설계, 무선통신시스템