논문 2010-47TC-1-11

혼합 우좌향 전송 선로 기반의 새로운 고조파 조절 회로를 이용한 저위상 잡음 전압 제어 발진기

(Low Phase Noise VCO Using Novel Harmonic Control Circuit Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Line)

최 재 원*, 서 철 헌**

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 주파수 조절 범위의 감소 없이 위상 잡음을 줄이고 회로 크기를 최소화하기 위하여 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용한 새로운 전압 제어 발진기를 제안하였다. 위상 잡음은 2차와 3차 고조파에서 동시에 단락 임피던스를 갖는 새로운 고조파 조절 회로에 의해 줄어들었다. 제안된 고조파 조절 회로는 혼합 우좌향 전송 선로의 주파수 오프셋과 위상 기울기에 의한 이중 대역 특성을 갖는 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하여 설계되었다. 높은 Q 특성의 공진기는 위상 잡음을 줄이기 위하여 사용되어 왔지만, 주파수 조절 범위가 감소하는 문제를 갖고 있다. 하지만 제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 위상 잡음이 높은 Q 특성의 공진기 없이 감소하였기 때문에 줄어들지 않았다. 또한, 일반적인 우향 전송 선로 대신 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하는 것을 통하여 회로의 크기를 소형화 하였다. 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 5.731 ~ 5.938 GHz의 주파수 조절 범위 내에서 100 kHz의 오프셋 주파수에서 -119.17 ~ -117.50 dBc/Hz이다.

Abstract

In this paper, a novel voltage-controlled oscillator (VCO) using the harmonic control circuit based on the composite right/left-handed (CRLH) transmission lines (TLs) is presented to reduce the phase noise without the reduction of the frequency tuning range and miniaturize the circuit size. The phase noise is reduced by the novel harmonic control circuit having the short impedances for the second- and third-harmonic components. The proposed harmonic control circuit is designed by using the CRLH TLs with the dual-band characteristic by the frequency offset and phase slope of the CRLH TLs. The high-Q resonator has been used to reduce the phase noise, but has the problem of the frequency tuning range reduction. However, the frequency tuning range of the proposed VCO has not been reduced because the phase noise has been reduced without the high-Q resonator. The miniaturization of the circuit size is achieved by using the CRLH TLs instead of the conventional right-handed (RH) TLs. The phase noise of VCO is -119.17 ~ -117.50 dBc/Hz at 100 kHz in the tuning range of 5.731 ~ 5.938 GHz.

Keywords: VCO, Phase Noise, Frequency Tuning Range, Miniaturization, Novel Harmonic Control Circuit, CRLH TLs

I. 서 론

최근 무선 통신 분야의 급속한 성장은 이동 통신 응용 분야에 더 많은 이용 가능한 채널에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구는 전압 제어 발진기의 위상 잡음에 대한 더욱 더 엄격한 요구 조건을 부과한다. 저

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

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0080772)

접수일자: 2010년1월6일, 수정완료일: 2010년1월11일

위상 잡음 전압 제어 발진기의 구현은 전압 제어 발진기의 위상 잡음이 정보 전달 기능의 서비스 품질에 대하여 가장 중요한 요소들 중의 하나이기 때문에 많은 관심을 끌고 있다. 전압 제어 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q 특성에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 최근에 분할 링 공진기 (SRR), 마이크로스트립 사각 개방 루프 공진기, 헤어핀 공진기 등과 같은 높은 Q 특성의 공진기들에 많은 관심이 있다. 높은 Q 특성의 공진기는 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있지만, 주파수 조절 범위가 감소하는 문제를 갖고 있다. 위상 잡음이 발생하는 주요 원리는 기저 대역에서의 열 잡음 성분들과 발진 주파수의 고조파 성분들의 상하향 변환이다. 고조파 조절 회로는 주파수 조절 범위 감소 없이 위상 잡음을 줄이기 위하여 사용될 수 있다[1~3].

Inverse class-F 전력증폭기의 고조파 조절 회로의 경우, 우 차수 고조파 성분의 컬렉터 전류와 기 차수 고조파 성분의 드레인 전압은 주파수 도메인에서 거의 영이다. 그래서 우 차수와 기 차수 고조파 성분들은 전력 스펙트럼 상에서 거의 억제된다. 하지만, 실제 구현했을 경우, 우 차수 고조파 성분들은 우 차수 고조파 성분들의 컬렉터 전류가 남아 있기 때문에 제거되지 않는다. 이런 경우에 우 차수 고조파 성분들은 전압 제어 발진기의 위상 잡음에 영향을 준다[4~5].

이와 같은 원리를 통하여 높은 Q 특성의 공진기들의 문제점은 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖도록 제안된 고조파 조절 회로 기반의 출력 정합 회로를 이용하여 해결할 수 있다. 제안된 고조파 조절 회로를 사용하여 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 이유는 두 가지가 있다. 첫째, 위상 잡음은 위상 잡음 증가와 관련된 중요한 요소인 고조파 성분들을 제거함으로써 억제된다. 둘째, 2차 고조파 성분에 대한 컬렉터 전압과 전류는 영이 된다. 이와 같은 이유로 제안된 고조파 조절 회로는 다른 고조파 조절 회로들 보다 고조파 성분들을 더욱 더 효율적이고 완벽하게 제거할 수 있다. 최근에 좌향 물질들이 마이크로파 분야에 많은 관심을 얻고 있다. 좌향 물질 구현을 위한 제안은 혼합 우좌향 전송 선로를 기반으로 발전하였는데, 이는 임의의 이중 대역 동작을 유발한다. 일반적인 우향 전송 선로를 혼합 우좌향 전송 선로로 대체함으로써, -90°와 -270° (또는 90°)의 위상 편이가 임의로 주어진 두 개의 주파수들에서 얻을 수 있다. 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖는 고조파 조절 회로를 설계하기 위하여 혼합 우좌향 전송 선로의 임의의 이중 대역 동작 특성이 사용된다. 회로 크기는 일반적인 우향 전송 선로 대신 혼합 우좌향 전송 선로를 사용함으로써 소형화되었다[6].

Ⅱ. 설계 원리

그림 1은 우향 전송 선로와 좌향 전송 선로의 인공의 정수 소자 구현의 단위 셀들을 보여준다. L_R과 C_R은 우향 전송 선로의 등가 정수 소자 모델의 단위 셀에서 각각 인덕턴스와 커패시턴스이다. L_L과 C_L은 좌향 전송 선로의 등가 정수 소자 모델의 단위 셀에서 각각 인덕턴스와 커패시턴스이다. 인공의 전송 선로들은 단위 셀에 의해 발생되는 위상 편이가 $\pi/2$보다 많이 작을 때 무한소 근사 가정을 통하여 N 개의 단위 셀들이 직렬로 연속적으로 연결됨으로써 얻어진다. 좌향 전송 선로

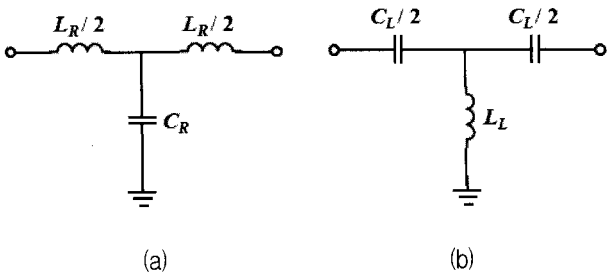


그림 1. 인공의 우향 전송 선로와 좌향 전송 선로의 T 형태 단위 셀
(a) 우향 전송 선로, (b) 좌향 전송 선로

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

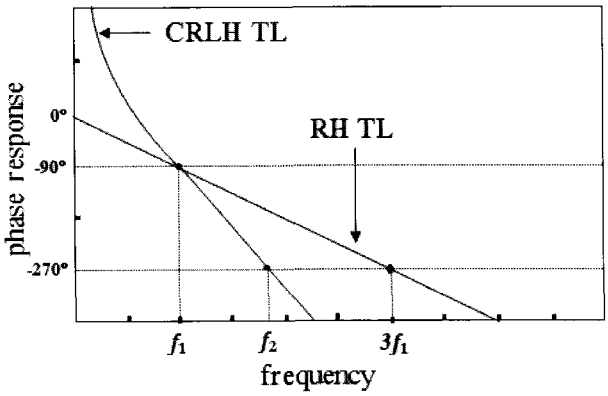


그림 2. 주파수 f_1에서 90°의 전기적 길이를 갖는 우향 전송 선로와 혼합 우좌향 전송 선로의 위상 응답

Fig. 2. Phase response of RH TL and CRLH TL, which both have electrical lengths of 90° at f_1.

는 인덕터와 커패시터의 위치가 서로 바뀌는 것과 같이 우향 전송 선로와 전기적으로 쌍대이다. 각각의 단위 셀의 전체 인덕턴스와 커패시턴스는 동일하다.

그림 2는 우향 전송 선로와 혼합 우좌향 전송 선로의 위상 응답을 보여준다. π/4 우향 전송 선로의 위상 곡선이 영에서 f_1까지의 주파수에서 직선이기 때문에, -90° 에서의 동작 주파수 f_1은 다음으로 이용 가능한 주파수가 -270°에서 $3f_1$임을 의미한다. 한편, π/4 혼합 우좌향 전송 선로는 주파수 오프셋과 위상 기울기가 자유롭게 조절 가능하기 때문에 두 개의 임의의 동작 주파수에서 π/4와 3π/4의 전기적 길이를 갖는다[6].

전압 제어 발진기의 위상 잡음은 기저 대역과 발진 주파수의 고조파에서의 열 잡음 성분들의 상하향 변환에 의해 영향을 받는다. 고조파 조절은 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있는 핵심적인 방법 중의 하나이다. 2차와 3차 고조파 성분들이 설계에 있어서 회로를 간단히 하기 위하여 적절히 조절되었다. 고조파 조절 회로는 그림 3에 나와 있는 것처럼, 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄이기 위하여 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖는 혼합 우좌향 전송 선로를 기반으로 설계되었다. 제안된 고조파 조절 회로는 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖는 혼합 우좌향 전송 선로, 바이어스 선로, 동작 주파수에서 50 Ω을 갖는 출력 정합 회로, 소자의 기생 수동 성분의 역조절 효과를 보상하기 위한 조절 선로로 구성된다[4~6].

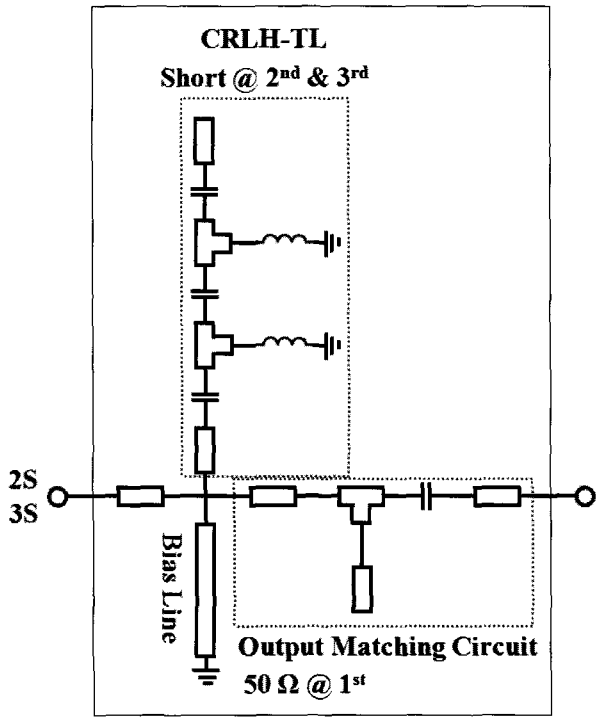


그림 3. 2차와 3차 고조파 성분에 대하여 단락 임피던스를 얻기 위한 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로

Fig. 3. Proposed harmonic control circuit based on CRLH TL to obtain short impedances for second- and third-harmonic components.

Class-F 혹은 inverse class-F 증폭기의 출력 정합 회로는 고조파 조절 회로를 갖는다. Inverse class-F 증폭기의 경우, 고조파 조절 회로는 그림 4. (a)에 나와 있는 것처럼, 2차 고조파 성분에 대하여 개방 임피던스와 3차 고조파 성분에 대하여 단락 임피던스를 갖는다.

Class-F 증폭기의 경우, 이와 반대이다. 반면, 제안된 전압 제어 발진기의 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로는 그림 4. (b)에 나와 있는 것처럼, 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖는

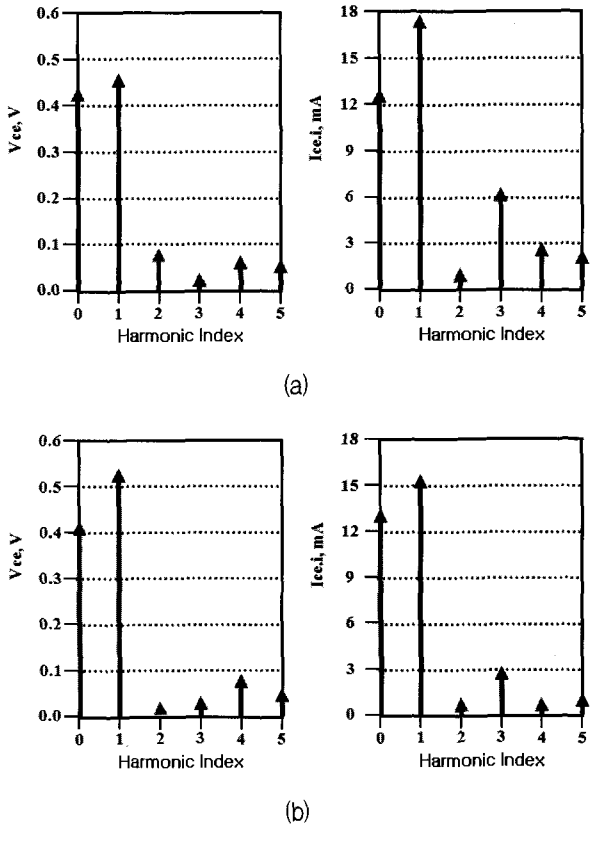


그림 4. 주파수 도메인에서의 컬렉터 전압과 전류 신호의 모의실험 값 (a) Inverse class-F 형태의 고조파 조절 회로, (b) 제안된 고조파 조절 회로

Fig. 4. Simulated root-mean-square values of collector voltage and current signals in frequency domain (a) Harmonic control circuit of inverse class-F type, (b) Proposed harmonic control circuit.

다. 이는 제안된 고조파 조절 회로가 그림 3에 나와 있는 것처럼, 일반적인 우향 전송 선로 대신 임의의 이중 대역 동작 특성을 갖는 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하여 구현되었기 때문이다. 일반적인 우향 전송 선로를 이용할 경우 두 개의 개방 스터브를 이용하여 두 개의 고조파 성분들이 조절되어지지만, 임의의 이중 대역 동작 특성을 갖는 혼합 우좌향 전송 선로를 이용할 경우 하나로 조절되어지기 때문에, 회로 크기의 소형화가 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용하여 얻어질 수 있다[5~6].

Inverse class-F 증폭기의 경우, 2차 고조파 성분의 컬렉터 전류와 3차 고조파 성분의 컬렉터 전압은 주파수 도메인에서 거의 영이 된다. 그래서 2차와 3차 고조파 성분들은 전력 스펙트럼 상에서 거의 억제된다. 하지만, 실제의 경우, 2차 고조파 성분은 2차 고조파 성분에 대한 컬렉터 전류가 남아있기 때문에 완벽하게 제거되지 않는다. 이러한 경우에 2차 고조파 성분은 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 증가시킨다. 이와 같은 문제는 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로를 이용하여 해결할 수 있다. 이는 2차 고조파 성분에 대한 컬렉터 전압 또한 2차 고조파 성분에 대한 단락 임피던스에 의해 영이 되었기 때문이다. 즉, 2차 고조파 성분에 대한 컬렉터 전압과 전류는 영이 된다. 그래서 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로는 다른 고조파 조절 회로들 보다 더욱 더 효율적으로 완벽하게 고조파 성분들을 제거할 수 있다[5].

전압 제어 발진기의 위상 잡음은 공진기의 Q 특성에 영향을 받는다. 높은 Q 공진기는 전압 제어 발진기의 위상 잡음을 줄일 수 있지만, 주파수 조절 범위 감소 문제를 갖고 있다. 이와 같은 문제는 높은 Q 특성의 공진기 대신에 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로를 이용하여 해결할 수 있다. 이는 위상 잡음 증가와 관련된 중요한 요소인 고조파 성분들이 제거됨으로써 위상 잡음이 주파수 조절 범위 감소 없이 억제되었기 때문이다[5].

Ⅲ. 제작 및 실험 결과

제안된 전압 제어 발진기는 두께가 31 mils이고, 유전율이 3.2인 Taconic사의 TLC 기판으로 제작되었고, NEC 사의 NE661M04 BJT 트랜지스터와 M/A-COM 사의 MA46H202 버랙터 다이오드를 이용하여 설계되었다. 그림 5는 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로의 모의실험 결과를 보여준다. 그림 5에 나와 있는 것처럼, 11.6 GHz와 17.4 GHz의 2차와 3차 고조파 성분들은 작은 임피던스를 갖는다. 즉, 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로는 2차와 3차 고조파 성분들에서 단락 임피던스를 제공한다. 5.8 GHz의 중심 주파수에 대한 정합 특성은 추가적인 출력 정합 회로가 없기 때문에 50 Ω에서 약간 빗나가 있다. 이는 추가적인 출력 정합 회로를 설계하여 중심 주파수를 50 Ω에 정합하였다.

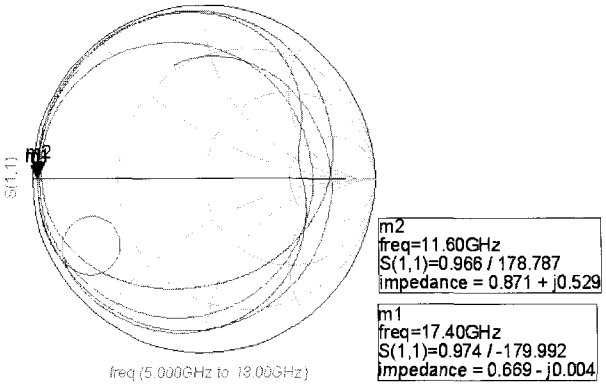


그림 5. 2차와 3차 고조파 성분들에서 단락 임피던스를 보이는 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로의 모의실험 결과

Fig. 5. Simulated result of proposed harmonic control circuit based on CRLH TL showing short impedances for second- and third-harmonic components.

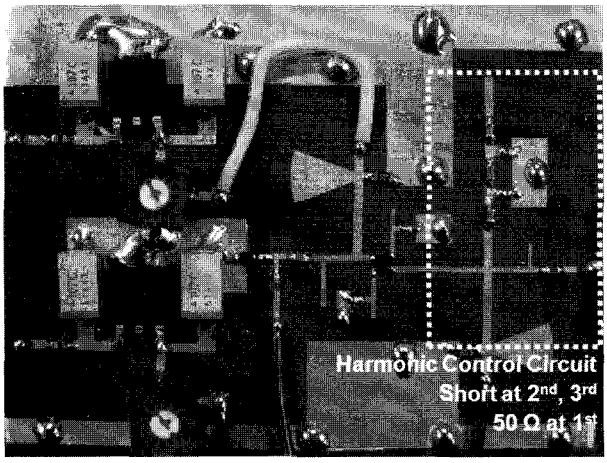
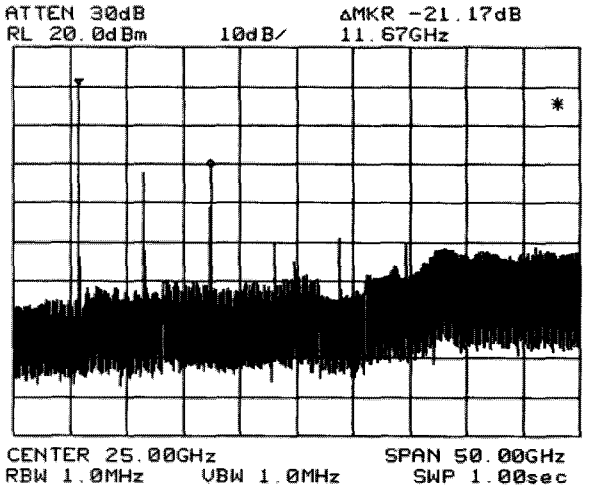


그림 6. 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용하여 제안된 전압 제어 발진기 구현

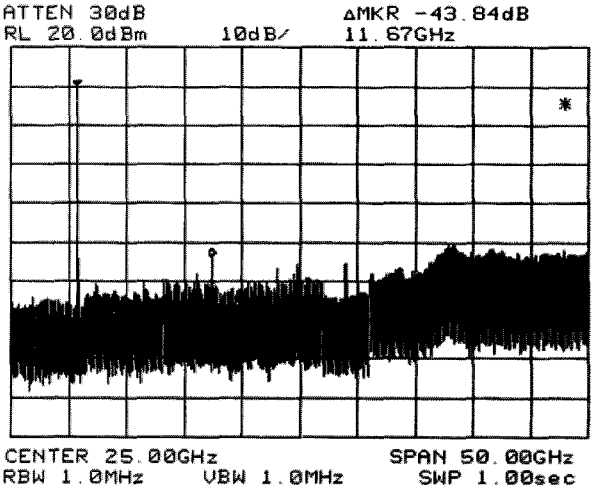
Fig. 6. Fabrication of proposed VCO using harmonic control circuit based on CRLH TL.

그림 6은 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용하여 제안한 전압 제어 발진기의 구현 모습

을 보여준다. 그림 6에서 보듯이, 제안된 전압 제어 발진기의 출력 정합 회로는 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 얻기 위한 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로와 중심 주파수를 50 Ω에 정합시키기 위한 출력 정합 회로로 구성된다. 낮은 Q 특성의 마이크로스트립 선로 공진기가 주파수 조절 범위를 증가시키기 위하여 사용되었다. 주파수 조절 범위 감소 없는 위상 잡음 특성 개선을 증명하기 위하여 비교용 전압 제어 발진기가 동일한 기판으로 제작



(a)



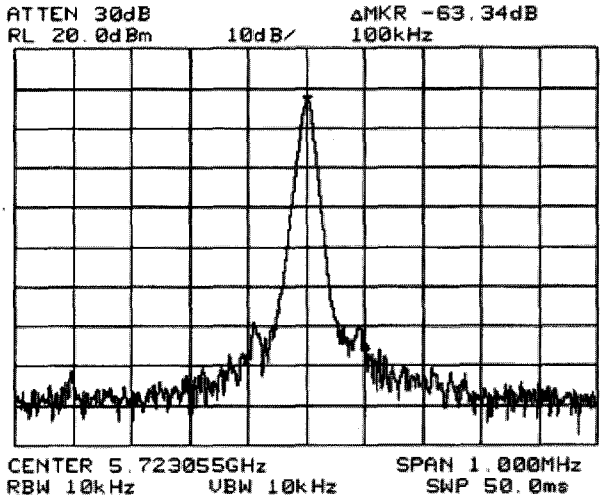
(b)

그림 7. 전력 스펙트럼 상에서의 전압 제어 발진기의 측정된 고조파 특성 (a) 제안된 고조파 조절 회로가 없는 경우, (b) 제안된 고조파 조절 회로가 있는 경우

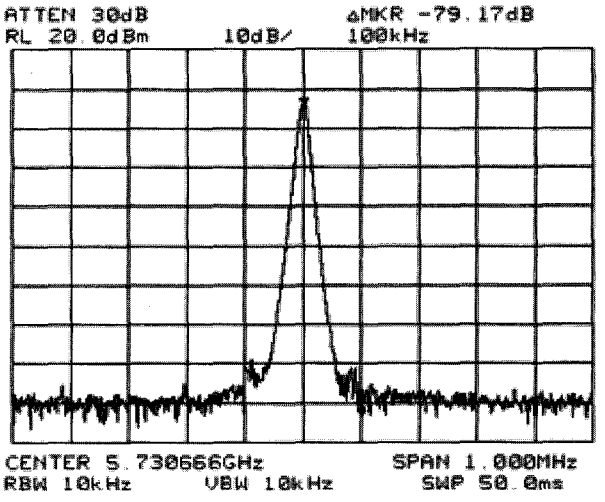
Fig. 7. Measured harmonic characteristics of VCO in power spectrum (a) Without proposed harmonic control circuit, (b) With proposed harmonic control circuit.

되었고, 동일한 소자를 이용하여 설계되었다. 비교용 전압 제어 발진기는 고조파 조절 회로가 없는 출력 정합 회로와 동일한 공진기를 이용하여 설계되었다. 또한, 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로의 소형화 특성을 증명하기 위하여, 회로의 크기는 혼합 우좌향 전송 선로가 없는 일반적인 우향 전송 선로를 이용한 고조파 조절 회로와 비교하였다.

그림 7은 비교용 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 고조파 특성을 보여준다. 비교용 전압 제어 발진기의 고조파 특성은 -21.17 dBc이다. 제안된 전압 제어 발진기의 2차와 3차 고조파 특성은 각각 -50.17 dBc와 -43.84 dBc이다. 다른 3차 이상의 고차



(a)



(b)

그림 8. 위상 잡음 특성 측정치 (a) 비교용 전압 제어 발진기, (b) 제안된 전압 제어 발진기

Fig. 8. Measured phase noise property. (a) Reference VCO, (b) Proposed VCO

고조파 성분들은 스펙트럼 분석기의 잡음 레벨 이하로 억제되었다. 이와 같은 결과를 통하여 고조파 성분들은 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 제안된 고조파 조절 회로에 의해 거의 모두 제거되었다. 그림 8은 비교용 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 측정치를 보여준다. 비교용 전압 제어 발진기는 5.723 ~ 5.934 GHz의 주파수 조절 범위에서 100 kHz의 오프셋 주파수에서 -103.34 ~ -101.83 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 제안된 전압 제어 발진기는 5.731 ~ 5.938 GHz의 주파수 조절 범위에서 100 kHz의 오프셋 주파수에서 -119.17 ~ -117.50 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 갖는다. 제안된 전압 제어 발진기의 출력 전력은 10.17 dBm이다. 이와 같은 결과를 통하여 위상 잡음은 고조파 성분들의 제거를 통하여 주파수 조절 범위 감소 없이 줄어들었다. 이는 위상 잡음이 공진기의 Q 특성 개선 대신 2차와 3차 고조파 성분들에 대하여 단락 임피던스를 갖는 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용하여 줄어들었기 때문이다. 비교용 전압 제어 발진기와 비교했을 때, 제안된 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 약 16 dB 개선되었다. 제안된 전압 제어 발진기의 회로 크기는 이전 논문에서 언급된 일반적인 우향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용한 전압 제어 발진기 보다 소형화 되었다[5]. 이는 일반적인 우향 전송 선로 기반의 두 개의 개방 스터브를 이용하여 조절된 두 개의 고조파 성분들이 임의의 이중 대역 동작 특성을 갖는 하나의 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하여 조절되었기 때문이다. 그림 9는 비교용 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 전압에 따른 위상 잡음 특성의 측정치와 모의실험 결과를 비교하고 있다. 그림에서 보듯이 제안된 전압 제어 발진기가 비교용 전압 제어 발진기 보다 위상 잡음 특성이 우수하며, 두 가지 전압 제어 발진기 모두 위상 잡음 특성의 측정치와 모의실험 결과가 오차가 거의 없다.

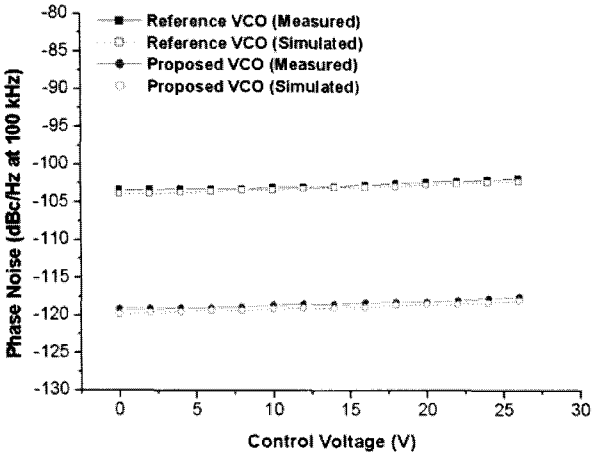


그림 9. 비교용 전압 제어 발진기와 제안된 전압 제어 발진기 사이의 위상 잡음 특성 비교

Fig. 9. Comparison of the phase noise property between reference VCO and proposed VCO.

서로 다른 전압 제어 발진기들 사이의 특성 비교를 위하여 가장 널리 사용되는 figure-of-merit (*FOM*)은 다음과 같이 정의한다.

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

식 (1)에서 $L\{\Delta f\}$는 f_o의 캐리어 주파수로부터 Δf의 오프셋 주파수에서의 위상 잡음이고 P는 전압 제어 발진기 코어의 소비 전력이다[7]. 제안된 전압 제어 발진기의 *FOM*은 영의 버랙터 다이오드 조절 전압에서 -199.50 dBc/Hz이다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 주파수 조절 범위의 감소 없이 위상 잡음을 줄이고 회로 크기를 최소화하기 위하여 혼합 우좌향 전송 선로 기반의 고조파 조절 회로를 이용한 새로운 전압 제어 발진기를 제안하였다. 위상 잡음은 2차와 3차 고조파에서 동시에 단락 임피던스를 갖는 새로운 고조파 조절 회로에 의해 줄어들었다. 제안된 고조파 조절 회로는 혼합 우좌향 전송 선로의 주파수 오프셋과 위상 기울기에 의한 이중 대역 특성을 갖는 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하여 설계되었다. 제안된 전압 제어 발진기의 주파수 조절 범위는 위상 잡음이 높은 Q 특성의 공진기 없이 감소하였기 때문에 줄어들지 않았다. 일반적인 우향 전송 선로 대신 혼합 우좌향 전송 선로를 이용하는 것을 통하여 회로의 크기를 소형화 하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Hajimiri and T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillators," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 2,

pp. 179-194, February 1998.
[2] J. Choi, and C. Seo, "Broadband VCO using electronically controlled metamaterial transmission line based on varactor-loaded split-ring resonator," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, no. 4, pp. 1078-1082, April 2008.
[3] J. Choi, and C. Seo, "Microstrip square open loop multiple split ring resonator for low phase noise VCO," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 12, pp. 3245-3252, December 2008.
[4] H. Kim, S. Ryu, Y. Chung, J. Choi, and B. Kim, "A low phase-noise CMOS VCO with harmonic tuned LC Tank," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 7, pp. 2917-2924, July 2006.
[5] J. Choi, and C. Seo, "Low phase noise VCO using output matching network based on novel harmonic control circuit," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 8, pp. 1838-1842, August 2009.
[6] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, September 2004.
[7] 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 International Solid-State Circuits Conference*, pp. 250-251, February 1998.

저 자 소 개

최 재 원(학생회원)
2006년 2월 숭실대학교 정보통신 전자공학부 (공학사)
2008년 2월 숭실대학교 정보통신 공학과 (공학석사)
2008년 3월~현재 숭실대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야 : 초고주파 회로 설계, RF Power Amplifier, VCO, RFIC, RFID, Digital RF, 무선 에너지 전송, Metamaterial 등>

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