

# Tuning range 개선을 위한 새로운 구조의 VCO 설계 및 제작

## Design and Implementation of the new structural VCO with improved tuning range

강 동 진\*, 김 동 옥\*  
Dong-Jin Kang, Dong-Ok Kim

### Abstract

In this thesis, design of a VCO(Voltage controlled Oscillator) with a novel tuning mechanism is presented for the Radar system. This circuit, the 9.5 GHz oscillator is designed and implemented by restructuring microstrip resonator to raise Q value and to require a wide frequency tuning range. This product is fabricated on 2.6 Teflon substrate and device is NE722S01. In this paper, The new microstrip resonator VCO is proposed to achieve the characteristic of a wide frequency tuning range. This microstrip resonator VCO shows the phase noise characteristic of -108.3 dBc/Hz at 1 MHz offset from the fundamental frequency, the output power of 5.7 dBm and the second harmonic suppression of -38 dBc for the VCO are obtained. The manufacture VCO shows a frequency tuning range of 193.8 MHz. The proposed micro trip resonator VCO can be used for X-band Radar System with required tuning range

**Keywords** : VCO(Voltage controlled Oscillator), microstrip resonator, second harmonic suppression

## I. 서 론

최근 전자통신 분야에 있어서 마이크로파 응용분야의 적용범위가 점점 넓어짐에 따라 국내에서도 그에 따른 많은 변화가 활발하게 진행되고 있으며 민간 기업뿐만 아니라 범국가적 차원에서도 조직적인 연구가 행하여져 각종 군사용 시스템, 항해 선박용 레이다 시스템 및 위성통신 그리고 가전까지 많은 진전을 이루었다. 그러나 일부 군사 장비나 초고주파 통신장비와 같은 특수 전자기기 등은 아직도 해외 선진국에 많이 의존하고 있는 상태이다. 그 예로서 군사용 및 항해 선박용에 사용되는 레이다 시스템은 아직도 많은 부분을 해외 선진국에 의존하고 있다. 또한 무선통신 반도체 시장의 성장은 휴대폰과 기지국 관련 칩이 전체시장의 97%를 차지하고 있으나, 무선 LAN, Radar 시스템, 지역채널 다지점 분배서비스(LMDS) 등 광대역 기술에 기반한 제품도 점차 강세를 띄고 있다. 전파는 빛과 같은 속도로 직진하고 물체에 부딪치면 반사·굴절·회절 또는 산란하는 것도 빛과 대단히 닮았다. 레이다는 전파의 이 성질을 이용한 것으로서 스캐너를 이용하여 전파를 발사하고 그것이 목표에 부딪쳐반사파(Echo)가 돌아올 때까지의 시간을 측정하여 거리를 알도록 되어있다. 현재 상선용 레이다에 할당된 주파수로는 9GHz대와 3GHz대의 두 가지가 있고 흔히 전자를 X-Band 레이다, 후자를 S-Band 레이다라 부른다. 이러한 주파수 호칭은 미육군 식이지만 현재 민간에서도 통용되고 있다. 전파의 주파수가 낮으면

비나 안개등으로 인한 감쇠가 심한 때에도 비교적 멀리까지 전파되지만, 같은 방위분해능을 얻기 위해서는 보다 큰 치수의 안테나를 필요로 하므로, 흔히 X-Band 레이다는 고분해능으로, S-Band 레이다는 원거리 탐지용으로 이용된다. 본 연구에서는 X-Band Radar detector용 전압제어 발진기에서 요구하는 광대역 특성을 만족시키기 위해 제안된 구조의 마이크로 스트립 결합을 통해 튜닝레인지 성능을 개선한 새로운 구조의 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다.

## II. 설계이론

### 1. 발진기이론

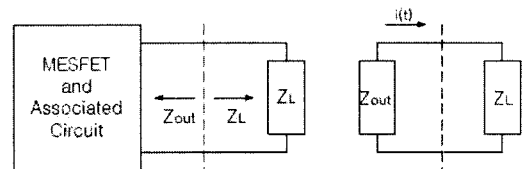


그림 1. 비선형 마이크로파 발진기  
Fig. 1. Nonlinear microwave oscillator

발진기는 부하 임피던스  $Z_L$ 에 비선형 임피던스  $Z_{OUT}(<0)$ 을 직렬로 연결하여 그림 2-1과 같이 표현할 수 있다. 이때  $Z_L$ 이 고조파 전류를 제거할 만큼 높은 Q-Factor를 갖고 있다고 보고 직렬공진시 공진 주파수 부근에서 큰 전류가 흐른다고 가정하자. 그러면 전류는 기본 주파수에 대한 성분만으로 다음의 식1과 같이 표현할 수 있다.

$$i(t) = I_0 \cos(\omega t) \tag{1}$$

접수일자 : 2009년 8월 7일  
최종완료 : 2009년 8월 7일  
\* 한국정보통신기술대학  
교신저자, E-mail : djikang@icpc.ac.kr

그림 1에서 KVL(Kirchhoff's Voltage Law)을 적용하면 다음과 같은식을 얻는다.

$$[Z_{out}(j\omega) + Z_L(j\omega)]I_0 = 0 \tag{2}$$

$Z_{out} + Z_L = Z_t + jX_t$ 로 치환하고,  $I_0$ 는 '0'이 아니므로

$Z_{out} + Z_L = 0$ 이 되어야 free-running 발진이 일어남을 알 수 있다. 즉  $Re(Z_L) > 0$ 이 되므로  $Re(Z_{out}) < 0$ 이 된다. 그러므로 발진을 하려면 능동 소자를 포함한 회로가 부성 저항을 가져야 한다. 다음 식3은 발진주파수를 결정하게 된다.

$$X_t(I_0, \omega) = 0 \tag{3}$$

또한, 발진 폭이 증가하면  $Re(Z_{out})$ 이 감소하고 결국 식 4에 만족하는 점에 도달하게 된다.

$$Z_{out}(I_0, \omega) = -Z_L(\omega) \tag{4}$$

만약  $I_0$ 가 식 4를 만족하는 점 이상으로 증가하면  $Re(Z_{out})$ 이 감소하고  $I_0$ 가 감소한다. 결국 식4를 만족하는 점까지  $Re(Z_{out})$ 의 크기가 상승하고 변화되었던  $I_0$ 는 다시 돌아올 것이므로 진류크기에 대해 안정하다. 그러므로 발진은 일정한 폭으로 유지된다. 식 4는 대신호에 대한 발진 조건이다. 그러나  $I_0$ 가 적은 경우에는 식4가 만족하는 발진 주파수와 같을 필요는 없다. 즉 FET 발진기가 High-Q 공진기를 포함하는 경우에는 공진기는 주파수를 결정하는 허수부 성분이 결정적인 역할을 하므로 주파수 천이를 일으키지 않는다.

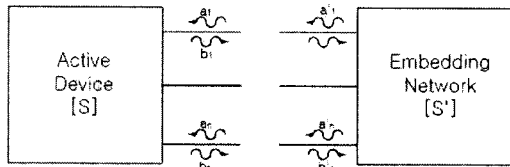


그림 2. 일반화된 발진기의 구조  
Fig. 2. Generalized oscillator configuration

발진기는 그림 2와 같이 능동 다단자 회로의 조합으로 구성된다. 능동 소자와 수동 소자에 대해 각각 행렬식 5, 6으로 표현할 수 있다.

$$[b] = [S][a] \tag{5}$$

$$[b'] = [S'] [a] \tag{6}$$

2. 발진기의 종류 및 비교

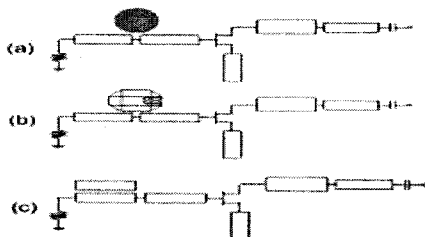


그림 3. 발진기의 종류  
Fig. 3. Kind of oscillator

발진기는 일반적으로 위의 그림과 같이 크게 (a)DR 공진기, (b)Hairpin공진기, (c)Microstrip 공진기를 이용한 구조로 나눌수가 있다. 각각의 구조는 각 사양에 따라 서로 간의 장단점을 가지고 있다. 표1은 일반적인 구조의 DR,

Hairpin, 마이크로 스트립 공진기를 이용하여 VCO를 측정 한 결과를 비교한 것이다. 각각의 구조는 서로간의 장단점을 가지고 있지만 tuning range만을 고려한다면 일반적으로 DR공진기의 경우 5~30 MHz, Hairpin 공진기의 경우 10~70 MHz, 마이크로스트립 공진기의 경우 10~100 MHz를 나타낼 수 있다

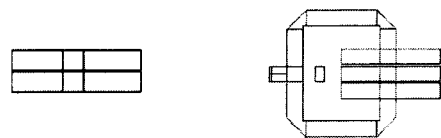
본 논문에서는 X-Band Radar detector용 전압제어 발진기에서 요구하는 광대역 특성을 만족시키기 위해 마이크로 스트립 공진구조를 개선한 제안된 구조의 마이크로 스트립 결합을 제안할 것이다.

표 1. DR, Hairpin, Microstrip 공진기를 이용한 VCO 비교  
Table 1. VCO comparison that use DR, Hairpin, Microstrip resonator

	DR 공진기	Hairpin 공진기	Microstrip 공진기
Output power	good	Very good	good
Phase noise	Very good	good	good
Harmonics	Very good	Very good	Very good
Tuning range	5~30 MHz	10~70 MHz	10~100 MHz

3. 새로운구조의 마이크로스트립 공진기

발진기의 위상잡음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로는 반도체 소자의 저주파 잡음인 1/f noise, 발진기의 능동 소자의 동작점에 의해 결정되는 저주파 잡음의 주파수 상향변환(up-conversion), 발진기의 공진 특성에 의한 상향잡음의 shaping에 의해 결정이 된다. 저주파 잡음수준이 낮은 소자로는 Si-BJT나 Si-Ge HBT등이 좋은 특성을 가지고 있으나 10GHz 대역에서는 상용적으로 사용할 수 있는 개별소자가 많지 않아 X대역에서는 이득이 높은 MESFET나 HEMT를 사용하고 있다. 일반적으로 MESFET이나 HEMT는 Si-BJT소자에 비해 저주파 잡음 수준이 10~20dB정도가 높은 것으로 알려져 있다.



(a) Microstrip resonator (b) New microstrip resonator

그림 4. 새로운 마이크로스트립 공진기 결합구조

Fig. 4. The proposed microstrip resonator

그림 4는 일반적인 마이크로스트립 결합구조와 제안된 마이크로스트립 결합구조를 보여주고 있다. 그림 2-4(a)에서 일반적인 겹 결합된 마이크로 스트립 공진기에서 J값은 아래와 같다.

$$J = \frac{Z_{oc} - Z_{oo}}{2Z_o^2} \tag{7}$$

위에 식에서 J값을 크게 하기 위해서는 even impedance 와 odd impedance의 차이를 크게 해야 한다. 이것은 간극을 작게 함으로써 얻을 수 있다. 그림 4는 가장 많이 사용되며 기본적인 공진기인 그림 (a)를 응용하여 대역폭 개선을 위하여 양방향에서 결합이 되게 설계하였다. 즉 그림

4(b)는 동조대역폭을 개선하기 위한 새로운 구조의 마이크로스트립 공진기이다. 그림 5는 일반적인 구조의 마이크로스트립 공진 발진기를 나타낸다.

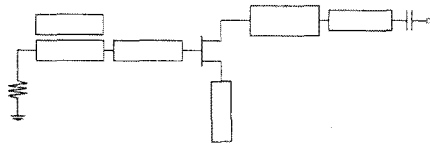


그림 5. 일반적인 구조의 마이크로스트립 공진 발진기

Fig. 5. The general microstrip resonator Oscillator

### III. 설계 및 제작

#### 1. 새로운 구조의 공진기를 이용한 전압제어 발진기 설계

본 논문에서는 발진기의 설계의 의해서 초고주파 비선형 설계도구인 Agilent 사의 ADS툴을 이용하여 설계를 하였다. Line Calculation을 통해 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스에 해당하는 폭과 파장을 구하였으며 공진부는 마이크로스트립 공진부 형태로 주파수는 9.5 GHz에 맞도록 설계하였다. 능동소자로는 저 잡음 지수를 갖고 위상잡음을 최소화할 수 있으며 부성저항을 쉽게 얻을 수 있는 소자인 GaAs MESFET인 NEC사의 NE722S01을 이용하였다. 기판은  $\epsilon_r=2.6$ ,  $H=0.54\text{mm}$ ,  $T=0.018\text{mm}$ 인 Teflon 기판을 사용하였다.

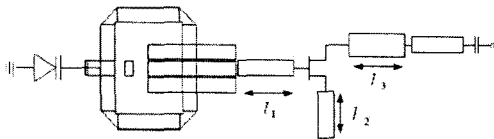


그림 6. 제안된 구조의 마이크로스트립 VCO  
Fig. 6. The proposed microstrip VCO

그림 6의 발진기는 실무에서 가장 많이 사용하는 구조로 회로구성이 간단하고 부하변동에 따른 주파수 변화와 출력변화가 작은 소스 직렬 케환형으로 구성하였다.

그림 6의 회로가 직렬 케환형 마이크로스트립 공진 발진기의 구조를 나타내고 있다면, 이때 마이크로스트립 공진기는 그림 7과 같이 대역저지 필터 특성을 갖게 된다.

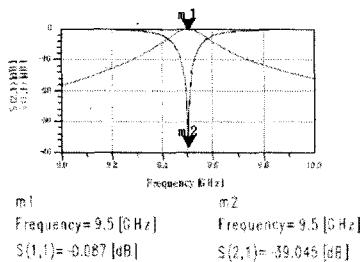


그림 7. 마이크로스트립 공진기.  
Fig. 7. The microstrip resonator

초기 발진 조건은

$$\text{Re} [ Z_{out} ] < 0 \quad (8)$$

$$\text{Im} [ Z_{out} ] = -\text{Im} [ Z_L ] \quad (9)$$

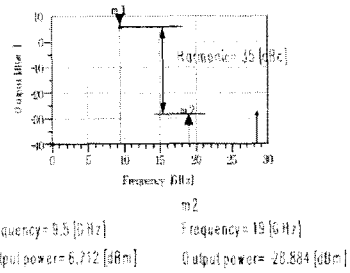


그림 8. 마이크로스트립 발진기의 전력 스펙트럼

Fig. 8. Harmonic characteristics of the microstrip Oscillator.

이다. 식 (8), (9)에서 실수부는 부성저항 값을 나타내며 허수부는 0을 나타낸다. 11, 12와 13의 길이를 조정하여 위상 조건과 부성저항 발생조건을 만족시킬 수 있다. 그림 7의 마이크로스트립 공진기에서 결합이 잘 일어나도록 11을 조절하였으며 FET의 게이트 단을 바라본 반사계수가 최대가 되도록 12를 최적화하고 공진부의 결합선로 길이 11을 조절함으로써 발진 주파수를 쉽게 조절할 수 있도록 설계하였다. 그림 8, 그림 9는 시뮬레이션 결과로 발진기의 전력스펙트럼과 Phase noise을 나타내고 있다. 그림 8에서는 전력스펙트럼이 -35 dBc 이상의 2차 고조파 특성을 나타내고 있다. 그림 3-4 또한 Phase noise가 각각 1 MHz offset에서 -143.5 dBc, 100 kHz offset에서 -114.2 dBc을 나타내었다.

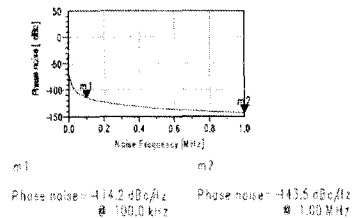


그림 9. 마이크로스트립 발진기의 Phase noise  
Fig. 9. Phase noise of the microstrip Oscillator.

#### 2. 새로운 구조의 공진기를 이용한 전압제어 발진기 제작

그림 10는 발진기 전체 회로를 나타낸 그림으로 각각의 작은 회로로 구분하여 설명하고 있으며 그림 11은 전압제어 발진기의 실물사진을 나타내고 있다.

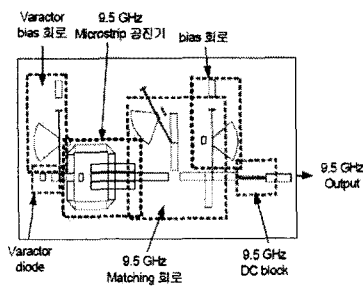


그림 10. 마이크로스트립 발진기의 layout  
Fig. 10. The microstrip Oscillator layout

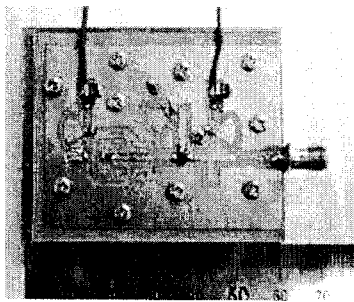


그림 11. 마이크로스트립 발진기의 실물사진  
Fig. 11. Photograph of the microstrip VCO

IV. 실험 및 측정 결과

회로 제작을 위한 테플론 기판의 비유전율( $\epsilon_r$ )은 2.6, 유전율 높이(H)는 0.54mm, 그리고 동판 두께가 0.018mm이다. 바랙터 다이오드는 MA/COM사의 MA-46471를 사용하였다. 제안된 구조의 전압제어 발진기의 발진주파수를 측정하기 위한 장비로는 스펙트럼 분석기 HP8563E를 이용하였다. GaAs FET의 바이어스는  $V_{ds}=3.0\text{ V}$ ,  $I_{ds}=30\text{ mA}$ 이고, 게이트 바이어스는 자기 바이어스 형태로 취하여 기본주파수의 출력을 높일도록 하였다. 그림 12는 제안된 구조의 전압제어 발진기의 측정 결과로써 5.7 dBm의 출력과 -38 dBc의 고조파 억압특성을 나타내고 있다. 그림 13은 1 MHz offset에서 제안된 구조의 전압제어 발진기의 위상잡음 특성을 측정 한 결과이다. (-108.3dBc/Hz@1MHz) 다음으로 그림 14는 제안된 구조의 전압제어 발진기의 동조된 스펙트럼을 측정 한 결과이다. 그림 15에서는 전압제어 발진기의 바랙터 다이오드에 인가된 전압에 따른 주파수 변화폭과 동조 대역폭 내에서의 출력 변화를 그래프로 나타내고 있다.

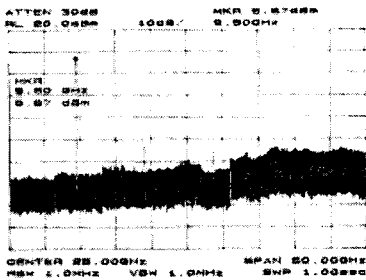


그림 12. 마이크로스트립 발진기의 고조파 억압특성  
Fig. 12. Harmonic characteristics of the microstrip VCO

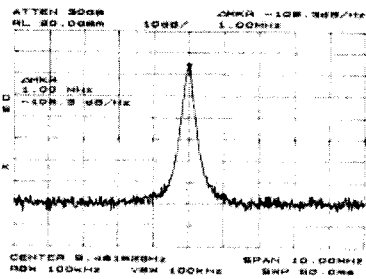


그림 13. 마이크로스트립 전압제어 발진기의 위상잡음 특성(span 10MHz)  
Fig. 13. Phase noise characteristics of the microstrip VCO(span 10MHz)

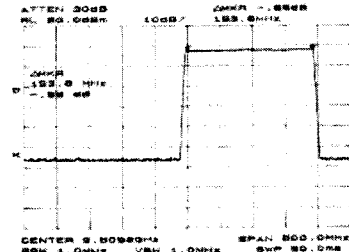


그림 14. 마이크로스트립 발진기의 동조된 스펙트럼(span 500MHz)  
Fig. 14. Measured tuning range of spectrum(span 500 MHz)

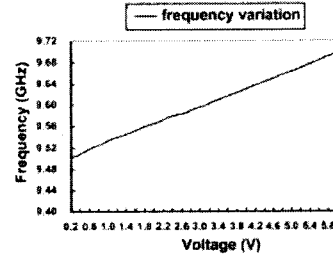


그림 15. 튜닝 전압에 대한 주파수 응답.  
Fig. 15. Measured tuning range of Oscillator

표 2. 제작된 마이크로스트립 전압제어 발진기의 성능  
Table 2. Characteristics for the microstrip VCO

	목표치	실제치	측정치
Frequency	9.5 GHz	9.5 GHz	9.5 GHz
Output power	5 dBm	6.7 dBm	5.7 dBm
Phase noise		- 114 dBc/Hz@100kHz	- 80.0 dBc/Hz@100kHz
		- 130 dBc/Hz@500kHz	- 98.78 dBc/Hz@500kHz
	- 110 dBc/Hz@1MHz	- 140 dBc/Hz@1MHz	- 108.3 dBc/Hz@1MHz
Harmonics	-30 dB	-35 dB	-38 dB
Tuning range	120 MHz	210 MHz	193.8 MHz
Tuning flatness	± 1 dBc 이하	± 0.35 dBc 이하	± 0.33 dBc

V. 결론

본 논문에서는 레이더 시스템의 핵심기술인 광대역 특성을 갖는 제안된 구조의 전압제어 발진기를 설계하였다. 전압제어 발진기의 공진부는 안정성이 뛰어나고 온도 변화에 따른 영향이 적고 Q값이 높은 유전체 공진기를 많이 이용하였으나 최근 RF부품들의 소형화, 경량화, 고집적화 경제성등의 요구에 따라 Hair-pin과 같은 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)화 하기에 적합한 평면 구조의 공진기를 사용하였다. 또한 바랙터 다이오드를 이용하여 전기적으로 발진주파수를 동조할 수 있도록 하였다. 능동소자는 NEC사의 NE722S01를 이용하여 9.5 GHz를 설계하였다. 제안된 구조의 VCO 회로의 가장 큰 장점은 일반적인 구조의 VCO보다 광대역 특성이 우수함을 나타내었다.(193.8 MHz) 설정 주파수 9.5 GHz에서 5.7 dBm의 출력과 -38 dBc의 고조파 억압특성을 나타내었고,

각각의 1MHz, 500 kHz, 100 kHz의 offset에서 마이크로스트립 발진기의 만족할만한 위상잡음 특성을 나타내었다. (-108.3 dBc/Hz @1MHz, -98.78dBc/Hz@500kHz, -80.0 dBc/Hz@100kHz) 제한된 구조의 VCO 회로는 군사용 전자장비, 선박용 통신기기, 차량용 감지기 등에 응용하여 사용할수 있으리라 기대된다.

[ 참고 문헌 ]

- [1] E. Holtzman, *Solid-state microwave power oscillator design*, Artech House, Boston. London., chap. 3, 1992.
- [2] 이상철, 강정수 “레이다 공학” 보성문화사 chap.3. 1999
- [3] A. P. S. Khanna and J. Obregon, “Microwave Oscillator Analysis,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol MTT-29, pp. 606-607, June 1981.
- [4] G. D. Vendelin, W. C. Mueller, A. P. S. Khanna. and R. Soohoo, “A 4 GHz DRO,” *Microwave Journal*, June 1986, pp. 151-152.
- [5] K. Cha and S. Kawasaki, “Transponder Using Self-Oscillating Mixer and Active Antenna,” *1994 IEEE MTT-S inter. Symp.*, pp. 425-428.
- [6] 이영준 “ Feedforward 구조의 주파수 체배기를 이용한 PLDRO의 설계 및 제작” 광운대학교 석사학위논문, 광운대학교 대학원, 전자공학과, pp41-45, 2002.
- [7] Y. D. Lee, et al. “Voltage controlled hair-pin resonator oscillator with new tuning mechanism” *IEE Electronics Letters*, vol. 36, no. 17, pp. 1470-1471. Aug. 2000.
- [8] 이영준 “ 단거리 전용통신용 위상잡음 특성을 개선한 유전체공진 발진기” 제1회 ITS학회 학술대회, pp. 134-137, 2002.
- [9] 장재혁 “ 동조대역폭 개선을 위한 Push-Push 발진기 설계 및 제작” 석사학위논문, 광운대학교 대학원, 전자공학과, pp. 26-30, 2002.
- [10] Ed Henicle Trans-Tech, “VCO Design Using Coaxial Resonators” *RF Design*. pp. 50-55, Nov. 1995



김 동 옥

1991년 서울산업대학교 (공학사).  
 1998년 광운대학교 (공학석사).  
 2001년 한국항공대학교 (공학박사).  
 2003년~현재 한국정보통신기술대학  
 이동통신설비과 교수.

<관심분야> 디지털통신시스템, ad hoc. Network, ITS, 차세대이동통신시스템 등

<e-mail> dokkim@icpc.ac.kr



강 동 진

1993년 광운대학교 전자통신공학과 졸업  
 2004년 광운대학교 전자공학과(공학석사)  
 2008년 광운대학교 전자공학과(공학박사)  
 2003년~현재 한국정보통신기술대학 이동통신설  
 비과 교수

<관심분야> 무선이동통신시스템설계,  
 RF/Microwave Circuit Design 등

<e-mail> djkgang@icpc.ac.kr