

논문 2011-48TC-2-15

# Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

## (Low Phase Noise VCO using Metamaterial Transmission Line Based on Complementary Spiral Resonator and Interdigital Structure)

최 재 원\*, 서 철 현\*\*

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

### 요 약

본 논문에서는 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로가 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄이기 위해서 제안되었다. 이와 같은 메타물질 전송 선로는 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조의 배열과 신호 면의 인터디지털 전송 선로를 적용하여 구현되었다. 신호 면의 인터디지털 전송 선로는 인터디지털 구조가 없는 일반적인 전송 선로보다 더 높은 공진 Q 특성을 얻기 위해서 사용되었다. 제안된 메타물질 전송 선로의 공진 특성과 Q 특성의 고유 포화 특성이 신호 면의 전송 선로의 폭, complementary 나선형 공진 구조의 크기, complementary 나선형 공진 구조 사이의 전류 방향, complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수를 변화시킴으로써, 그리고 인터디지털 구조의 유무에 의해서 분석되어졌다. 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 주파수 조절 범위는  $-127.50 \sim -125.33$  dBc/Hz @ 100 kHz와 5.744 ~ 5.852 GHz이다.

### Abstract

In this paper, the metamaterial transmission line (TL) based on the complementary spiral resonators (CSRs) and interdigital structure is presented for reducing the phase noise of the voltage-controlled oscillator (VCO). The metamaterial TL is realized by adopting the array of the CSRs etched on the ground plane and the interdigital transmission line on the signal plane. The interdigital TL on the signal plane has been used to obtain higher Q value than the conventional TL without the interdigital structure. The resonance properties and inherent saturation of Q value of the proposed metamaterial TL have been analyzed by varying the width of the TL on the signal plane, dimensions of the CSRs, current directions between the CSRs, number of the unit cell-pair of the CSRs, and whether or not there is the interdigital structure in this paper. The phase noise and tuning range of the proposed VCO are  $-127.50 \sim -125.33$  dBc/Hz at 100 kHz and 5.744 ~ 5.852 GHz.

**Keywords :** VCO, phase noise, metamaterial transmission line (TL), complementary spiral resonators (CSRs), interdigital structure

## I. 서 론

무선 통신 시장의 최근 급속한 성장은 이동 통신 응용 분야에서 더 많은 가용 채널에 대한 요구를 증가시키고 있다. 이러한 요구는 무선 시스템에 더욱 더 엄격한 요구 조건을 부여한다. 특히, 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 중요한 동작 특성 중의 하나이다. 전압

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

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음.[KI002071, 메타전자파구조를 이용한 전파(RF)스펙트럼 특성 개선 기술 연구  
접수일자: 2011년1월31일, 수정완료일: 2011년2월18일

제어 발진기에서 저위상 잡음 특성을 얻기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 기술은 높은 유전율의 유전체 공진기, 헤어-핀 공진기, 분할 링 공진기, 나선형 공진기와 같은 높은 공진 Q 특성을 갖는 공진기를 적용하는 것이다<sup>[1~3]</sup>.

분할 링 공진기와 비교했을 때, 이중 턴 나선형 공진기는 동일한 크기에서 분할 링 공진기의 공진 주파수의 절반에서 최초 공진이 발생한다. Complementary 분할 링 공진기 대신에 complementary 나선형 공진기를 사용할 때, 공진기 크기의 소형화는 동일한 공진 주파수에서 상당히 이루어질 수 있다. Complementary 나선형 공진기의 커패시턴스는 공진기 끝단의 폭이  $c$ 인 도체면에 의해 둘러싸인  $r_0 - c/2$ 의 반지름을 갖는 디스크의 커패시턴스인 complementary 분할 링 공진기의 커패시턴스와 동일하다 ( $c$ 는 링의 폭이고  $r_0$ 는 링의 평균 반지름이다). Complementary 나선형 공진기의 인덕턴스는 내부 디스크를 접지 면에 연결한 도체의 인덕턴스이다. 이 인덕턴스는 complementary 분할 링 공진기의 인덕턴스 보다 네 배 더 크다. 이와 같은 이유로 complementary 나선형 공진기의 공진 주파수는 complementary 분할 링 공진기의 공진 주파수 보다 절반 작다. 다중 턴 complementary 나선형 공진기의 배열은 분산 커패시턴스와 분산 인덕턴스를 증가시킴으로써 공진기의 크기를 더욱 더 줄이고 공진 Q 특성을 더욱 더 개선시키기 위해서 사용되었다<sup>[4~5]</sup>.

인터디지털 구조는 일반적인 전송 선로보다 더 높은 공진 Q 값을 얻고 더욱 더 우수한 공진 특성을 얻기 위해서 사용되었다. 공진기 크기는 인터디지털 구조를 사용함으로써 쉽게 소형화되어질 수 있다. 이는 전체 분산 커패시턴스가 제한된 인터디지털 구조의 간격 사이의 결합 효과에 의해 증가되었기 때문이다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 접지 면에 complementary 분할 링 공진기 대신에 complementary 나선형 공진기로 대체하였고, 신호 면의 전송 선로에 인터디지털 구조를 적용하였다. 제안된 메타물질 전송 선로의 공진 특성과 Q 특성의 고유 포화 특성이 신호 면의 전송 선로의 폭, complementary 나선형 공진 구조의 크기, complementary 나선형 공진 구조 사이의 전류 방향, complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수를 변화시킴으로써, 그리고 인터디지털 구조의 유무에 의해서 분석되어졌다. 위상 잡음은 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이

용하여 크게 감소하였다.

## II. 설계 원리

저위상 잡음 전압 제어 발진기를 구현하기 위해 사용되는 공진기의 구조는 그림 1에 나와 있다. 그림 1에서, 검은색 영역, 짙은 회색 영역, 옅은 회색 영역은 접지면에 식각된 삼중 턴 complementary 나선형 공진기의 여섯 개 단위 셀 쌍, 신호 면의 인터디지털 전송 선로, 접지 면을 각각 나타낸다. Complementary 나선형 공진 구조 사이의 네 가지 다른 전류 방향과 관련된 레이아웃은 그림 2에 나와 있다. 공진 Q 값이 사중 턴 이상에서 포화되기 때문에 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조가 메타물질 전송 선로를 설계하기 위해 사용되었다. Complementary 나선형 공진 구조 사이의 네 가지 다른 전류 방향에서의 공진 특성 설계 결과는 그림 3 (a)에 나와 있다. 공진 Q 값은 HFSS EM-설계 툴에 의해 중심 주파수와 3-dB 대역폭 사이의 비를 통하여 계산되었다. 본 구조의 크기는 complementary 나선형

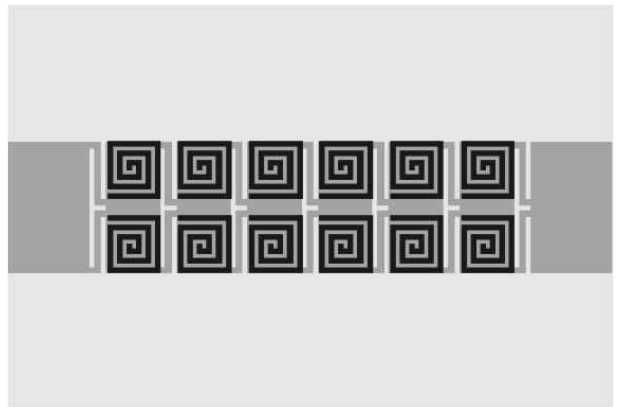


그림 1. 접지 면에 식각된 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개 단위 셀 쌍과 신호 면의 인터디지털 구조를 기반으로 한 메타물질 전송선로의 구조 (검은색 영역은 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조를 나타내고, 짙은 회색 영역은 신호 면의 인터디지털 전송 선로를 나타내고, 옅은 회색 영역은 접지 면을 나타낸다)

Fig. 1. Topology of metamaterial TL based on six unit cell-pairs of three-turn CSRs etched on ground plane and interdigital structures on signal plane (Black region denotes CSRs etched on ground plane, dark gray region denotes interdigital TL on signal plane, light gray region denotes ground plane).

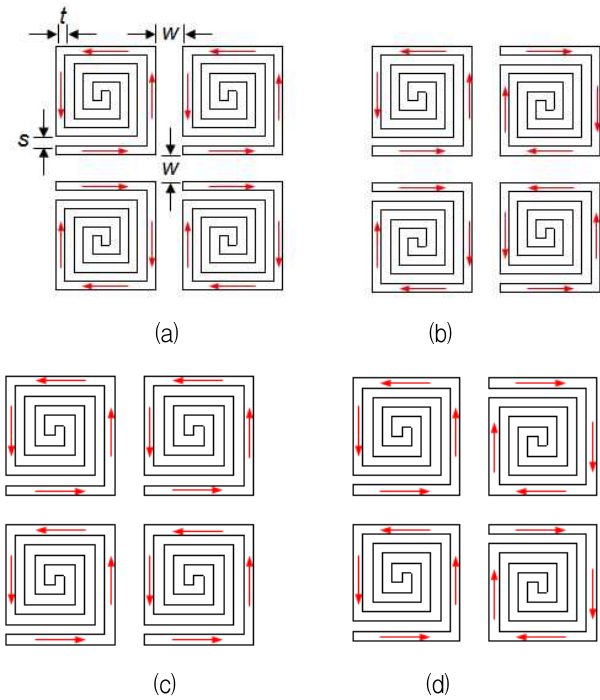
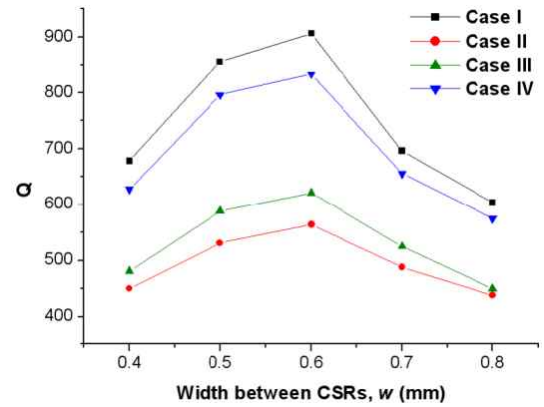


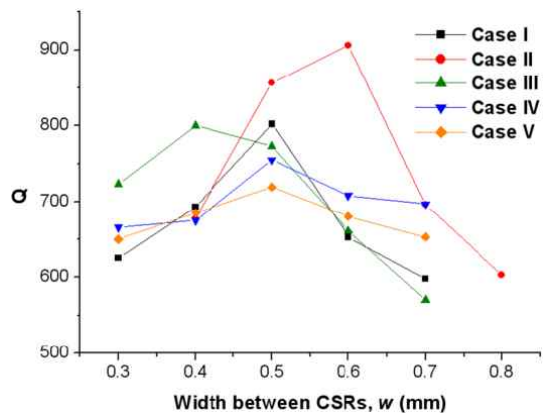
그림 2. 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조 사이의 네 가지 다른 전류 방향 (a) 경우 I : 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향, (b) 경우 II : 동일한 수평/수직 전류 방향, (c) 경우 III : 반대의 수평/수직 전류 방향, (d) 경우 IV : 반대의 수평 전류 방향과 동일한 수직 전류 방향

Fig. 2. Four different current directions between CSRs etched on ground plane (a) Case I : same horizontal current direction and opposite vertical current direction, (b) Case II : same horizontal and vertical current directions, (c) Case III : opposite horizontal and vertical current directions, (d) Case IV : opposite horizontal current direction and same vertical current direction.

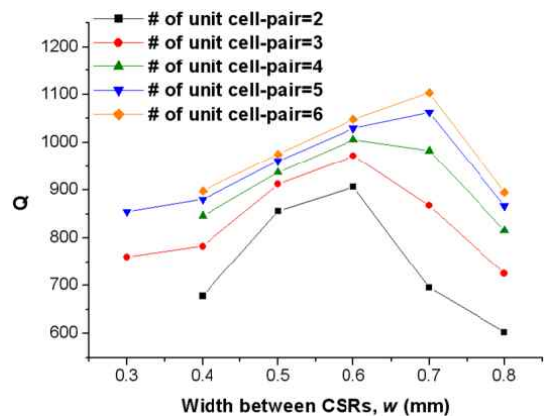
공진 구조의 선로 두께,  $t$  는 0.2 mm이고, complementary 나선형 공진 구조의 선로 사이의 간격,  $s$  는 0.2 mm이다. Complementary 나선형 공진 구조의 두 개의 단위 셀 짝은 접지 면에 식각되었다. 설계 결과에서 보듯이, complementary 나선형 공진 구조 사이의 폭,  $w$  이 0.6 mm일 때, 공진 특성은 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향을 갖는 첫 번째 경우에서 제일 우수하다. Complementary 나선형 공진 구조의 다양한 크기에서의 공진 특성 설계 결과는 그림 3 (b)에 나와 있다. 그림 3 (b)에서, 경우 I의 구조적 치수는  $t = s = 0.1$  mm이고, 경우 II의 구조적 치수는  $t = s = 0.2$  mm 이고, 경우 III의 구조적 치수는  $t = 0.2$  mm,  $s = 0.3$



(a)



(b)



(c)

그림 3. 다양한 경우에 따른 공진 특성의 설계 결과 (a) Complementary 나선형 공진 구조 사이의 네 가지 다른 전류 방향, (b) Complementary 나선형 공진 구조의 다양한 크기, (c) Complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 짝의 수

Fig. 3. Simulation results of resonance properties as a variety of cases.

(a) Four different current directions between CSRs, (b) Various dimensions of CSRs, (c) Number of unit cell-pair of CSRs

mm이고, 경우 IV의 구조적 치수는  $t = 0.3$  mm,  $s = 0.2$  mm이고, 경우 V의 구조적 치수는  $t = s = 0.3$  mm이다. 위의 모든 경우에서, 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향을 갖는 구조가 설계에 적용되었다. 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 두 개의 단위 셀 쌍이 접지 면에 식각되었다. 설계 결과에서 보듯이,  $w$ 가 0.6 mm일 때, 공진 특성은  $t = s = 0.2$  mm의 구조적 치수를 갖는 경우 II에서 가장 우수하다. Complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수에 따른 공진 특성 설계 결과는 그림 3 (c)에 나와 있다. 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향을 갖는 구조가 설계에 적용되었다. 본 설계에 적용된 구조적 치수는  $t = s = 0.2$  mm이다. 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조가 접지 면에 식각되어 있다. 설계 결과에서 보듯이, complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수가 특정 한계 수 이상으로 증가하면 내부 선로와 관련된 분산 커패시턴스의 영향력은 점점 더 약해질 것이다. Complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수가 특정 한계 수 이상으로 증가하는 것은 공진 특성의 어떠한 추가적인 개선을 만들 수 없다는 것이 확실하다. 그러므로 complementary 나선형 공진 구조의 불필요한 단위 셀 쌍이 증가하는 것을 방지하기 위해서 공진기를 형성하는 complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 수가 공진 특성과 공진기 크기를 고려하여 선택되어야 한다<sup>[4]</sup>.

신호 면의 전송 선로의 레이아웃은 그림 4에 나와 있

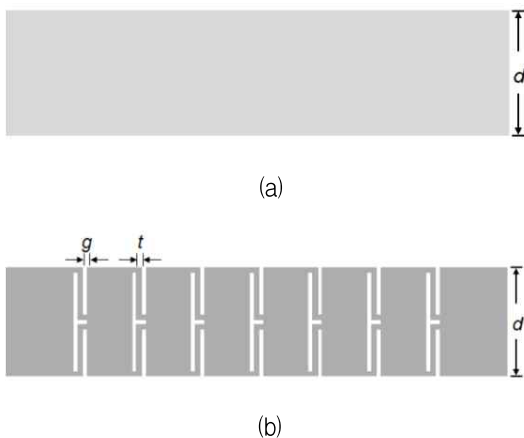
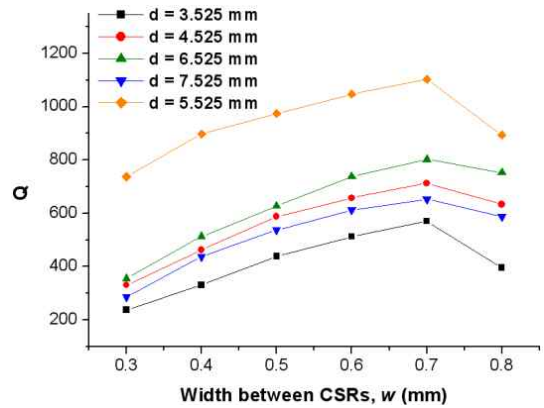


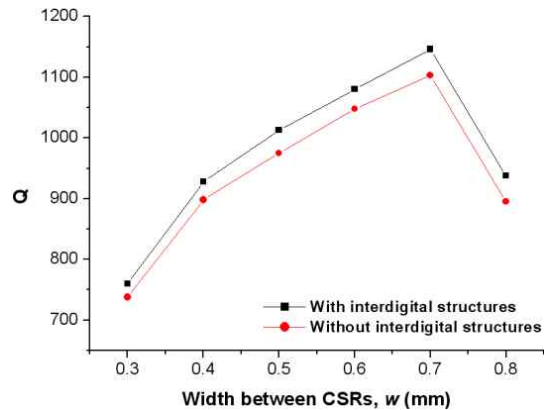
그림 4. 신호 면의 전송 선로의 레이아웃 (a) 인터디지털 구조가 없는 일반적인 전송 선로, (b) 인터디지털 전송 선로

Fig. 4. Layouts of transmission line on signal plane (a) Conventional transmission line without interdigital structures, (b) Interdigital transmission line.

다. 그림 4 (a)는 인터디지털 구조가 없는 일반적인 전송 선로이고, 그림 4 (b)는 인터디지털 전송 선로이다. 전송 선로의 폭,  $d$ 의 변화와 인터디지털 구조의 유무에 따른 공진 특성을 분석하기 위하여 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향을 갖는 구조,  $t = s = 0.2$  mm의 구조적 치수, 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개의 단위 셀 쌍이 적용되었다. 전송 선로의 폭,  $d$ 에 따른 공진 특성 설계 결과가 그림 5 (a)에 나와 있다. 설계 결과에서 보듯이,  $w$ 가 0.7 mm일 때, 공진 특성은 전송 선로의 폭,  $d$ 가 5.525 mm인 경우에 가장 우수하다. 접지 면에 식각된 complementary 나



(a)



(b)

그림 5. 전송 선로의 폭의 변화와 인터디지털 구조의 유무에 따른 공진 특성 설계 결과 (a) 전송 선로의 폭의 변화에 따른 공진 특성 설계 결과, (b) 인터디지털 구조의 유무에 따른 공진 특성 설계 결과

Fig. 5. Simulation results of resonance properties as varying width of transmission line, and when there is interdigital structures (a) As varying width of transmission line, (b) When there is interdigital structures.

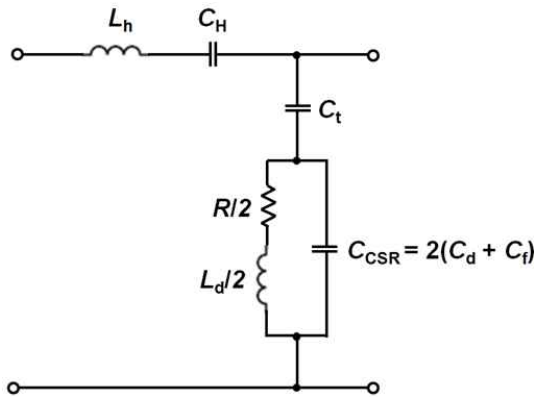


그림 6. 접지 면에 식각된 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개 단위 셀 쌍과 신호 면의 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 등가 회로 모델

Fig. 6. Equivalent circuit model of metamaterial TL based on six unit cell-pairs of three-turn CSRs etched on ground plane and interdigital structures on signal plane.

선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 폭이 5.525 mm이다. 즉, 신호 면의 전송 선로의 폭이 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 폭과 동일할 때, 공진 특성이 가장 우수하다. 그러므로 신호 면의 전송 선로의 폭이 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍의 폭 보다 좁거나 넓을 경우, 신호 면의 전송 선로와 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조 사이의 넓은 측면 결합이 충분히 발생하지 못하기 때문에 공진 특성은 크게 약화된다. 이와 같은 결과는 인터디지털 구조가 없는 전송 선로의 경우에서 설계한 결과를 통하여 얻어진 것이다. 신호 면의 전송 선로 상에 인터디지털 구조가 있는 경우의 공진 특성 설계 결과는 그림 5 (b)에 나와 있다. 인터디지털 구조의 두께,  $t$ 는 0.24 mm이고, 인터디지털 구조 사이의 간격,  $g$ 는 0.23 mm이다. 설계 결과에서 보듯이, 인터디지털 구조가 있는 전송 선로의 공진 특성은 인터디지털 구조가 없는 전송 선로의 공진 특성 보다 우수하다. 이는 전체 분산 커패시턴스가 제안된 인터디지털 구조 간격 사이의 결합 효과에 의해 증가되었기 때문이다<sup>[6~7]</sup>. 위의 이러한 결과들을 통하여, 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향,  $t = s = 0.2$  mm,  $w = 0.7$  mm의 complementary 나선형 공진 구조의 구조적 치수, 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개 단위 셀 쌍,  $d = 5.525$  mm,  $g = 0.23$  mm, 인터디지털 구조의 두께,  $t = 0.24$  mm의

인터디지털 전송 선로의 구조적 치수를 갖는 구조가 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 구현하기 위하여 적용되었다.

저위상 잡음 전압 제어 발진기를 구현하기 위하여 사용된 공진기의 등가 회로 모델은 그림 6에 나와 있다. 그림 6에서, complementary 나선형 공진 구조의 커패시턴스 ( $C_{CSR}$ )는 complementary 나선형 공진 구조의 내부와 외부 선로 사이의 분산 커패시턴스 ( $C_d$ )와 complementary 나선형 공진 구조의 선로 끝단에 직렬로 연결된 가장자리 커패시턴스 ( $C_f$ )의 병렬 결합을 의미한다. 이 커패시턴스 ( $C_{CSR}$ )와 분산 인덕턴스 ( $L_d$ )는 complementary 나선형 공진 구조의 턴 수에 영향을 받는다. 신호 면의 인터디지털 전송 선로의 커패시턴스 ( $C_H$ )와 인덕턴스 ( $L_h$ )는 인터디지털 전송 선로의 구조적 치수에 영향을 받는다. 인터디지털 전송 선로의 커패시턴스 ( $C_H$ )는 전송 선로의 고유 커패시턴스와 인터디지털 구조 간격 사이의 결합에 의해 발생하는 커패시턴스의 결합을 의미한다. 신호 면과 접지 면 사이의 간격에 의한 커패시턴스 ( $C_t$ )는 기판의 두께에 영향을 받고, 그러므로 이 커패시턴스는 고정된 값이다.  $R$ 이라고 하는 회로 파라미터는 나선형 선로의 저항을 의미한다. Complementary 나선형 공진 구조의 분산 인덕턴스 ( $L_d$ )와 저항 ( $R$ )은 절반 값을 갖는다. Complementary 나선형 공진 구조의 분산 커패시턴스 ( $C_d$ )와 가장자리 커패시턴스 ( $C_f$ )는 두 배의 값을 갖는다. 이는 complementary 나선형 공진 구조의 단위 셀 쌍이 병렬로 연결되어 있기 때문이다.

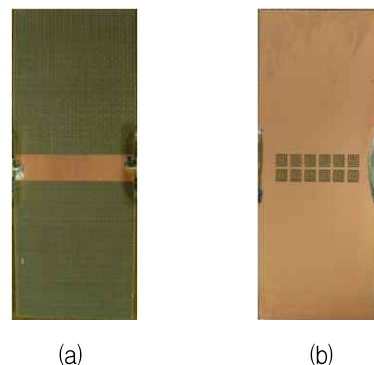


그림 7. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 제작 기판 사진 (a) 신호 면, (b) 접지 면

Fig. 7. Fabrication of metamaterial TL based on CSRs without interdigital structures (a) Top view (signal plane), (b) Bottom view (ground plane).

### III. 제작 및 실험 결과

Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조를 기반으로 한 메타물질 전송 선로의 기판 제작 사진은 그림 8에 나와 있다. 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향,  $t = s = 0.2 \text{ mm}$ ,  $w = 0.7 \text{ mm}$ 의 complementary 나선형 공진 구조의 구조적 치수, 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개 단위 셀 쌍,  $d = 5.525 \text{ mm}$ ,  $g = 0.23 \text{ mm}$ , 인터디지털 구조의 두께,  $t = 0.24 \text{ mm}$ 의 인터디지털 전송 선로의 구조적 치수를 갖는 구조가 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 제작하기 위하여 사용되었다. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로는 인터디지털 구조가 있는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로와 공진 특성을 비교하기 위하여 제작되었다. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로는 위에서 언급한 동일한 구조적 치수와 크기, 구조를 적용하여 설계되었다. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 제작 기판 사진은 그림 7에 나와 있다. 이와 같은 공진기들은 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 사의 TLC 기판으로 제작되었다. 공진기들의 공진 특성 측정 결과와 설계 결과는 그림 9에 나와 있다. 그림 9 (a)는 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전

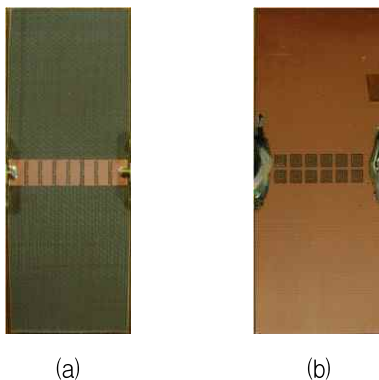


그림 8. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 제작 기판 사진 (a) 신호 면, (b) 접지 면  
 Fig. 8. Fabrication of metamaterial TL based on CSRs and interdigital structures (a) Top view (signal plane), (b) Bottom view (ground plane).

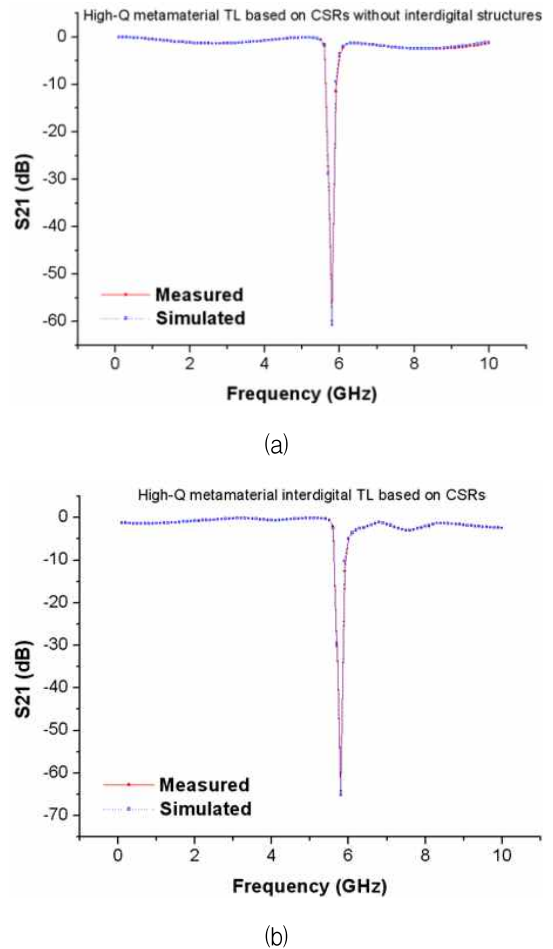


그림 9. 공진 특성 측정 결과 및 설계 결과 (a) 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로, (b) Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로  
 Fig. 9. Measured and simulated resonance properties (a) Metamaterial TL based on CSRs without interdigital structures, (b) Metamaterial TL based on CSRs and interdigital structures.

송 선로의 공진 특성 측정 결과와 설계 결과를 보여준다. 측정된 신호 저지 특성 ( $S_{21}$ )과 공진 Q 값은 5.8 GHz의 공진 주파수에서 각각 -58.65 dB와 약 1083이다. 높은 신호 저지 특성과 높은 공진 Q 값은 complementary 나선형 공진 구조의 내부와 외부 선로 사이의 결합과 신호 면의 전송 선로와 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조 사이의 넓은 측면 결합 때문이다. 그림 9 (a)에 나와 있는 결과에서 보듯이, 공진 특성 측정 결과는 설계 결과와 유사하다. 그림 9 (b)는 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 공진 특성 측정 결과 설계 결과를 보여준다. 측정된 신호 저지 특성 ( $S_{21}$ )과

공진 Q 값은 5.8 GHz의 공진 주파수에서 각각 -66.33 dB와 약 11526이다. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 공진 특성과 비교했을 때, complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 공진 특성은 약 4 % 개선되었다. 이와 같은 공진 특성의 개선은 전체 분산 커패시턴스가 제안된 인터디지털 구조 간격 사이의 결합 효과에 의해 증가되었기 때문이다. 본 공진기 설계에서 공진 특성 측정 결과와 설계 결과가 유사하게 잘 설계되었다. 그림 10은 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 분산 곡선 설계 결과를 보여준다. 그림 10에 나와 있는 것처럼, complementary 나선

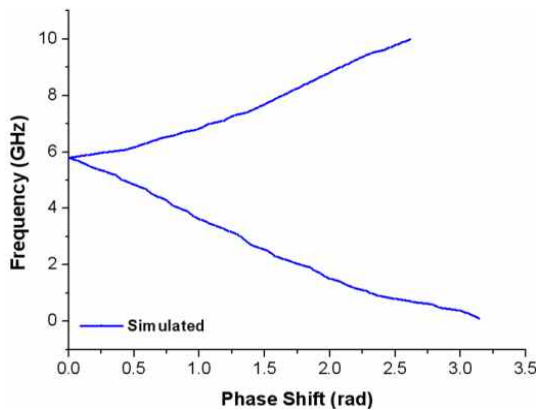


그림 10. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 분산 곡선 설계 결과

Fig. 10. Simulated dispersion curve of metamaterial TL based on CSRs and interdigital structure.

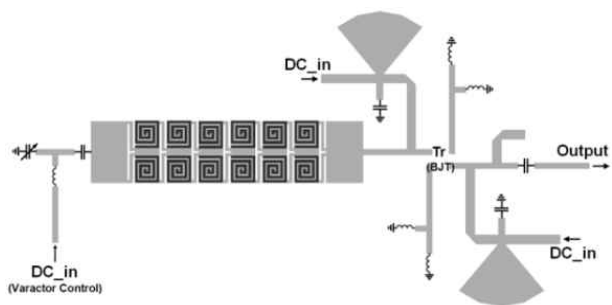
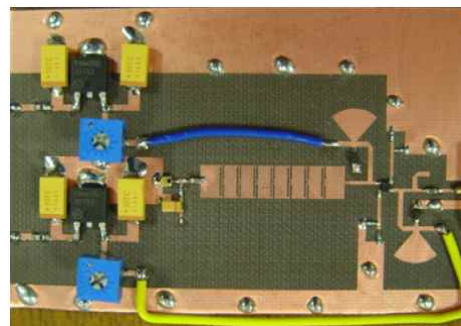


그림 11. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 레이아웃 (검은색 영역은 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조를 의미한다)

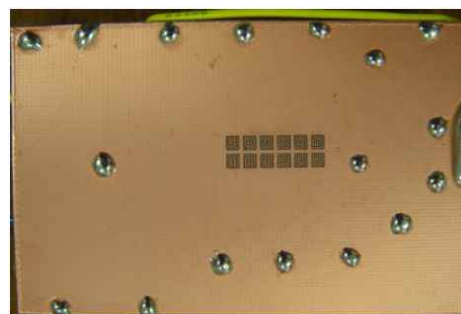
Fig. 11. Layout of proposed VCO using metamaterial TL based on CSRs and interdigital structures (Black region denotes CSRs etched on ground plane).

형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로는 5.8 GHz의 공진 주파수에서 좌향 전송 선로임을 알 수 있다.

Advanced Design System (ADS) 설계 툴이 전압 제어 발진기의 비선형 설계와 위상 잠음 설계를 위하여 사용되었다. 제안된 전압 제어 발진기의 전체 레이아웃은 그림 11에 나와 있다. 검은색 영역은 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조를 나타낸다. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 기판 제작 사진은 그림 12에 나와 있다. 제안된 전압 제어 발진기는 3.2의 유전율과 31 mils의 두께를 갖는 Taconic 사의 TLC 기판을 사용하여 제작되었고, NEC사의 NE661M04 BJT 소자와 M/A-COM사의 MA46H202 버랙터 다이오드를 이용하여 설계되었다. 제안된 전압 제어 발진기의 측정된 출력 스펙트럼과 위상 잠음은 그림 13에 나와 있다. 제안된 전압 제어



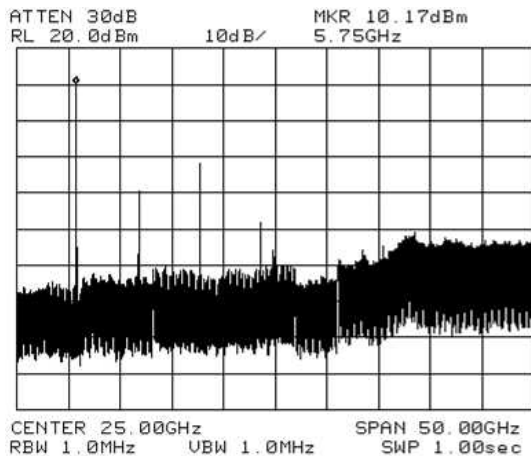
(a)



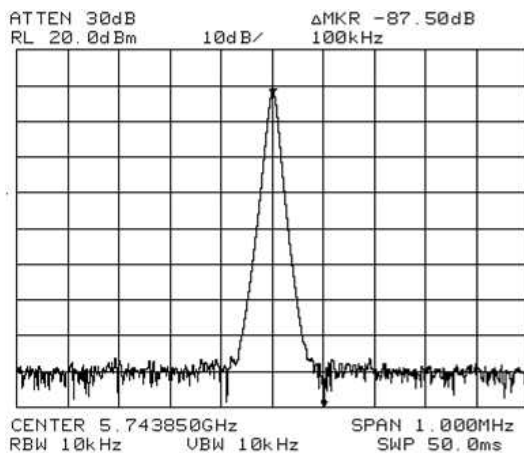
(b)

그림 12. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 제작 기판 사진 (a) 신호 면, (b) 접지 면

Fig. 12. Fabrication of proposed VCO using metamaterial TL based on CSRs and interdigital structures (a) Top view (signal plane), (b) Bottom view (ground plane).



(a)



(b)

그림 13. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 측정 결과 (a) 출력 스펙트럼, (b) 위상 잡음

Fig. 13. Measured results of proposed VCO using meta-material TL based on CSRs and interdigital structures (a) Output spectrum, (b) Phase noise.

발진기의 출력 전력과 고조파 특성은 각각 10.17 dBm과 -21.84 dBc이다. 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 5.744 ~ 5.852 GHz의 주파수 조절 범위에서 -127.50 ~ -125.33 dBc/Hz @ 100 kHz 이다. 제안된 저위상 잡음 전압 제어 발진기를 구현하기 위하여 적용된 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로의 물리적 크기는 16.7 mm × 5.525 mm이다. 공진기의 소형화와 전압 제어 발진기의 저위상 잡음 특성은 complementary 나선형 공진 구조의 내부와 외부 선로 사이의 결합, 신호 면의 전송 선로와 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공

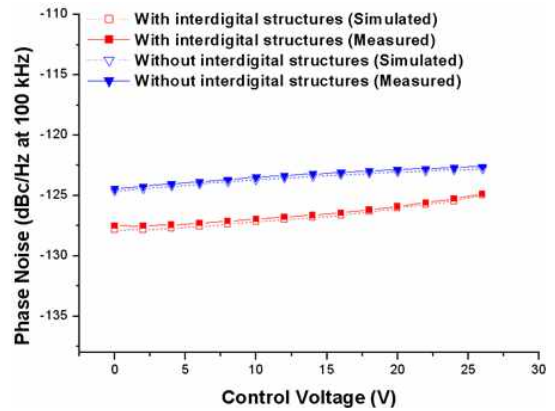


그림 14. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로와 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 전압 제어 발진기들의 위상 잡음 특성 설계 및 측정 결과

Fig. 14. Simulated and measured results of phase noise properties of VCOs using metamaterial TL based on CSRs without interdigital structures and metamaterial TL based on CSRs and interdigital structures.

진 구조 사이의 넓은 측면 결합, 제안된 인터디지털 구조 간격 사이의 결합을 강화함으로써 만들어졌다. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기와 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 전압 제어 발진기의 0 ~ 26 V의 비랙터 다이오드 조절 전압 범위에서 위상 잡음 특성 측정 결과와 설계 결과는 그림 14에 나와 있다. 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 비교했을 때, complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 그림 14에서 보듯이 약 3.27 dB 줄어들었다. 이는 전체 분산 커패시턴스가 제안된 인터디지털 구조 간격 사이의 결합 효과에 의해 증가되었기 때문이다. 설계 결과와 측정 결과는 일치된 특성을 보인다.

다른 전압 제어 발진기와의 특성 비교를 위하여 가장 널리 사용되어지는 Figure-Of-Merit (*FOM*)은 다음 식과 같이 정의된다.



표 1. 전압 제어 발진기 특성 비교  
Table 1. VCO Performance Comparisons.

동작 특성	단위	인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 전압 제어 발진기	Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 전압 제어 발진기
주파수	GHz	5.73	5.744
출력 전력	dBm	10.17	10.17
고조파 특성	dBc	-21.84	-21.84
위상 잡음	dBc/Hz @ 100 kHz	-124.43	-127.50
주파수 조절 범위	MHz	120	108
FOM	dBc/Hz	-204.28	-207.57

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

여기서  $L\{\Delta f\}$ 는  $f_o$ 의 캐리어 주파수로부터  $\Delta f$ 의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고  $P$ 는 전압 제어 발진기 코어의 소비 전력이다 [8]. 제안된 전압 제어 발진기의 FOM은 동일한 주파수 조절 범위에서 -207.57 ~ -206.77 dBc/Hz이다. Complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 구조를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기와 인터디지털 구조가 없는 complementary 나선형 공진 구조 기반의 메타물질 구조를 이용한 전압 제어 발진기의 동작 특성 측정 결과가 표 1에 요약 및 비교되어 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기에 대해 소개하였다. 동일한 수평 전류 방향과 반대의 수직 전류 방향,  $t = s = 0.2$  mm,  $w = 0.7$  mm의 complementary 나선형 공진

구조의 구조적 치수, 삼중 턴 complementary 나선형 공진 구조의 여섯 개 단위 셀 쌍,  $d = 5.525$  mm,  $g = 0.23$  mm, 인터디지털 구조의 두께,  $t = 0.24$  mm의 인터디지털 전송 선로의 구조적 치수를 갖는 구조가 complementary 나선형 공진 구조와 인터디지털 구조 기반의 메타물질 전송 선로를 제작하기 위하여 사용되었다. 공진기의 소형화와 전압 제어 발진기의 저위상 잡음 특성은 complementary 나선형 공진 구조의 내부와 외부 선로 사이의 결합, 신호 면의 전송 선로와 접지 면에 식각된 complementary 나선형 공진 구조 사이의 넓은 측면 결합, 제안된 인터디지털 구조 간격 사이의 결합을 강화함으로써 만들어졌다. 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 주파수 조절 범위는 -127.50 ~ -125.33 dBc/Hz @ 100 kHz와 5.744 ~ 5.852 GHz이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Choi, and C. Seo, "Microstrip square open loop multiple split ring resonator for low phase noise VCO," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 56, no. 12, pp. 3245-3252, December 2008.
- [2] J. Choi, M. H. Chen, and A. Mortazawi, "An X-band low phase noise oscillator employing a four-pole elliptic-response microstrip bandpass filter," in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., pp. 1529-1532, June 2007.
- [3] Y.-T. Lee, J.-S. Lim, C.-S. Kim, D. Ahn and S. Nam, "A compact-size microstrip spiral resonator and its application to microwave oscillator," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 12, no. 10, pp. 375-377, October 2002.
- [4] M. Gil, J. Bonache and F. Martin, "Ultra compact bandpass filters implemented through complementary spiral resonators (CSRs)," in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., pp. 1119-1122, June 2008.
- [5] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martin, R. Marques, F. Falcone, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, J. Garcia, I. Gil, and M. Sorolla, "Equivalent circuit models for split ring resonators and complementary split ring resonators coupled to planar transmission lines," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, pp. 1451-1461, April 2005.
- [6] C.-W. Tang, and W.-T. Liu, "Design of a wide stopband microstrip bandpass filter with interdigital resonators," IEEE Microw. Wireless

Compon. Lett., vol. 18, no. 12, pp. 767-769, December 2008.

- [7] F. Aznar, M. Gil, J. Bonache, J. Garcia-Garcia, and F. Martin, "Metamaterial transmission lines based on broad-side coupled spiral resonators," IEEE Electron. Lett., vol. 43, no. 9, pp. 530-532, April 2007.
- [8] A. Wagemans, "A 3.5 mW 2.5 GHz diversity receiver and a 1.2 mW 3.6 GHz VCO in silicon-on-anything," in IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig., pp. 250-251, February 1998.

— 저 자 소 개 —



최 재 원(학생회원)  
 2006년 2월 숭실대학교 정보통신  
 전자공학부 (공학사)  
 2008년 2월 숭실대학교 정보통신  
 공학과 (공학사)  
 2008년 3월~현재 숭실대학교  
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 전력증폭기, 전압 제어 발진기, 메타물질, 무선 에너지 전송, RFIC, Digital RF 등>

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