

논문 2007-44TC-12-3

# Composite Right/Left-Handed 전송 선로와 Pin Diode를 이용한 조절 가능한 부정 저항을 이용한 이중 대역 전압 제어 발진기

(Dual-Band VCO using Composite Right/Left-Handed Transmission Line and Tunable Negative Resistance based on Pin Diode)

최재원\*, 서철현\*\*

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

## 요약

본 논문에서는 Composite Right/Left-Handed (CRLH) 전송 선로 (TL)와 pin 다이오드를 이용한 조절 가능한 부정 저항을 이용한 이중 대역 전압 제어 발진기에 대하여 연구하였다. CRLH 전송 선로는 이중 대역 주파수 조절 특성을 갖는 metamaterial 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로의 이중 대역 동작은 CRLH 전송 선로의 주파수 오프셋과 위상 기울기에 의해서 얻어지고, 두 개의 동작 주파수들의 주파수 비율은 정수 배가 아닐 수 있다. 전압 제어 발진기의 각각의 주파수 대역은 독립적으로 동작해야 하므로 pin 다이오드를 이용한 조절 가능한 부정 저항을 사용하였다. 정전압을 pin 다이오드에 인가하였을 때, 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 주파수 조절 범위 2.423 ~ 2.597 GHz에서 -108.34 ~ -106.67 dBc/Hz @ 100 kHz이며, 역전압을 pin diode에 인가하였을 때는, 전압 제어 발진기의 위상 잡음이 주파수 조절 범위 5.137 ~ 5.354 GHz에서 -114.16 ~ -113.33 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

## Abstract

In this paper, the dual-band voltage-controlled oscillator (VCO) using the composite right/left-handed (CRLH) transmission line (TL) and the tunable negative resistance based on the pin diode is presented. It is demonstrated that the CRLH TL can lead to metamaterial transmission line with the dual-band tuning capability. The dual-band operation of the CRLH TL is achieved by the frequency offset and the phase slope of the CRLH TL, and the frequency ratio of the two operating frequencies can be a non-integer. Each frequency band of VCO has to operate independently, so we have used the tunable negative resistance based on the pin diode. When the forward bias has been into the pin diode, the phase noise of VCO is -108.34 ~ -106.67 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 2.423 ~ 2.597 GHz, whereas when the reverse bias has been fed into the pin diode, that of VCO is -114.16 ~ -113.33 dBc/Hz @ 100 kHz in the tuning range, 5.137 ~ 5.354 GHz.

**Keywords :** Dual-Band VCO, Tunable Negative Resistance, Metamaterial, Composite Right/Left-Handed Transmission Line, Phase Noise

## I. 서론

최근 수년 간 블루투스<sup>1</sup>와 802.11a/b/g와 같은 새로운 표준들의 등장으로 더 많은 주파수 대역들에 대한 수요

가 전자 통신 산업에서 발생하였다. 다양한 종류의 무선 통신 서비스의 급속한 증가는 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위가 주파수 분할 PLL을 이용한 다중 대역 주파수 합성기에서 가장 중요한 요소들 중 하나이기 때문에 다중 대역 전압 제어 발진기의 연구에 대한 요구를 발생시켰다. 그러므로 RF 트랜시버는 하나의 무선 통신 장치로 다른 무선 통신 서비스들을 만족해야 하므로 더 복잡해지고 더 많은 전력을 소비하게 되었다. 많은 이중 대역 전압 제어 발진기들은 소비자들에게 다

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 이 연구는 2007학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2007년11월28일, 수정완료일: 2007년12월12일

양한 통신 서비스들을 제공하는 이중 대역 트랜시버들을 만들기 위하여 개발되어 왔다<sup>[1~2]</sup>.

최근에 Left-Handed Material (LHM)은 마이크로파 분야에서 큰 관심을 받고 있다. LHM은 위상 속도와 그룹 속도를 평행하지 않게 하는 전계, 자계, 파장 벡터에 의해 형성된 LH 삼원소 때문에 그렇게 명명된다. LHM의 개념이 1968년 Veselago에 의해 최초로 제안된 이후로 Shelby가 split-ring 공진기들(SRRs)과 선을 이용하여 음의 유효 투자율과 유전율을 동시에 갖는 주기적인 구조를 제안했던 2001년 까지 어떠한 LHM의 구현이 이루어지지 않았다. LHM을 구현하기 위한 또 다른 제안은 CRLH 전송 선로 구조들을 기반으로 나중에 이루어졌는데, LHM보다 더 적은 손실과 더 광대역의 주파수 대역 특성을 나타냈다. CRLH 전송 선로는 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스 뿐만 아니라 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스로 이루어진 단위 셀의 주기적인 반복으로 구성되어진 전송 선로이다. 직렬 캐패시턴스와 병렬 인덕턴스는 저주파에서 왼손 법칙을 따르지만, 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스는 고주파에서 오른손 법칙을 따른다. CRLH 구조들은 또한 임의의 이중 대역 마이크로파 부품의 설계에 유용함을 보여준다. 만약 CRLH 구조들이 적절하게 설계된다면 일반적인 right-handed (RH) 전송 선로를 CRLH 전송 선로로 대체함으로써  $-90^\circ$ 의 위상 편이와  $-270^\circ$  (혹은  $90^\circ$ )의 위상 편이는 두 개의 임의로 주어진 주파수들에서 얻어질 수 있다<sup>[3~5]</sup>.

본 연구의 목적은 하나의 전압 제어 발진기로 이중 대역에서 동작하는 전압 제어 발진기 구조를 제안하는 것이다. 하나의 전압 제어 발진기로 이중 대역 동작을 구현하기 위하여 CRLH 전송 선로를 사용하였다. 또한, 전압 제어 발진기의 각각의 주파수 대역이 독립적으로 동작해야 하므로, pin 다이오드를 기반으로 한 조절 가능한 부성 저항을 사용하였다.

## II. $\lambda/4$ CRLH 전송 선로

그림 1은 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 인위의 집중 정수 소자 구현을 위한 단위 셀들을 보여 준다.  $L_R$ 과  $C_R$ 은 각각 RH 전송 선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다.  $L_L$ 과  $C_L$ 은 각각 LH 전송 선로의 등가 집중 정수 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 캐패시턴스이다. 인위의 전송 선로들은 만약 무한소 근사 가정이 적용되면서

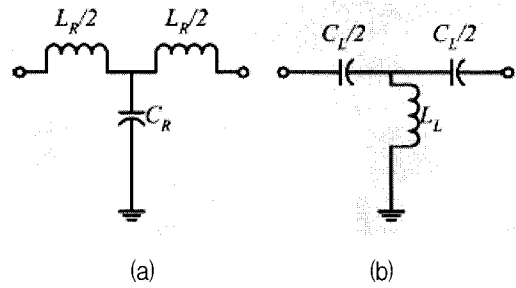


그림 1. 인공 RH와 LH 전송 선로의 T-형태 단위 셀 (a) RH 전송 선로, (b) LH 전송 선로

Fig. 1. T-type unit cells of artificial RH and LH TLs. (a) RH TL, (b) LH TL.

단위 셀에 의해 발생된 위상 편이가  $\pi/2$ 보다 훨씬 더 작다면  $N$ 개의 단위 셀들을 연속으로 연결함으로써 얻어진다. LH 전송 선로는 인덕터와 캐패시터의 위치가 서로 바뀐 점에서 RH 전송 선로의 전기적인 듀얼 관계이다. 각 단위 셀의 전체 인덕턴스와 캐패시턴스는 같다. 그림 1에서 인위의 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 두 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같다.

$$\phi_{R,unit} = -\arctan \left[ \frac{\omega \left( C_R Z_{0R} + \frac{L_R}{Z_{0R}} - \omega^2 \frac{C_R L_R^2}{4 Z_{0R}} \right)}{(2 - \omega^2 C_R L_R)} \right] < 0 \quad (1)$$

$$\phi_{L,unit} = -\arctan \left[ \frac{\omega \left( C_L Z_{0L} + \frac{L_L}{Z_{0L}} - \frac{1}{4 \omega^2 C_L Z_{0L}} \right)}{(1 - 2 \omega^2 C_L L_L)} \right] > 0 \quad (2)$$

여기서  $R$ 과  $L$ 은 각각 RH와 LH를 나타내며,  $Z_{0R}$ 과  $Z_{0L}$ 은 다음과 같이 정의되는 특성 임피던스를 나타낸다.

$$Z_{0L} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad Z_{0R} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (3)$$

인위의 전송 선로의 위상 응답은 다음과 같다.

$$\phi_R = N \phi_{R,unit} \quad (4)$$

$$\phi_L = N \phi_{L,unit} \quad (5)$$

RH 전송 선로는 음의 위상 응답을 갖는 반면, LH 전송 선로는 양의 위상 응답을 갖는다.

이상적인 CRLH 전송 선로는 이상적인 LH 전송 선로와 RH 전송 선로의 직렬 결합이며, 두 가지 모두 차단 주파수를 갖지 않으며, 다음과 같은 위상 응답을 갖는다.

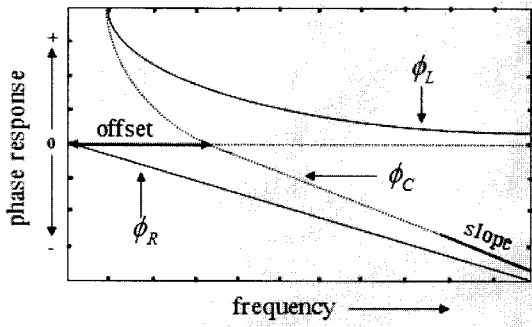


그림 2. 이상적인 RH 전송 선로, LH 전송 선로, CRLH 전송 선로의 전형적인 위상 응답

Fig. 2. Typical phase responses of an ideal RH TL, LH TL, and CRLH TL.

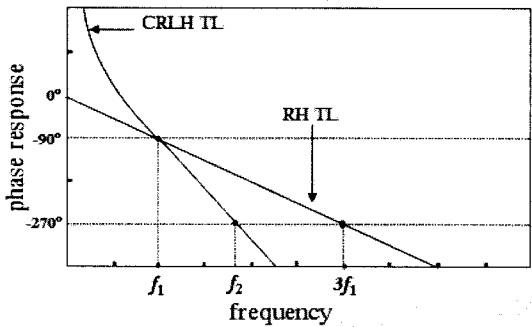


그림 3. 두 가지 모두  $f_1$ 에서  $90^\circ$ 의 전기적 길이를 갖는 RH 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답

Fig. 3. Phase responses of the RH TL and CRLH TL, which both have electrical lengths of  $90^\circ$  at  $f_1$ .

$$\phi_C = \phi_R + \phi_L \quad (6)$$

여기서  $C$ 는 CRLH를 나타낸다.

이상적인 CRLH 전송 선로의 위상 응답은 그림 2에서 보여주며, 이상적인 LH 전송 선로와 이상적인 RH 전송 선로의 중첩이다. 저주파에서 CRLH 전송 선로의 위상 곡선은 이미턴스  $L_R$ 과  $C_R$ 이 무시될 수 있기 때문에 LH 전송 선로의 위상 곡선에 근접하며, 위상 곡선은 식 (1)에 따라 양의 위상 응답에 대응된다. 고주파에서 CRLH 전송 선로의 위상 곡선은 이미턴스  $L_L$ 과  $C_L$ 이 무시될 수 있기 때문에 RH 전송 선로의 위상 곡선에 근접하며, 위상 곡선은 식 (2)에 따라 음의 위상 응답에 대응된다. 결론적으로, CRLH 전송 선로의 위상 곡선은  $0^\circ$ 의 위상을 갖는 축 (전기적 길이가 0)에서 LH와 RH 범위 사이의 천이 주파수에서의 오프셋을 두고 교차한다. 주파수가 0 Hz인 지점에서부터 오프셋은 RH 전송 선로 측면에서 추가적인 자유로운 변화를 제공하며, 오직 위상의 기울기가 조절될 수 있다. 그러므로 CRLH 전송 선로 위상 곡선은 이중 대역 동작을 위하여 어떤

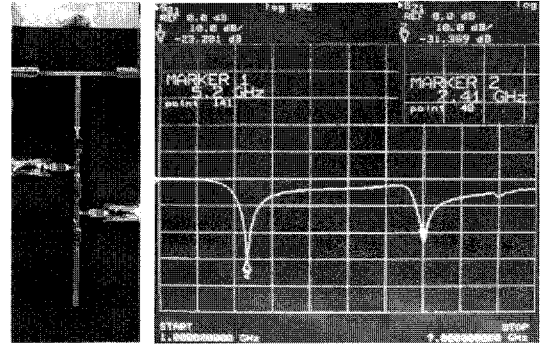


그림 4.  $\lambda/4$ CRLH 개방 회로 스텐브의 구현 모습과 측정 결과

Fig. 4. Fabrication and measured result of the  $\lambda/4$  CRLH open-circuit stub.

임의의 한 쌍의 주파수들에서 원하는 한 쌍의 위상들을 얻을 수 있다.

그림 3은 RH 전송 선로와 CRLH 전송 선로의 위상 응답을 보여준다.  $\pi/4$  RH 전송 선로 위상 곡선은 0 Hz 주파수에서부터  $f_1$  (분산이 0이라고 가정)까지 직선이며,  $-90^\circ$ 에서의 동작 주파수  $f_1$ 은  $-270^\circ$ 에서의 다음 이용 가능한 주파수가  $3f_1$ 이라는 것을 의미한다. 반면,  $\pi/4$  CRLH 전송 선로는 주파수 오프셋과 위상 기울기가 자유롭게 조절될 수 있으므로 두 가지의 임의의 동작 주파수들에서  $\pi/4$ 와  $3\pi/4$ 의 전기적 길이를 갖는다<sup>[4]</sup>.

### III. 구현 및 측정 결과

#### 1. $\lambda/4$ CRLH 개방 회로 스텐브 설계

이전 섹션에서  $\lambda/4$  CRLH 전송 선로에 관한 원리를 설명하였다. LC 회로로 이루어진  $\lambda/4$  CRLH 전송 선로는 요구되는 캐패시턴스 ( $C_R$ 과  $C_L$ )와 인덕턴스 ( $L_R$ 과  $L_L$ )을 만들 수 있는 물리적 소자로 구현되어야 한다.  $\lambda/4$  CRLH 전송 선로를 설계하기 위하여 SMT 칩 소자와 분산 소자를 이용하였다. 칩의 값과 분산 소자의 길이는 Advanced Design System (ADS)를 이용하여 결정하였다.  $\lambda/4$  CRLH 전송 선로는 위상 응답이  $f_1$ 에서  $-90^\circ$ 와  $f_2$ 에서  $-270^\circ$  ( $+90^\circ$ )가 되도록 설계되었다.

여기서  $f_2$ 는 LH 전송 선로의 비전형적인 위상 응답 때문에  $f_1$ 의 정수 배일 필요가 없다. 그래서  $f_1$ ,  $f_2$ 와 다른 더 높은 주파수들에서의 신호들이  $\lambda/4$  CRLH 개방 회로 스텐브에 의해 공진된다. 그러므로,  $\lambda/4$  CRLH 전송 선로는 더 유연한 이중 대역 동작을 제공한다<sup>[5]</sup>.

$\lambda/4$  CRLH 개방 회로 스텐브는 유전율 3.2와 31

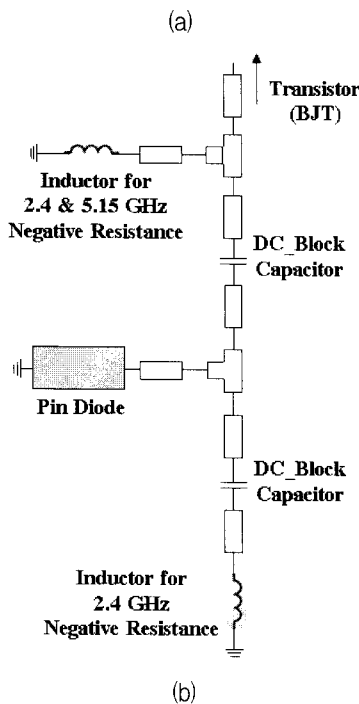
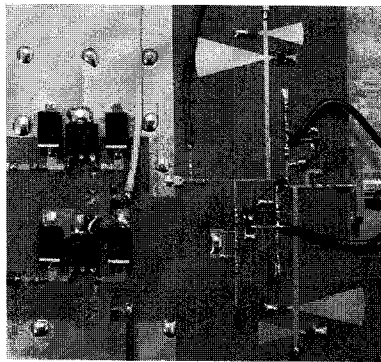


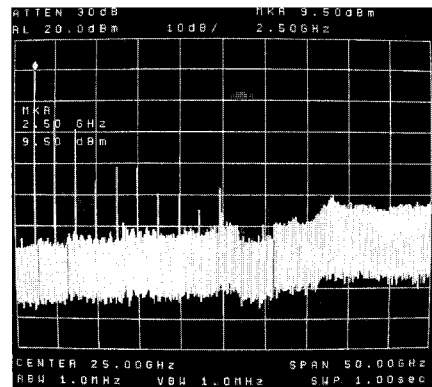
그림 5. (a) 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기 구현 모습, (b) pin 다이오드를 기반으로 한 조절 가능한 부정 저항

Fig. 5. (a) Fabrication of the proposed dual-band VCO, (b) Tunable negative resistance based on the pin diode.

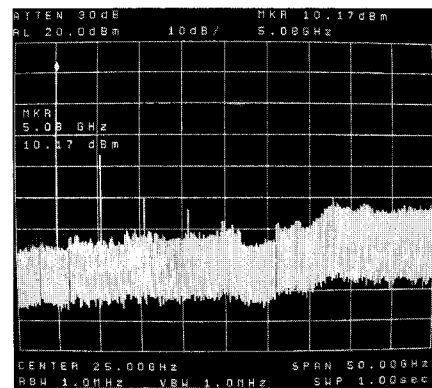
mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판으로 제작되었으며, Murata 칩 캐패시터와 Toko 칩 인덕터를 이용하여 설계되었다. 그림 4는  $\lambda/4$  CRLH 개방 회로 스텔브의 구현과 측정 결과를 보여준다. 그림 4에서 보는 것처럼,  $\lambda/4$  CRLH 개방 회로 스텔브는 2.4 GHz와 5.2 GHz에서 두 개의 공진 주파수를 생성한다. 이 주파수들은 우리의 목표 주파수 대역인 블루투스 와 802.11a/b/g이다. 2.4 GHz와 5.2 GHz에서의 저지 크기는 각각 -31.37 dB 와 -23.2 dB이다. 이 측정 결과로부터 이중 대역 전압 제어 발진기를 구현할 수 있는 가능성을 얻었다. 또한 높은 저지 크기와 우수한 공진 특성을 통하여 전압 제어 발진기의 위상 잡은도 줄일 수 있음을 확인하였다.

## 2. 이중 대역 전압 제어 발진기 설계

CRLH 전송 선로와 pin 다이오드를 기반으로 한 조절 가능한 부정 저항을 이용하여 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기는 유전율 3.2와 31 mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판을 이용하여 제작되었고, NEC사의 NE661M40 BJT소자, M/A-COM사의 MA46H202 버랙터 다이오드, Agilent사의 HMPP389T pin 다이오드를 이용하여 설계되었다. pin 다이오드의 동작 주파수가 6GHz까지이므로 이 소자는 목표 주파수 대역 설계에 적합하다. 그림 5는 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 구현 모습과 pin 다이오드를 기반으로 한 조절 가능한 부정 저항을 보여준다. 전압 제어 발진기의 각 주파수 대역은 독립적으로 동작하여야 하며, 그래서 pin 다이오드를 기반으로 한 조절 가능한 부정 저항을 이용하였다. 정전압 (1 V)이 pin 다이오드에 인가될 때, 부정 저항은 2.4 GHz 대역에서 동작하는 반면, 역전압 (-3 V)이 pin 다이오드에 인가될 때, 부정 저항은 5.15 GHz 대역에서 동작한다. 그림 5에서 보여지는 것처럼,



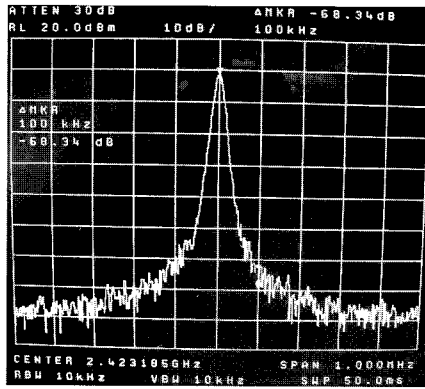
(a)



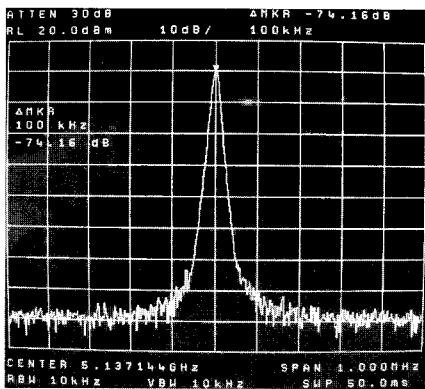
(b)

그림 6. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 측정 출력 스펙트럼 (a) 2.4 GHz, (b) 5.15 GHz

Fig. 6. Measured output spectrum of the proposed dual-band VCO (a) 2.4 GHz, (b) 5.15 GHz.



(a)



(b)

그림 7. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 측정 위상 잡음 특성 (a) 2.4 GHz, (b) 5.15 GHz  
 Fig. 7. Measured phase noise property of the proposed dual-band VCO (a) 2.4 GHz, (b) 5.15 GHz.

전압 제어 발진기의 조절 가능한 부성 저항은 저위상 잡음 특성을 얻기 위하여 대칭적으로 설계되었으며, 두 개의 인덕터, 두 개의 캐패시터와 하나의 pin diode를 이용하여 설계되었다. 이중 대역 동작을 위한 조절 전압이 pin 다이오드에 인가될 때, 작은 캐패시턴스를 갖는 두 개의 캐패시터는 DC 성분이 트랜지스터와 pin 다이오드의 캐소드에서 인가되는 것을 막기 위하여 조절 가능한 부성 저항에 연결되었다. 또한, 전압 제어 발진기를 구동시키기 위한 바이어스 회로는 서로 다른 각과 길이를 갖는 두 개의 레이디얼 스텐브와  $\lambda/4$  개방 회로 스텐브에 의해 두 개의 주파수 대역에서 바이어싱 되도록 설계되었다. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기가 2.4 GHz 대역에서 동작할 때, 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 2.423 ~ 2.597 GHz에서  $-108.34 \sim -106.67$  dBc/Hz @ 100 kHz이다. 출력 전력은 9.5 dBm이며, 고조파 특성은  $-16$  dBc이다. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기가 5.15 GHz 대역에서 동작할 때, 위상 잡음 특성은 주파수 조절 범위 5.137 ~ 5.354

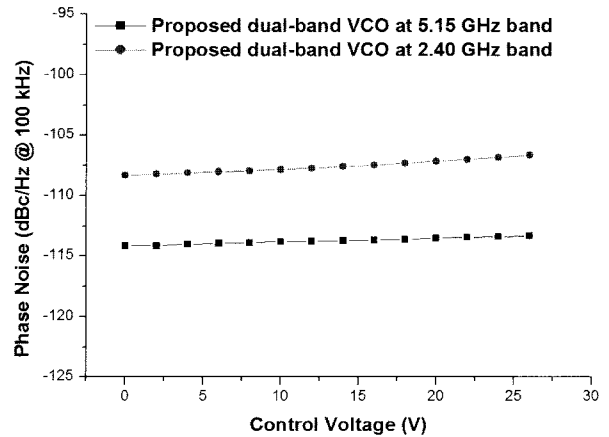


그림 8. 제안된 전압 제어 발진기의 2.4 GHz와 5.15 GHz 대역에서의 위상 잡음 특성  
 Fig. 8. Phase noise properties of the proposed dual-band VCO at 2.4 GHz and 5.15 GHz bands.

표 1. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 특성 요약  
 Table 1. Summary of Proposed Dual-Band VCO Performances.

	단위	Pin 다이오드 (정전압)	Pin 다이오드 (역전압)
동작 주파수	GHz	2.423 ~ 2.597	5.137 ~ 5.354
출력 전력	dBm	9.5	10.17
고조파	dBc	-16	-26.67
위상 잡음	dBc/Hz	-108.34	-114.16
	@ 100 kHz	~ -106.67	~ -113.33
FOM	dBc/Hz	-178.95	-191.3
	@ 100 kHz	~ -177.88	~ -190.83

GHz에서  $-114.16 \sim -113.33$  dBc/Hz @ 100 kHz이다. 출력 전력은 10.17 dBm이며, 고조파 특성은  $-26.67$  dBc이다. 2.4 GHz 대역에서 위상 잡음의 증가는 pin 다이오드가 정전압에서 동작할 때 발생하는 잡음과 고조파가 증가한다는 사실로 설명될 수 있다. 그림 6과 그림 7은 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 2.4 GHz와 5.15 GHz 대역에서의 측정된 출력 전력과 위상 잡음 특성을 보여준다. 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 각 주파수 대역에서의 위상 잡음 특성들은 그림 8에 나와 있다. 표 1에 제안된 이중 대역 전압 제어 발진기의 특성에 대하여 요약 정리하였다. 서로 다른 전압 제어 발진기들과 비교하기 위하여 가장 널리 사용되는 figure-of-merit (FOM)은 다음과 같이 정의한다.

$$FOM = L\{\Delta f\} - 20 \log\left(\frac{f_0}{\Delta f}\right) + 10 \log\left(\frac{P}{1mW}\right) \quad (7)$$

여기서  $L\{\Delta f\}$ 는  $f_0$ 의 캐리어 주파수로부터  $\Delta f$ 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고  $P$ 는 전압 제어 발진기 코어의 소비 전력이다<sup>[6]</sup>. 제안된 이중 대역 전압

제어 발진기의 FOM은 2.4 GHz 대역에서는 같은 주파수 조절 범위에서 -178.95 ~ -177.88 dBc/Hz @ 100 kHz이고, 5.15 GHz 대역에서는 동일한 주파수 조절 범위에서 -191.3 ~ -190.83 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

#### IV. 결 론

본 논문은 CRLH 전송 선로와 pin 다이오드를 이용한 조절 가능한 부성 저항을 이용한 이중 대역 전압 제어 발진기에 대하여 연구하였다. CRLH 전송 선로는 이중 대역 주파수 조절 특성을 갖는 metamaterial 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로의 이중 대역 동작은 CRLH 전송 선로의 주파수 오프셋과 위상 기울기에 의해서 얻어지고, 두 개의 동작 주파수들의 주파수 비율은 정수 배가 아닐 수 있다. 전압 제어 발진기의 각각의 주파수 대역은 독립적으로 동작해야 하므로 pin 다이오드를 이용한 조절 가능한 부성 저항을 사용하였다. 정전압을 pin 다이오드에 인가하였을 때, 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 주파수 조절 범위 2.423 ~ 2.597 GHz에서 -108.34 ~ -106.67 dBc/Hz @ 100 kHz이며, 역전압을 pin 다이오드에 인가하였을 때는, 전압 제어 발진기의 위상 잡음이 주파수 조절 범위 5.137 ~ 5.354 GHz에서 -114.16 ~ -113.33 dBc/Hz @ 100 kHz이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Choi, and C. Seo, "Broadband and Low Phase Noise VCO Using Tunable Metamaterial Transmission Line Based on Varactor-Loaded Split-Ring Resonator," Korea-Japan MicroWave Conference, pp. 145-148, November 2007.
- [2] J. Lee, S. Lee, H. Bae, S. Kim, "A Concurrent Dual-Band VCO with Dual Resonance in Single Resonator," Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems, pp. 135-138, 10-12 January 2007.
- [3] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite Right/Left-Handed Transmission Line Metama-

terials," IEEE Microwave Magazine, vol. 5, pp. 34-50, September 2004.

- [4] I-Hsiang Lin, M. DeVincentis, and C. Caloz, and T. Itoh, "Arbitrary Dual-Band Composite Using Composite Right/Left-Handed Transmission Lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 4, pp. 1142-1149, April 2004.
- [5] X. Q. Lin, R. P. Liu, X. M. Yang, J. X. Chen, X. X. Yin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Arbitrarily Dual-Band Components Using Simplified Structures of Conventional CRLH TLs," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 7, pp. 2902-2909, July 2006.
- [6] A. Wagemans, "A 3.5 mW 2.5 GHz diversity receiver and a 1.2 mW 3.6 GHz VCO in silicon-on-anything," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Tech. Dig., pp. 250-251, February 1998.

#### 저 자 소 개

최 재 원(학생회원)  
대한전자공학회 논문지  
vol. 44, no. 11 참조

서 철 현(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
vol. 31, no. 6 참조