

# 임피던스 인버터와 고조파 발진기를 이용한 VCO 설계 및 제작

## Design and Implementation of a VCO Employing Harmonic Oscillators and a Impedance Inverter

장 정 석\*      정 연 흥\*\*      도 지 훈\*\*\*      김 대 응\*\*\*      흥 의 석\*\*\*\*  
(Jeong-Seok Jang)    (Yeun-Hong Jeong)    (Ji-Hoon Do)    (Dae-Woong Kim)    (Ui-Seok Hong)

### 요 약

본 논문에서는 Push-Push 구조와 고임피던스 인버터를 이용하여 개선된 VCO를 설계 및 제작하였다. 두 개의 고조파 발진기를 Push-Push 구조로 결합시킴으로써 기본주파수 억압특성을 개선하였으며, 고조파 출력을 향상시켰다. 이에 따른 위상잡음 증가는 고임피던스 인버터를 이용하여 공진기와 병렬선로 사이의 결합특성 개선을 통하여 억제하였다.

### Abstract

In this paper, improved VCO(voltage controlled oscillator) with push-push structure and high impedance-inverter is designed and implemented. Two harmonic oscillators are combined into push-push structure. As a result, the fundamental suppression and the output power have been progressed. For the improved coupling characteristics between hair-pin resonator and two parallel microstrip line using high impedance inverter, the phase noise has been suppressed.

**Key words:** VCO, push-push 구조, harmonic, resonator, phase noise

## 1. 서 론

미래의 이동통신 서비스 및 유비쿼터스 시대에 맞는 서비스를 제공하기 위해 현재 지상 시스템의 용량으로는 한계가 있다. 특히 급격히 발전하고 있는 지능형 교통시스템(ITS: Intelligent Transport System) 분야 역시 앞으로 다가올 최첨단 유비쿼터스 시스템과 유

기적인 연동을 위해서는 이러한 점이 큰 이슈가 될 것으로 예상된다 [1-3].

현재 포화상태에 다다른 기존의 지상 통신 시스템 대안으로 위성통신이 큰 주목을 받고 있다. 위성통신은 통신 거리 및 지형적인 영향이 적어 지상통신망으로 통신이 어려운 지역과 지물 등에 의한 통신 장애를 줄일 수 있다. 또한 지형 조건에 상관없이 신

† 이 논문은 2008년도 광운대학교 연구년에 의하여 연구되었음.

\* 주저자 : 광운대학교 전과 공학과 박사과정

\*\* 공저자 : 광운대학교 전과 공학과 석사과정

\*\*\* 공저자 : 광운대학교 전과 공학과 박사과정

\*\*\*\* 공저자 : 광운대학교 전과 공학과 정교수

† 논문접수일 : 2009년 7월 22일

† 논문심사일 : 2009년 8월 17일(1차), 2009년 8월 26일(2차), 2009년 9월 28일(3차)

† 게재확정일 : 2009년 9월 30일

속한 통신망조건성과 회선 지정의 용이성은 전시 및 천재지변 등의 상황 위도 신뢰성 있는 통신망의 구축을 가능하게 한다. 뿐만조아니라 빔 폭의 조정을 통하여 수신 지역 조정과 동시 통신이 가능하 상황 라 같은 강점을 가지는 위성통신과을 통하을 통해 현재 개별적으로 운영되고 있는 ITS 시스템을 하나을 권역으로 통합하기 위한 기술이 개발되고 있다 [4, 5].

하지만 최근 위성통신 분야에 사용되고 있는 C-band와 Ku-band 대역 등이 포화상태에 이르러 K-band 이상의 주파수 대역을 사용하기 위한 연구가 진행 중이나 이에 따른 부품 및 시스템의 개발은 그리 충분치 못한 실정이다 [6].

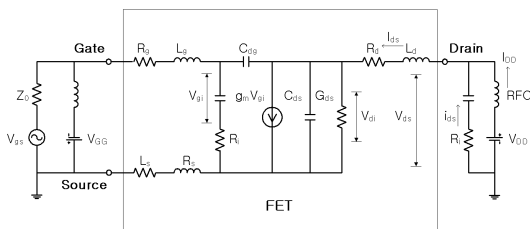
본 논문에서는 위성통신과 ITS 분야를 결합한 광역권 교통 정보 수집 및 제어 통합 시스템에서 필요한 새로운 구조의 위성통신용 K-band VCO를 제안하였다.

## II. 본 론

### 1. 고조파 발진기의 비선형 해석

선형 발진기 설계방법은 FET의 비선형 특성에 의한 고조파 신호의 정도를 예측할 수 없으므로, 고조파 발진기의 설계를 위해서 비선형 해석이 반드시 필요하다. 일반적으로 FET 발진기에서의 고조파 출력신호는 소자의 비선형성, 바이어스 설정에 의한 전류 정류 작용에 발생된다 [7, 8]. 이 중 발진기 해석을 위하여 단순화된 FET의 등가회로에서 비선형 요소는  $C_{gs}$ ,  $g_m$ ,  $G_{ds}$  등이 있다.

또한 바이어스 조건에 의한 고조파 발생은  $V_{GS}=0$ 와



<그림 1> GaAs MESFET의 비선형 등가회로  
<Fig. 1> Nonlinear equivalent circuit of GaAs MESFET

$V_{GS} = V_p$ (Pinch-off 전압)의 조건에서 해석된다.  $V_{GS}=0$ 의 경우 게이트 축이 전방향 전도(forward conduction) 되도록 바이어스되기 때문에 입력 파형  $V_{gs}$ 는 위상이 반전된 전파 전압 정류가 되고 다음과 식 (1)과 같이 푸리에 급수로 표현된다.

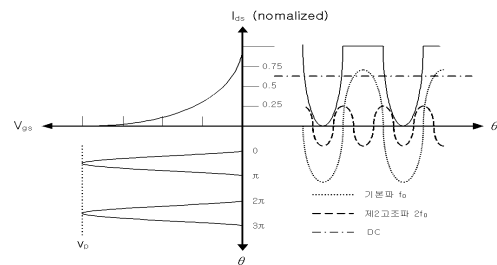
$$V_{gs} = -\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \sin\theta + \frac{2}{\pi} \left( \frac{\cos 2\theta}{3} + \frac{\cos 4\theta}{15} + \frac{\cos 6\theta}{35} + \dots \right) \quad (1)$$

이 때  $I_{ds}$ 와  $V_{gs}$ 의 관계는 다음 식 (2)의 형태를 가진다. 입력 전압  $V_{gs}$ 를 식 (2)에 적용하여 구한  $I_{ds}$ 는 원하는 고조파를 포함하는 정류 파형이 나타난다. 다음 <그림 2>는 A급 바이어스 즉  $V_{GS}=0$  적용 시 파형정류에 의한 고조파 발생을 보여준다.

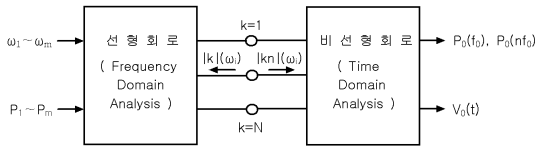
$$I_{ds} = \left( 1 - \frac{V_{gs}}{V_p} \right)^2 (I_{dss} + G_{ds} V_{ds}) \quad (2)$$

바이어스 전압이  $V_{GS}=V_p$ 인 경우에는 입력파형은 반파 정류된다. B급 바이어스된 이상적인 모델에서 반파정류 입력의 경우 기본파 대 2차 고조파 효율이 A급 바이어스보다 개선되지만, 낮은 공급 전원의 동작점 선택으로 낮은 기본파 발진 출력과 이에 낮은 고조파 출력이 나타나며 낮은 위상잡음 특성을 가진다. 따라서 고조파 발진기 설계할 경우 A급 바이어스를 사용하는 것이 바람직하다.

일반적인 발진기의 비선형 설계 방법은 주파수 영역 해석, FDSB(Frequency Domain Spectral Balance), HB(Harmonic Balance) 등이 있다 [9, 10]. 본 연구에



<그림 2> A급 바이어스 파형 정류에 의한 고조파 발생  
<Fig. 2> Harmonic generation due to the class a biased waveform rectification



<그림 3> HB 방법을 위한 회로 해석구조

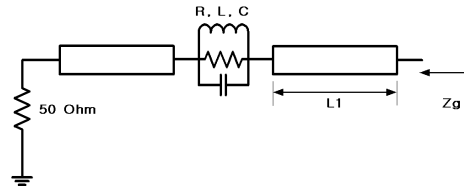
<Fig. 3> Analysis structure of circuit for HB method

서는 비교적 설계 방법이 간단한 HB 해석 설계 방법을 사용하였다. HB 해석 설계 방법은 <그림 3>과 같이 선형회로와 비선형회로의 접점에서 선형 소자의 주파수 해석에 의한 유입전류와 비선형 소자의 시간영역 해석에 의한 유입전류가 KCL(Kirchhoff's Current Law)에 의해 동일하도록 오차 제어하는 알고리즘을 적용하고 원하는 출력을 얻는 방법이다.

## 2. 고임피던스 인버터를 이용한 발진기의 위상잡음 개선

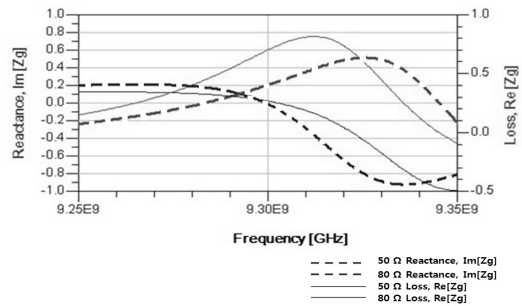
초고주파 발진기의 위상잡음 특성에 영향을 주는 주요 요인으로는 반도체 소자의 flicker 잡음, 대신호 조건에서의 잡음지수 및 공진기의 특성 등 여러 가지가 있다. 이 중 상향 변환된 flicker 잡음을 줄이는 방법으로는 낮은 잡음의 능동소자 선택, high Q 공진기 사용, 적절한 바이어스 설정 등의 일반적 방법 외에 외부 피드백 회로 삽입 방식이나 피드포워드 증폭기 방식으로서 flicker 잡음을 상쇄시키는 경우가 있다 [11]. 그러나 통신 시스템에서 국부발진기의 경우 부피, 질량, 소모전력 등의 제한적 요소가 많기 때문에 이러한 방법을 사용하기에는 부적당하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 헤어핀 공진기가 가지고 있는 Q 값이 손실 없이 발진기의 능동소자에 전달될 수 있도록 결합 선로의 간격을 조정하여 공진기 필터의 Q 값을 유지하도록 하는 고임피던스 인버터를 이용하였다 [12].

헤어핀 공진기는 마이크로스트립 전송라인과 결합하였을 때, 다음 <그림 4>와 같이 R, L, C 직렬 공진 회로로 등가화할 수 있다. 이 때 대역저지필터로서 원하는 주파수를 충분히 되반사시켜야 한다. 대역 저지필터의 반사손실과 반사선택도는 부하로 전



<그림 4> 헤어핀 공진기 등가회로

<Fig. 4> Equivalent circuit of hairpin coupled to a microstrip transmission line



<그림 5> 공진 주파수 근처에서의 Zg의 궤적

<Fig. 5> The trace of Zg around resonant frequency

달되는 에너지와 위상잡음 특성에 영향을 준다. 이는 공진기의 Q-factor와 직접적인 관계가 있다. 따라서 발진기의 선형설계 뿐만 아니라 출력과 위상잡음 등을 예측하는 비선형 설계 시 실제 사용되는 공진기의 정확한 모델링이 필요하다 [12].

<그림 5>는 <그림 4>의 L1의 임피던스를 50Ω에서 80Ω으로 변화시켰을 때 Zg의 궤적을 모의 실험한 것이다. 50Ω 전송라인보다 80Ω의 전송라인을 이용한 경우가 공진주파수 근처에서 reactance, Im(Zg) 성분 변화의 기울기가 크며, loss, Re(Zg) 성분이 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이와 같은 결과는 공진회로가 능동소자를 포함한 부하와 직렬로 연결되었을 때 external Q가 크게 되어 결과적으로 loaded Q를 증가시키게 된다 [12, 13]. 이 때 loaded Q의 증가는 결국 발진주파수 근처의 위상잡음 특성이 개선됨을 의미한다. 이론적으로는 마이크로스트립 전송라인의 임피던스를 높게 할수록 공진주파수 근처에서 reactance, Im(Zg) 성분 변화의 기울기가 급격하고, loss Re(Zg) 성분이 작아지지만 실제 마이크로스트립 전송라인을

구현함에 있어서 물리적 한계로 인하여 80Ω에서 최적화를 하였다.

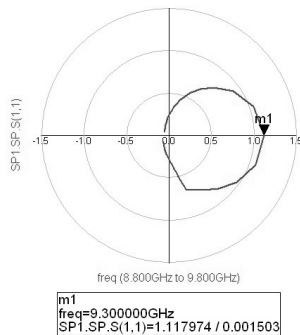
### 3. 고임피던스 인버터를 적용한 Push-Push VCHO (Voltage-Controlled Harmonic Oscillator) 설계

이론적인 Push-Push 구조는 각각의 발진기에서 발생한 기본파는 서로 180° 위상 차이를 가지기 때문에 완전히 억압된다. 하지만 제작 과정의 오차와 발진기를 구성하는 소자들의 오차로 인해 상대적으로 큰 출력의 기본주파수를 억압하는데 한계가 있다. 또한 낮은 출력을 갖는 2차 고조파 성분을 결합하기 때문에 최종 출력 또한 낮아진다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 고조파 발진기를 이용하였다.

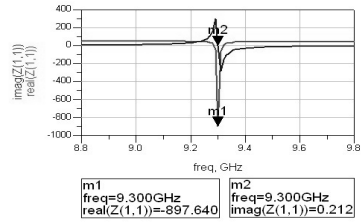
일반적인 Push-Push 구조는 위상잡음이 나쁘다는 단점이 있다. 뿐만 아니라 각각의 발진기를 고조파 발진기로 설계하게 되면 위상잡음이 더욱 나빠지게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 공진부에 고임피던스 인버터를 적용하였다.

선형설계 후 HB(Harmonic balance) 기법을 이용하여 발진기의 비선형 모의실험을 통하여 출력, 고조파 특성 등을 얻었다. 다음 <그림 6>과 <그림 7>은 게이트 입력단에서 개방루프 이득과 부성저항의 모의실험 결과이다. 또한 <그림 8>은 제안된 Push-Push 발진기의 출력 스펙트럼을 보여준다.

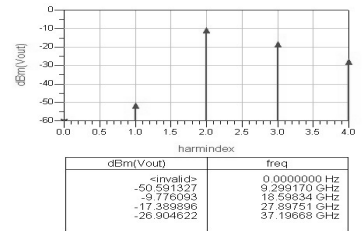
최종 VCHO를 구성하는데 가장 중요한 요소는 제



<그림 6> 개방루프 이득과 위상  
<Fig. 6> Open loop gain and phase in the polar chart



<그림 7> 위상과 부성저항 특성  
<Fig. 7> The characteristics of phase and negative resistance in the frequency domain

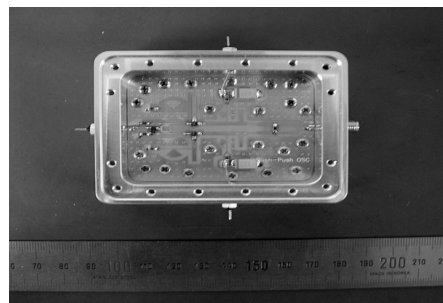


<그림 8> 출력 스펙트럼  
<Fig. 8> Output spectrum of the proposed oscillator

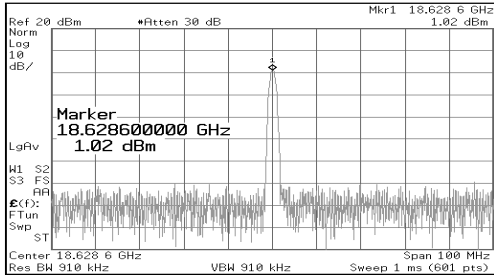
어전압에 따른 발진 주파수의 선형적 변화이다. 이를 위하여 적은 전압의 조정만으로 큰 리액턴스 값을 얻기 용이한 Toshiba사의 바랙터 다이오드 1S306을 이용하였다 [14].

### 4. 제작 및 측정

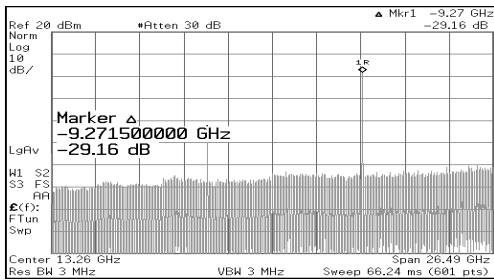
제안한 VCHO를 측정하기 위하여 측정 장비로 Agilent 사의 E4440A PSA를 이용하였다. 또한 안정된 전력 공급과 전압 조절을 위하여 DC 전압공급기



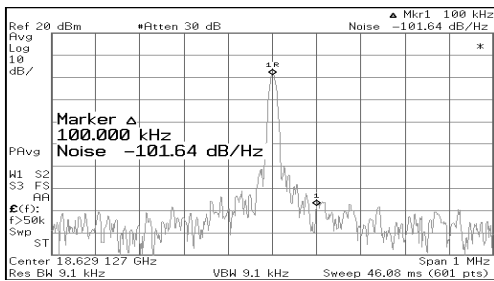
<그림 10> 제작된 VCHO 실물사진  
<Fig. 10> Photograph of the implemented VCHO



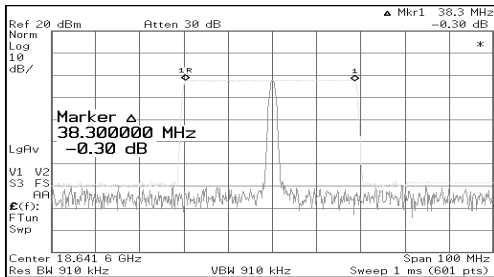
(a) 출력 스펙트럼  
(a) Output spectrum



(b) 기본 주파수 억압특성  
(b) Fundamental suppression characteristic



(c) 위상잡음 특성 (offset 100kHz)  
(c) Phase-noise characteristic (offset 100kHz)



(d) 주파수 동조 대역  
(d) Frequency tuning range

<그림 11> 제작된 VCO 특성  
<Fig. 11> Characteristics of the implemented VCO

는 동사의 E3640A를 사용하였다.

<그림 10>은 제작된 VCHO의 실물도이다.

GaAs MESFET 소자의 바이어스는  $V_{ds}=3V$ ,  $I_{ds}=40mA$  이고, 게이트 바이어스는 자기바이어스 형태를 취하였으며 바랙터 다이오드 0~-12V까지 가변시키면서 주파수와 출력의 변화를 측정하였다. 다음 <그림 11>은 제작된 VCHO의 측정 결과이다.

다음 <표 1>은 본 연구에서 제안한 VCHO의 측정 결과를 정리한 표이다. 측정 결과 기존의 기본 주파수 발진기를 이용한 Push-Push 발진기에 비해 제안된 구조를 가지는 발진기는 개선된 기본 주파수 억압특성이 나타났다. 또한 기존의 Push-Push 구조의 단점이었던 위상잡음 특성의 감쇠를 임피던스 인버터를 적용함으로써 보상하였다. 18.6GHz의 100kHz offset 주파수에서에서 -101.64dBc/Hz의 위상잡음 특성이 나타났다. 제안된 VCHO는 38.3MHz의 주파수 동조 대역폭을 나타내었으며, 동조 대역 내에서  $\pm 0.19dB$ 의 평탄도를 보였다.

<표 1> 제작된 VCHO의 측정결과

<Table 1> Measured results of the implemented VCHO

	제안된 VCHO
발진주파수	18.6GHz
최대출력파워	1.02dBm
최대기본파억압	-29.16dBc
위상잡음	-101.64dBc/Hz(offset 100kHz)
동조 대역폭	38.30MHz
평탄도	$\pm 0.19dB$

<표 2> 발진기의 특성 비교

<Table 2> Comparison of oscillator characteristics

	Y.D. Lee[12]	H. Xiao[15]	This Work
주파수	24.42GHz	21.68GHz	18.6GHz
출력	6.1	8.4	1.02
기본파 억압특성	-22	-26	-29.16
위상잡음	-78.5GHzc/Hz offset 100kHz	-100.5dBc/Hz offset 1Hz	-101.64dBc/Hz offset 100kHz
동조 대역폭	20.56MHz		38.30MHz
평탄도	$\pm 0.33dB$		$\pm 0.19dB$

제작된 VCHO의 측정 결과는 모의실험 결과의 몇 가지 차이점을 보였다. 이는 설계상에 있어서 발진기의 공진부 모델링의 오차와 능동소자의 비선형 모델값의 오차에 기인한 것으로 분석된다.

### III. 결 론

본 논문에서는 K-band 대역의 새로운 구조의 VCO를 제안하였다. 높은 주파수의 신호원을 얻기 위하여 Push-Push 구조를 고조파 발진기를 적용하여 기본파 억압특성과 2차 고조파 출력을 개선하였다. 또한 Push-Push 발진기가 가지는 위상잡음 특성의 저하를 개선하기 위하여 고임피던스 인버터를 적용하였다. 그 결과, 발진 주파수 18.6GHz에서 1.02dBm의 출력전력, -29.16dBc의 기본 주파수 억압 특성과 100kHz offset 지점에서 -101.64dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 얻을 수 있었다. 또한, 바랙터 다이오드의 제어어를 통해 38.30MHz의 발진 주파수 동조 대역 특성과  $\pm 0.19$ dB의 평탄도 특성을 얻을 수 있었다.

제안된 발진기는 기본 주파수가 아닌 2차 고조파를 이용하기 때문에 하나의 발진기 회로로써 주파수 체배기를 사용할 때보다 소형화 할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 임피던스 인버터를 적용한 VCHO를 제작하여 우수한 위상잡음 특성을 유지할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Kohno, "ITS and mobile multi-media communication in Japan," *Proc. Telecommunication Technique Workshop for ITS*, pp. 9-33, May 2000.
- [2] F. Kuo, W. Effelsbery, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, *Multimedia Communications*, Prentice Hall 1998.
- [3] ETRI & Gartner Consulting, *50대 전략품목 시장 보고서: Telematics*, ETRI, 2001. 10.
- [4] 최숙양, 신재명, 한대철, 문학룡, "국도 ITS 위성 통신 도입여건에 관한 연구," *한국ITS학회 추계 학술대회 논문집*, pp. 97-102, 2005. 11.
- [5] KT, *위성 통신 및 단거리전용 통신을 이용한 지능형 교통서비스 시스템 및 그 방법*, 특허등록번호 1007881570000, 2007.
- [6] P. Miller, "Ka-band-The future of satellite communication?," *Satellite & Broadband Magazine*, pp. 12-28, Sept. 2007.
- [7] J. Lin and T. Itoh, "Tunable active bandpass filters using three-terminal MESFET varactors," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 2, pp. 921-924, June 1992.
- [8] W. R. Curtice and M. Ettenberg, "A nonlinear GaAs FET model for use in the design of output circuits for power amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 33, no. 12, pp. 1383-1394, Dec. 1985.
- [9] V. Hwang and T. Itoh, "An effective approach for large-signal modeling and analysis of the GaAs MESFET," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 35, pp. 396-402, April 1987.
- [10] S. A. Maas, *Nonlinear Microwave and RF circuits*, Artech House, Norwood, 2003.
- [11] J. K. A. Everard and C. Broomfield, "Flicker noise removal in microwave oscillators using GaAs based feedforward amplifier," *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp.*, pp. 156-160, June 2001.
- [12] Y. D. Lee, M. H. Lee, K. H. Lee, W. P. Hong, and U. S. Hong, "Voltage-controlled Hair-pin resonator oscillator with new tuning mechanism," *Electron. Lett.*, vol. 17, pp. 1470-1471, Aug. 2000.
- [13] M. Q. Lee, K. K. Ryu, and I. B. Yom, "Phase noise reduction of microwave HEMT oscillators using a dielectric resonator coupled by a high impedance inverter," *ETRI Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 199-200, Dec. 2001.
- [14] Toshiba, *1SV306 data sheet*, 1997.
- [15] H. Xiao, T. Tanaka, and M. Aikawa, "Push-push oscillator with simplified circuit structure," *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 1545-1547, Nov. 2002.

저자소개



장 정 석 (Jang, Jeong-Seok)

2006년 3월 ~ 2008년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사  
2008년 : 광운대학교 박사과정 (전파공학과)



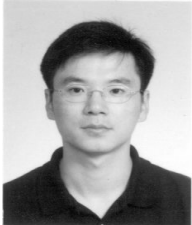
정 연 홍 (Jeong, Yeun-Hong)

2007년 3월 ~ 2009년 8월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사



도 지 훈 (Do, Ji-Hoon)

2004년 3월 ~ 2006년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사  
2008년 2월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)



김 대 웅 (Kim, Dae-Woong)

1990년 3월 ~ 1992년 2월 : 광운대학교 전파공학과 공학 석사  
1999년 2월 ~ 2006년 2월 : (주) 에이스테크놀로지 책임연구원  
2006년 3월 ~ 현재 : (주) 에이스안테나 책임연구원  
2007년 8월 : 광운대학교 박사과정 수료 (전파공학과)



홍 의 석 (Hong, Ui-Seok)

1973년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학부 교수  
1982년 11월 : 독일 Aachen 공대 전자 공학과 공학박사  
2001년 1월 ~ 2001년 12월 : 한국통신학회 회장  
2002년 5월 ~ 2003년 12월 : 한국ITS학회 초대회장