

인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 UTIS용 저 위상잡음 발진기 설계

Design of a Low Phase Noise Oscillator Using an Interdigital Hairpin Resonator for UTIS

정태성* 이현욱** 권성수*** 이명길** 이종철**** 윤기철*****
(Tac-Sung Jung) (Hyun-Wook Lee) (Sung-Su Kwon) (Myung-Gil Lee) (Jong-Chul Lee) (Ki-Cheol Yoon)

요약

본 논문에서는 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용하여 UTIS (도시 교통 정보 시스템)에 사용 가능한 저 위상잡음 발진기를 설계 및 제작하였다. 인터디지털 헤어핀 공진기는 기존의 소형화된 헤어핀 공진기에 인터디지털을 접목시켜 공진기의 물리적인 크기를 기존 대비 약 70 % 로 축소시켰고, 고조파 특성을 향상시켰다. 또한 132 의 높은 Q 값은 저 위상잡음 발진기 설계에 적합하다. UTIS 용 저 위상잡음 발진기는 5.75 GHz에서 출력 12 dBm 의 전력과 100 kHz offset 에서 -100.8 dBc/Hz 의 낮은 위상잡음을 얻었다. 이는 기존의 헤어핀을 이용한 발진기에 비해 12 dB 정도의 개선을 보여준다.

핵심어 : 도시교통정보시스템, 양호도, 위상잡음, 발진기, 인터디지털 헤어핀 공진기

Abstract

In this paper, a low phase noise oscillator is designed using an interdigital hairpin resonator for UTIS (Urban Traffic Information Systems). The interdigital hairpin resonator has several characteristics compared with a conventional hairpin resonator, which are 70 % size reduction and improvement of harmonic characteristics. In addition, Q (Quality factor) of the interdigital hairpin resonator is about 132, which is suitable for the design of a low phase noise oscillator. The oscillator suggested in this paper shows the output power of 12 dBm and the phase noise characteristic of -100.8 dBc/Hz at 100 kHz offset frequency from the center frequency of 5.75 GHz. The phase noise is improved by about 12 dB compared with a conventional oscillator using an interdigital hairpin resonator.

Key words : UTIS, quality factor, phase noise, oscillator, interdigital hairpin resonator

* 주저자 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 박사과정

*** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 연구교수

**** 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

***** 공저자 : 한국과학기술원 정보전자연구소 연구교수

† 논문접수일 : 2012년 9월 3일

† 논문심사일 : 2012년 10월 1일

† 게재확정일 : 2012년 10월 8일

I. 서 론

이동통신의 발전은 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 동작하는 고주파 회로의 개발을 요구하게 되었고, 특히 통신 시스템에 있어서 필수적인 발진기의 설계 및 제작이 필요하게 되었다. 마이크로웨이브 통신 및 레이더 시스템의 핵심 부품중의 하나인 발진기는 DC전력을 RF전력으로 변환시키는 회로이다. 전체 시스템의 가장 기본적이고 필수적인 부품 중의 하나로서, 시스템의 IF 신호를 만들거나, RF 신호를 변·복조할 때 효율과 안정성 확보에 가장 크게 영향을 미치는 회로이다[1].

1980년대 유전체 공진기를 발진기에 사용하여 위상잡음 (phase noise) 개선과 주파수 안정도 (stability)를 향상시킨 유전체 공진기 발진기가 만들어졌다[2]. 마이크로파 대역에서 발진기는 저 전력 소비 및 우수한 주파수 안정도가 요구되므로 도파관 (waveguide cavity)보다 소형이면서 저 가격, 저 손실, 높은 온도 안정성과 유전율, 높은 Q (quality factor) 값을 갖는 유전체 공진기의 사용이 일반화되어 왔다[3~4]. 하지만, 유전체 공진기는 3차원 구조를 갖고 있어 MIC (Microwave Integrated Circuit)나, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 등과 집적화하기가 어려우며, 회로를 소형화하는 방식에 많은 문제점을 갖고 있다.

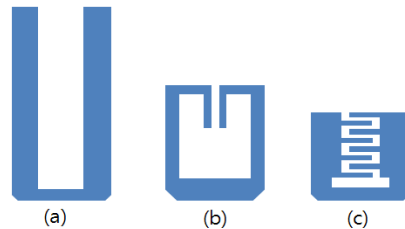
본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 M. Sagawa에 의해 제안된 2차원 상에서 구현되는 평면형 (planar) 형태의 공진기에 대한 연구를 진행하게 되었고, 참고 논문[6]의 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용하게 되었다[5~6]. UTIS 시스템의 IF 주파수 생성을 위한 발진기를 설계하기 위하여 인터디지털 헤어핀 공진기를 기존 논문과 다른 공진 주파수로 재설계하였고, 재설계된 공진기의 우수성을 더욱 부각시키는 방법으로 기존 논문에서 적용하지 않은 동일한 평면형 헤어핀 공진기들과의 성능비교를 4장에 첨부하였다[6]. 본 논문에서 이용한 공진기는 Q값이 우수하고 평면 형태로 다른 회로들과 집적화가 편리하다는 장점을 이용하여 UTIS 용 발진기를 설계하였다. 본 논문에서 제안된 발진기는 발진기의 중요한

스펙중의 하나인 저 위상잡음 특성을 보이고 있으며 이를 일반적인 헤어핀 공진기로 만들어진 발진기와 비교할 뿐만 아니라 출간된 타 논문들과의 비교를 하였다. 본 논문에서 제안된 저 위상잡음 발진기는 향후 push-push 발진기로 설계될 수 있고[7], UTIS 시스템에 응용되어질 것으로 사료된다[8].

II. 인터디지털 헤어핀 공진기

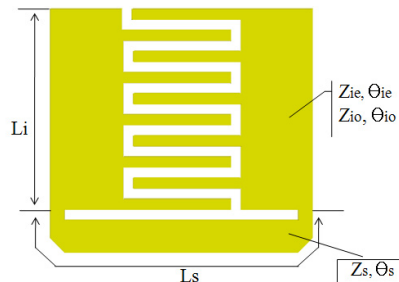
1. 인터디지털 헤어핀 공진기 이론

공진기를 소형화하며 고조파 특성을 억압시키기 위한 구조들로 SIR (stepped-impedance resonators)과 헤어핀 공진기 등이 제안된다. <그림 1>(a)는 일반적인 반 파장 헤어핀 공진기로서 SIR (stepped-impedance



<그림 1> 헤어핀 공진기의 구조 변환
(a) 일반적인 반 파장 헤어핀 공진기
(b) 소형화된 헤어핀 공진기
(c) 인터디지털 헤어핀 공진기

<Fig. 1> Structural variations of the hairpin resonator (a) conventional half-wavelength hairpin resonator (b) Miniaturized hairpin resonator (c) Interdigital hairpin resonator



<그림 2> 인터디지털 헤어핀 공진기의 등가적인 전기적 파라미터 설계

<Fig. 2> Layout and equivalent electrical parameters of an interdigital hairpin resonator

resonator) 구조를 갖고 두 개의 높고 낮은 임피던스로 구성된다. 이때 두 임피던스 차이의 비율을 낮게 함으로써 사이즈의 축소와 향상된 고조파 특성을 얻을 수 있다[9]. <그림 1>(b)는 소형화된 헤어핀 공진기로써 일반적인 반 파장 헤어핀 공진기의 양쪽 개방 선로의 끝을 구부려 병렬 결합 선로 형태와 유사하게 만들었고, 그에 따라 캐패시턴스 성분이 증가하고 파장은 작아지게 된다[10]. <그림 1>(c)는 소형화된 헤어핀 공진기에 인터디지털 형태를 삽입하여 캐패시턴스 성분을 더욱 향상시켰다.

<그림 2>의 마이크로스트립 인터디지털 캐패시터는 균등한 병렬 결합 선로의 배열로 구성되어지고 구조의 길이는 중심주파수의 파장 길이보다 짧다[11]. 이때의 인터디지털 헤어핀 공진기의 공진 특성은 SIR과 소형화된 헤어핀 공진기의 특성과 유사하게 결정되어지며 식(1)과 같은 특성을 보인다. 또한 물리적인 길이는 식(2)~(4)와 같이 결정되고 식 (5)와 같이 범위가 한정되어진다[6]. 수식의 λ_{io} 와 λ_s 는 도시된 라인에서의 등가 관내 파장을 나타내고, K 는 주어진 파장과 임피던스의 비율이며, L 은 주조의 물리적 길이이다.

$$\tan \theta_{io} \cdot \tan \frac{\theta_s}{2} = K = \frac{Z_{io}}{Z_s} \quad (1)$$

$$L = L_i + \frac{L_s}{2} = \frac{1}{2\pi} (\theta_{io} \lambda_{io} + \frac{\theta_s \lambda_s}{2}) \quad (2)$$

$$\theta_{io} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{K^2 - K \frac{\lambda_s}{\lambda_{io}}}{K \frac{\lambda_s}{\lambda_{io}} - 1}} \quad (3)$$

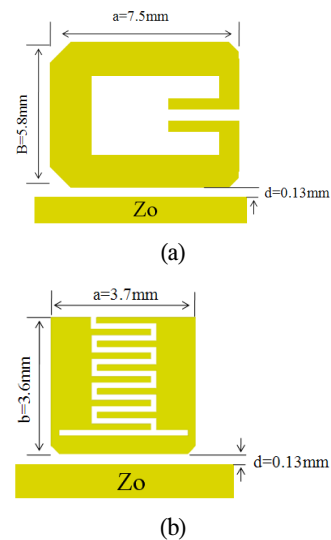
$$\theta_{io} = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{K^2 \frac{\lambda_s}{\lambda_{io}} - K}{K - \frac{\lambda_s}{\lambda_{io}}}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} 1/K < \lambda_s/\lambda_{io} < K, K > 1 \\ K < \lambda_s/\lambda_{io} < 1, 0 < K < 1 \end{aligned} \quad (5)$$

2. 인터디지털 헤어핀 공진기 구현

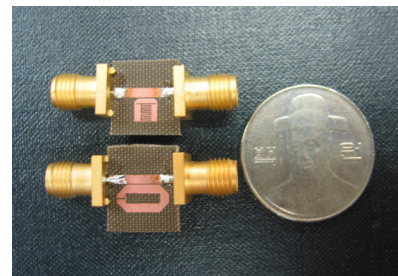
소형화된 헤어핀 공진기와 인터디지털 헤어핀

공진기를 비교하기 위하여 $\epsilon_r=2.54$, 손실 탄젠트 0.002, 높이 0.54mm 인 Teflon 기판으로 설계하였다. <그림 3>에서와 같이 소형화된 헤어핀 공진기와 인터디지털 헤어핀 공진기의 크기는 각각 7.5 mm × 5.8 mm와 3.7 mm × 3.6 mm이다. 이는 약 70%의 크기가 축소된 결과를 보이고 <그림 4>는 두 개의 공진기를 비교하는 제작 실물도이다. <그림 5>는 소형화된 헤어핀 공진기의 시뮬레이션과 제작 결과이다. <그림 6>은 인터디지털 헤어핀 공진기의 시뮬레이션과 제작 결과이며, 제작상의 오차에 따른 결과를 보여준다.

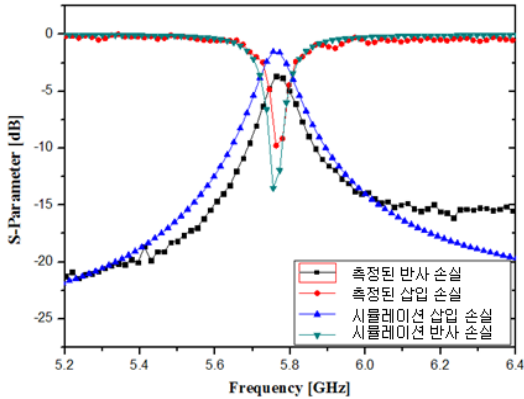


<그림 3> 소형화된 헤어핀 공진기와 인터디지털 헤어핀 공진기의 비교 (a) 소형화된 헤어핀 공진기 (b) 인터디지털 헤어핀 공진기

<Fig. 3> Comparison of a miniaturized hairpin resonator and interdigital hairpin resonator (a) miniaturized hairpin resonator (b) interdigital hairpin resonator

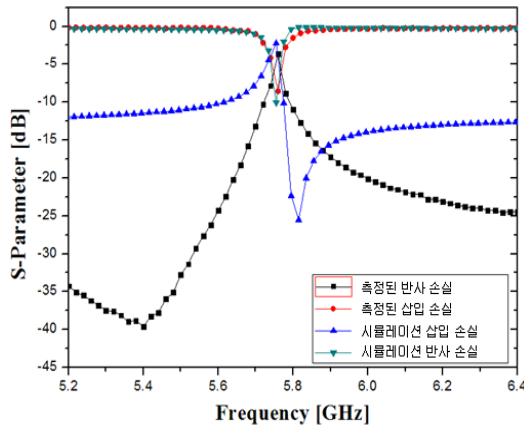


<그림 4> 제작된 두 헤어핀 공진기 실물도 <Fig. 4> Photographs for two hairpin resonators



〈그림 5〉 소형화된 헤어핀 공진기의 시뮬레이션과 측정 결과

〈Fig. 5〉 Simulation and measurement results of the miniaturized hairpin resonator



〈그림 6〉 인터디지털 헤어핀 공진기의 시뮬레이션과 측정 결과

〈Fig. 6〉 Simulation and measurement results of the interdigital hairpin resonator

〈표 1〉은 소형화된 헤어핀 공진기와 인터디지털 헤어핀 공진기의 제작 특성을 비교한다. loaded Q는 측정된 S-parameter의 결과값인 3 dB 대역폭을 이용해 계산되며 식 (6)과 같다[12]. 인터디지털 구조는 병렬 공진 구조이며, 커패시턴스가 커짐에 따라 Q가 개선된다. 인터디지털 헤어핀 공진기는 일반 헤어핀 공진기에 비해 전체 크기가 축소되고 loaded Q 값도 개선됨을 볼 수 있다.

$$Q_L = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} \quad (6)$$

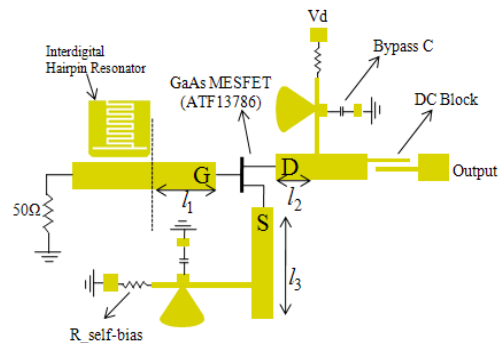
〈표 1〉 소형화된 헤어핀 공진기와 인터디지털 헤어핀 공진기의 시뮬레이션 및 제작 특성 비교

〈Table 1〉 Comparison of the characteristics for miniaturized hairpin resonator and interdigital hairpin resonator

	Simulation (S11, S21, loaded Q at 5.755GHz)	Measurement (S11, S21, loaded Q, measured resonant freq.)
Miniaturized hairpin resonator 7.5×5.8mm ²	S11 : -1.5 dB S21 : -13 dB loaded Q : 65	S11 : -3.6 dB S21 : -9.7 dB loaded Q : 66 at 5.76 GHz
Interdigital hairpin resonator 3.7×3.6mm ²	S11 : -2.2 dB S21 : -10 dB loaded Q : 143	S11 : -3.6 dB S21 : -8.5 dB loaded Q : 132 at 5.76 GHz

Ⅲ. 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기 제작

본 논문에서는 능동소자로 저 잡음 지수를 갖고 위상잡음을 최소화할 수 있으며, 부성저항을 쉽게 얻을 수 있는 GaAs MESFET인 Agilent ATF13786 [13]을 이용하였고, 발진기의 형태는 회로구성이 간단하고 부하 변동에 따른 주파수 변화와 출력 변화가 적은 직렬 궤환형(series feedback topology)으로 〈그림 7〉과 같다.

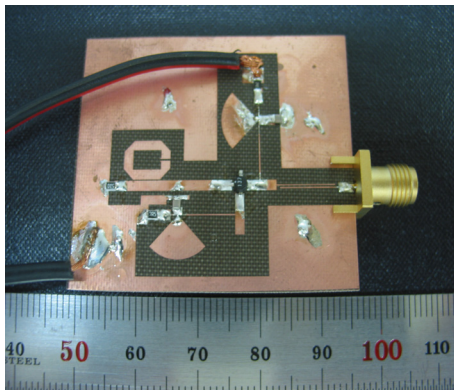


〈그림 7〉 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 레이아웃

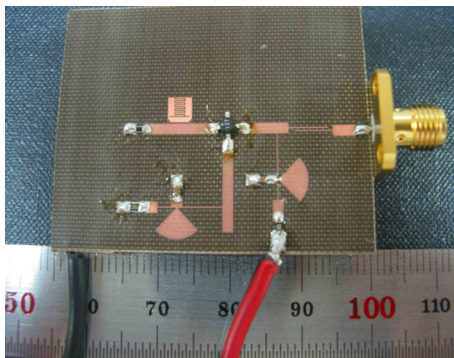
〈Fig. 7〉 Layout of the oscillator using an interdigital hairpin resonator

본 논문에서 제작한 직렬 궤환형 발진기는 하나의 DC 전원으로 자기 바이어스(self-bias)를 적용하였고 l_1, l_2, l_3 를 조절하여 위상조건과 부성저항 발생조건을 만족하였다[14].

<그림 8>은 teflon 기판을 이용하여 제작된 두 개의 발진기 제작 사진이며 <그림 9>은 두 발진기의 위상잡음을 비교하기 위한 결과이다. 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 위상 잡음은 -88.11 dBc/Hz @ 100 kHz 이고, 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 위상잡음은 -100.8 dBc/Hz @ 100 kHz 으로 약 12 dB 의 개선을 보여준다. <그림 10>는 제안된 발진기의 출력 전력 12.1 dBm @ 5.75 GHz 을 보여준다.



(a)

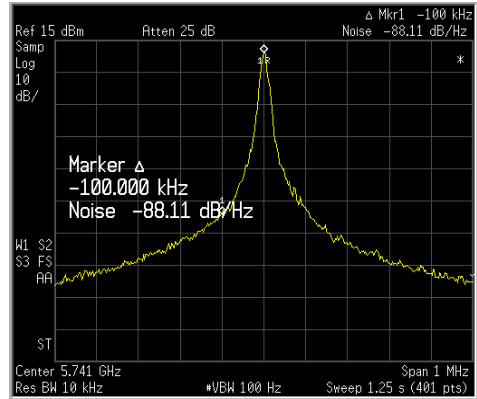


(b)

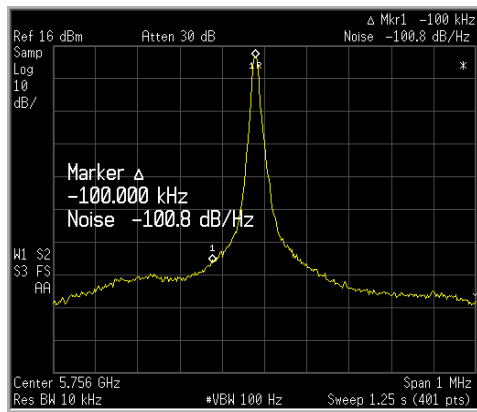
<그림 8> 두 발진기의 제작사진

- (a) 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 발진기
- (b) 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기

<Fig. 8> Photographs of two oscillators using
 (a) miniaturized hairpin resonator
 (b) interdigital hairpin resonator



(a)

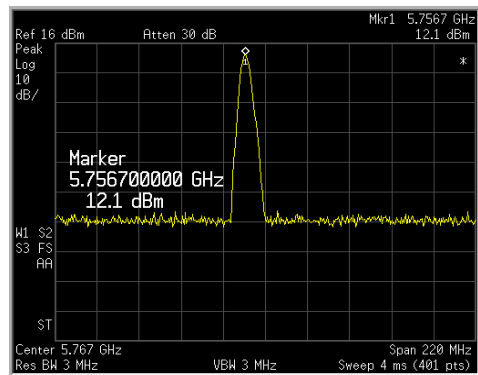


(b)

<그림 9> 제작된 두 발진기의 위상잡음 결과

- (a) 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 결과
- (b) 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기 결과

<Fig. 9> Phase noise of two oscillators using
 (a) miniaturized hairpin resonator
 (b) interdigital hairpin resonator



<그림 10> 제안된 발진기의 출력 전력

<Fig. 10> Output power of the suggested oscillator

IV. 실험 결과

<표 2>와 <표 3>은 본 논문에서의 실험 결과를 정리해 주며 출간된 논문들과의 특성을 비교하여 장점을 부각시키고자 한다. <표 3>의 Phase Noise는 각 논문의 결과를 도시하였고, 위상잡음 비교 (Figure of merit)는 식 (7)을 이용하여 주파수 체배와 분주를 통해 기준 주파수 5.75 GHz에서 위상잡음을 비교한 결과이다[20].

$$S_{\phi} = \text{phase noise} + 20\log\left(\frac{f_1}{f_2}\right) \quad (7)$$

<표 2> 헤어핀 구조 공진기들의 특성 비교
(Table 2) The comparison with the characteristics of hairpin resonators

	Size[mm] & Size reduction[%]	loaded Q
Miniaturized hairpin resonator	7.5 × 5.8, Standard	66 at 5.76 GHz
Interdigital hairpin resonator	3.7 × 3.6, 70%	132 at 5.76 GHz
[15]	3.38 × 3.24, 50%	66 at 9.21 GHz

<표 3> 발진기의 특성 비교
(Table 3) The comparison with characteristics of other oscillators

Reference	Oscillation Frequency [GHz]	Output Power [dBm]	Phase Noise @ 100kHz [dBc/Hz]	위상잡음 비교 @ 5.75GHz [dBc/Hz]
[15]	17.972	1.18	-87	-93
[16]	9.27	14.47	-96.23	-98
[17]	5.3	3.03	-81	-80
[18]	10	6	-92	-95
[19]	10	10.16	-95.4	-98
This Work	5.75	12.1	-100.8	-100.8

V. 결 론

본 논문에서는 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 UTIS용 저 위상잡음 발진기를 설계 및 제작하였다. 일반적인 소형화된 헤어핀 공진기에 비해 인터디지털 헤어핀 공진기는 크기가 70% 축소된 것을 보여주었고, loaded Q 값은 132로 월등히 높은 값을 보였다. 인터디지털 헤어핀 공진기를 이용한 발진기의 위상 잡음은 -100.8 dBc/Hz로 기존의 소형화된 헤어핀 공진기를 이용한 발진기에 비해 위상 잡음이 12 dB의 개선을 보여주었다. 본 논문의 결과를 바탕으로 UTIS 시스템의 IF 주파수 생성에 사용 가능한 발진기를 설계하였고, 제안된 발진기는 push-push 발진기, PLL, 주파수 합성기 및 MMIC와 같은 형태의 애플리케이션으로 무선통신 분야에 많은 응용이 기대되어 진다.

참고문헌

- [1] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall, 1997.
- [2] P. G. Wilson and R. D. Carver, "An easy-to-use FET DRO design procedure suited to most CAD programs," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1033-1036, June 1989.
- [3] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp.329-339, Feb. 1966.
- [4] T. H. Lee and A. Hajimiri, "Oscillator-phase noise : A tutorial," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 35, no. 3, pp.326-336, March 2000.
- [5] Y. T. Lee, J. S. Lin, C. S. Kim, D. Ahn, and S. W. Nam, "A compact-size microstrip spiral resonator and its application to microwave oscillator," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 12, no. 10, pp.375-377, Oct. 2002.
- [6] J. Zhu and Z. Feng, "Microstrip interdigital hairpin resonator with an optimal physical length," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 16, no. 12, pp.672-674, Dec. 2006.

- [7] H. Yabuki, M. Sagawa, and M. Makimoto, "Voltage controlled push-push oscillators using miniaturized hairpin resonators," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.1175-1178, June 1994.
- [8] 오현서, "ITS/텔레매틱스 주파수 현황," ETRI, 2011.
- [9] M. Makimoto and S. Yamashita, "Bandpass filters using parallel coupled stripline stepped impedance resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 28, no. 12, pp.1413-1417, Dec. 1980.
- [10] S. Y. Lee, C. M. Taai, "New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2482-2490, Dec. 2000.
- [11] X. Y. She and Y. L. Chow, "Interdigital microstrip capacitor as a four-port network," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 113, pp.191-197, June 1986.
- [12] A. P. S. Khanna and Y. Garault, "Determination of loaded, unloaded, and external quality factors of a dielectric resonator coupled to a microstrip line," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 31, no. 3, pp.261-264, Mar. 1983.
- [13] www.datasheetcatalog.com
- [14] S. W. Seo, H. Y. Jung, J. H. Jeong, and C. H. Park, "Design of an X-band oscillator using novel miniaturized microstrip hairpin resonator," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.1-4, Dec. 2007.
- [15] H. W. Lee, K. C. Yoon, H. Nam, Y. S. Eo, and J. C. Lee, "A new K-band push-push VCO using a miniaturized hairpin resonator," *Microwave and Optical Technol. Lett.*, vol. 52, no. 3, pp.699-701, Mar. 2010.
- [16] B. Shrestha, R. K. Maharjan, S. G. Cho, K. C. Yoon, and N. Y. Kim, "A low phase noise oscillator using spur line resonator for I-band application," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.469-472, Dec. 2010.
- [17] C. G. Hwang and N. H. Myung, "Novel phase noise reduction method for CPW based microwave oscillator utilizing a compact planar helical resonator," *Electronics and Communications Research Institute (ETRI) Journal*, vol. 28, no. 4, pp.529-531, Mar. 2010.
- [18] N. M. Mahyuddin, M. F. Ain, S. I. Hassan, and M. Sing, "Modeling of a 10 GHz dielectric resonator oscillation in ADS," *Proc. Int. RF and Microwave Conf.*, pp.106-110, Sept. 2006.
- [19] Y. T. Lee, J. S. Lim, C. S. Kim, D. Ahn, and S. W. Nam, "Compact size microstrip spiral resonator and its application to microwave oscillator," *IEEE Microwave and Components Lett.*, vol. 12, no. 10, pp.375-377, Oct. 2002.
- [20] 엄경환, "능동초고주파 회로설계입문," 홍릉과학출판사

저자소개



정 태 성 (Jung, Tae-Sung)

2011년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 석사과정(전파공학전공)
 2010년 8월 : 광주대학교 공학사(광통신공학전공)



이 현 욱 (Lee, Hyun-Wook)

2009년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 박사과정(전파공학전공)
 2008년 1월 ~ 2009년 12월 : 전자부품연구원 위촉연구원
 2009년 2월 : 광운대학교 공학석사(전파공학전공)
 2007년 2월 : 광운대학교 공학사(전파공학전공)



권 성 수 (Kwoun, Sung-Su)

2011년 6월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자융합공학과 연구교수
 2007년 4월 ~ 2011년 6월 : 행정안전부 국가정보통신기획 담당관
 2005년 10월 ~ 2007년 4월 : LG노텔 정보통신연구개발 선임연구원
 2000년 12월 ~ 2005년 10월 : LG전자 정보통신연구개발 선임연구원
 2007년 2월 : 광운대학교 공학박사(정보통신공학전공)
 2001년 2월 : 광운대학교 공학석사(정보통신공학전공)
 1999년 2월 : 광운대학교 공학사(정보통신공학전공)



이 명 길 (Lee, Myung-Gil)

2007년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 박사과정(전파공학전공)
 2011년 3월 ~ 현 재 : 삼성전자 ITS Unit LAB. 선임연구원
 2006년 2월 : 광운대학교 공학석사(전파공학전공)
 2004년 2월 : 수원대학교 공학사(정보통신공학전공)



이 중 철 (Lee, Jong-Chul)

1996년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자융합공학과 전임강사/조교수/부교수/교수
 1994년 4월 ~ 1996년 2월 : 현대전자 광소자 개발실 선임연구원
 1994년 5월 : Texas A&M Univ, EE Dept 공학박사
 1989년 12월 : Arizona State Univ, EE Dept 공학석사
 1985년 2월 : 한양대학교 공학석사(전자공학전공)
 1983년 2월 : 한양대학교 공학사(전자공학과)



윤 기 철 (Yoon, Ki-Cheol)

2012년 2월 ~ 현 재 : 한국과학기술원 정보전자연구소 연구교수(선임)
 2011년 10월 ~ 2011년 12월 : 전자부품연구원 에너지디스플레이 연구본부 연구원(선임)
 2011년 9월 ~ 2011년 12월 : 광운대학교 전자통신공학과 외래교수
 2009년 3월 ~ 2011년 8월 : 동양공업전문대학 전기전자통신학부 외래교수
 2011년 8월 : 광운대학교 공학박사(전파공학전공)
 2007년 2월 : 광운대학교 공학석사(전파공학전공)
 2005년 2월 : 우송대학교 컴퓨터전자정보공학부 공학사