

투고용 논문 2017

5세대 이동통신 시스템을 위한

LC구조 전압제어발진기와 광대역 4분주기 ILFD의 설계

(A Study on LC-VCO and wide bandwidth ILFD for Advanced Wireless Communication System)

요 약

이동통신 기술의 발전에 따라 데이터 트래픽 수가 기하급수적으로 늘어나고 있다. 이에 따라 기존의 이동 통신 기술인 4G 보다 한 단계 더 발전한 5세대 이동통신인 5G가 활발히 개발 중이다. 본 논문에서는 5세대 이동통신에서 주파수를 안정적으로 공급하기 위한 위상고정루프의 핵심 블록인 입력전압에 따라 일정한 주파수를 공급하는 전압제어 발진기와 높은 주파수를 낮은 주파수 대역으로 분주하는 고속 분주기를 설계하였다. 설계한 VCO는 26.13GHz~30.23GHz 대역에서 발진이 가능하며, ILFD는 베렉터 구조를 사용하여 상기 대역에서 4분주를 수행함을 확인하였다.

Abstract

Due to development of wireless communication technology, wireless data traffic become increasing rapidly. As a result, 5G, one step further than 4G wireless communication system, is under active development. In this paper, we designed VCO that supplies a constant frequency according to the input voltage, and high-speed divider that divide high frequency to low frequency. And these two block are core of PLL for stable supply of frequency in 5G wireless communication system. The VCO is operation in 26.13GHz~30.23GHz, and the ILFD using varactor structure divide-by-4 in every VCO operation range.

Keywords : 5G, VCO, ILFD

I. 서 론

이동통신 기술의 발전으로 모바일이나 테블릿 등의 전자기기의 사용량도 급증하였다. 그에 따라 데이터 트래픽 수가 증가하여 기존의 데이터 처리속도보다 더 빠른 데이터 처리속도가 필요로 해졌다. 그에 따라 기존의 4세대 이동통신보다 약 20배의 빠른 데이터 처리속도를 가지는 5세대 이동통신 시스템이 개발 중에 있다. 5세대 이동통신의 공식 기술 명칭은 IMT-2020으로, ITU가 내린 정의에 따르면, 현재 이동통신 속도에 비해 70배 이상 빠르고, 데이터 응답속도 또한 10배 이상 빠를 것으로 기대된다. 5세대 이동통신은 2GHz 이하의

주파수를 사용하는 4G와 달리, 초고주파대역인 20GHz~40GHz의 주파수 대역을 이용해 보다 더 빠른 속도로 데이터를 처리할 수 있다.

통신 시스템의 발달로, 고주파수 시스템에 대한 설계 또한 많이 진행되고 있다. 그 중 위상고정루프(PLL, Phase Locked Loop)는 무선 통신 시스템에서 주파수의 안정도를 확보해주는 회로이다. 고주파수는 온도나 잡음 등에 의해 주파수가 흔들릴 위험이 높기 때문에, 더욱 중요한 회로이기도 하다.

주파수 분주기는 위상고정루프에 핵심적인 블록으로, 고주파수의 분주에 사용된다. 고주파수에 사용되는 위상고정루프라도 입력으로 들어가는 기준주파수는 안정

적인 저주파수 신호를 사용하기 때문에, 기준 주파수와 출력 주파수의 비교를 위해서 주파수 분주기가 필요하다.

본 논문에서는 5세대 이동통신 시스템에서 일정한 주파수를 공급하기 위한 위상고정루프의 핵심블록인 전압제어 발진기(VCO, Voltage Controlled Oscillator)와 고주파대역을 저주파 대역으로 분주하기 위한 고속 분주기인 ILFD(Injection Locked Frequency Divider)를 설계하였다. 그림1은 PLL의 전체 블록도와 본 논문에서 수행한 부분을 보여준다.

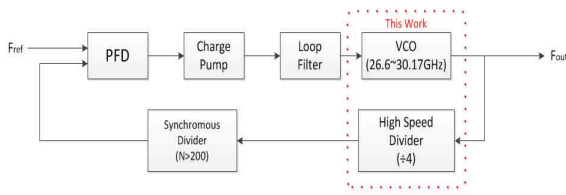


그림 1. 무선통신용 PLL 블록도

Fig. 1. PLL for the wireless communication system

II. LC-VCO 및 ILFD의 설계

1. LC-VCO

전압 제어 발진기는 PLL의 코어블록으로 특정 전압에 따라 일정한 주파수를 출력해주는 블록이다. 5세대 이동통신 시스템에서 사용하는 주파수인 28.5GHz를 목표로 설계하였다. 설계된 전압제어발진기는 고 주파수에서의 발진을 위해 LC구조의 전압 제어 발진기를 선택하였고, 동작범위를 확보하기 위해 버렉터를 추가하였다. 또한, 전압제어발진기의 출력을 안정적으로 분주기로 전달하기 위한 버퍼를 출력단에 추가하였다. 그림 2. (a)는 설계된 전압 제어 발진기의 회로도이고, 그림 2. (b)는 베렉터의 VCTRL 전압에 따른 주파수 변화를 나타내었다. 설계된 전압제어 발진기의 동작범위는 26.15GHz~30.15GHz까지 4GHz의 대역폭을 가진다.

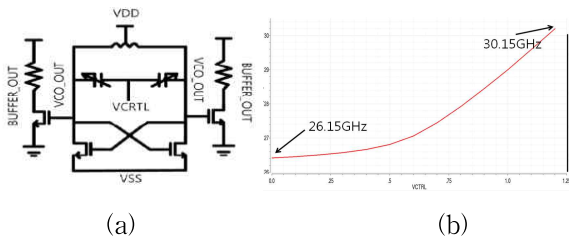


그림 2. (a)LC-VCO 회로도 (b) 동작범위

Fig. 2. (a)LC-VCO schematic (b) Operation range

2. Prescaler

5G 이동통신 시스템과 같은 고주파수 대역에 쓰이는 PLL에서도 기준 주파수(f_{ref})는 수십MHz 대역의 주파수를 사용하므로 전압제어발진기의 출력주파수를 낮춰줄 분주기가 필요하다. 그러나, 10GHz이상의 고주파의 출력 주파수를 분주하기 위해서는 일반 분주기를 사용하기 어렵다. 따라서 고주파수를 분주하기 위한 고속 분주기가 필요하다. 일반적으로 많이 사용되는 고속 분주기에는 크게 두 종류가 있는데, 바로 CML(Current Mode Logic)과 ILFD이다.

CML은 두 개의 래치에 클럭이 반대로 입력되어 교대로 동작하는 마스터-슬레이브 구조이다. 출력이 입력과 부피환 연결되기 때문에 클럭 주파수가 분주기의 동작 범위 내에 있다면, 클럭의 2분주된 신호를 출력한다. CML구조는 모스와 저항으로 구성되어 있는 만큼, 적은 면적으로 구현이 가능하며, ILFD와 비교해 보다 넓은 범위에서 분주를 수행한다.

ILFD란 Injection Locking이라는 원리로 분주를 수행하는 고속 분주기이다. Injection Locking이란 발진기에 다른 주기적인 신호가 입력되었을 때, 발진주파수가 입력된 신호의 특성을 따라가는 현상을 이용한다. 이 때, 인위적인 위상변화를 주어, 기존의 주파수가 아닌 새로운 주파수에서의 발진을 가능하게 하는 원리이다. ILFD는 또한 링구조와 LC구조가 있는데, 링 구조의 ILFD는 모스로 구성되어 있는 만큼, 크기가 매우 작고, 분주할 수 있는 범위가 넓은 장점이 있다. 그리고 LC 구조의 ILFD는 인덕터와 캐패시터가 포함된 구조로서, 링 구조보다는 훨씬 큰 면적을 차지하지만 동작속도가 빠른 장점을 갖는다. 그래서 본 논문과 같은 높은 주파수를 타겟으로 하는 구조에서는 LC 구조의 ILFD를 선택하는 것이 일반적이다. 그림 3은 기본적인 CML과 ILFD 두 구조를 보여준다.

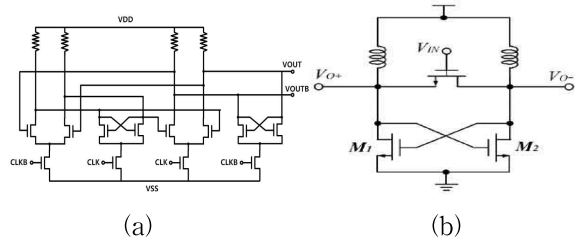


그림 3. (a) CML 분주기 (b) LC-ILFD 분주기

Fig. 3. conventional (a) CML (b) LC-type ILFD

표 1은 CML과 ILFD의 장 단점을 비교해 놓은 표이다.

표 1. CML과 ILFD 분주기의 장단점

Table 1. The advantages and disadvantages of CML, ILFD

	CML	ILFD
동작범위	넓음	좁음
면적	적음	넓음
소모전력	많음	적음
동작속도	느림	빠름

위 표에서 볼 수 있듯이, CML은 동작범위와 면적면에서 ILFD에 비해 유리하지만, ILFD는 소모전력과 동작속도면에서 CML보다 유리하다. 본 논문에서는 고주파수인 28.5GHz PLL용 분주기의 설계를 목표로 하기 때문에, ILFD를 최종 선택하였다.

본 논문에서는 LC구조의 ILFD를 사용하여 동작속도를 높였다. LC구조의 ILFD는 링 구조의 ILFD보다 동작속도가 빠르지만 동작 범위가 작은 단점이 있다. 하지만, 본 논문에서는 LC구조의 ILFD에 버렉터를 사용하여 동작범위를 확장하여 설계한 전압 제어 발진기의 모든 동작범위에서 4분주가 가능하도록 설계하였다. 그림 4는 제안한 ILFD의 회로도이다

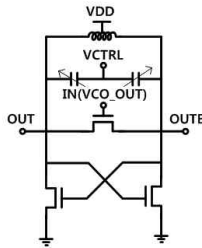


그림 4. 제안한 ILFD 회로도

Fig. 4. proposed ILFD schematic

III. 실험 결과

1. 모의실험

설계에 사용된 시스템은 CADENCE사의 Spectre RF 시뮬레이터를 이용하여 65nm CMOS 공정을 사용하였다. 설계한 전압 제어 발진기에서 출력된 결과 값은 26.15GHz~30.15GHz의 주파수를 가지며, ILFD는 전압 제어 발진기의 모든 동작범위에서 4분주가 가능하다. 그림 5의 (a), (b), (c)는 레이아웃 전 회로도 상에서 각각 VCO의 출력이 최저 주파수, 목표 주파수인 28.5GHz, 최고 주파수일 때 분주기의 출력신호를 보여준다.

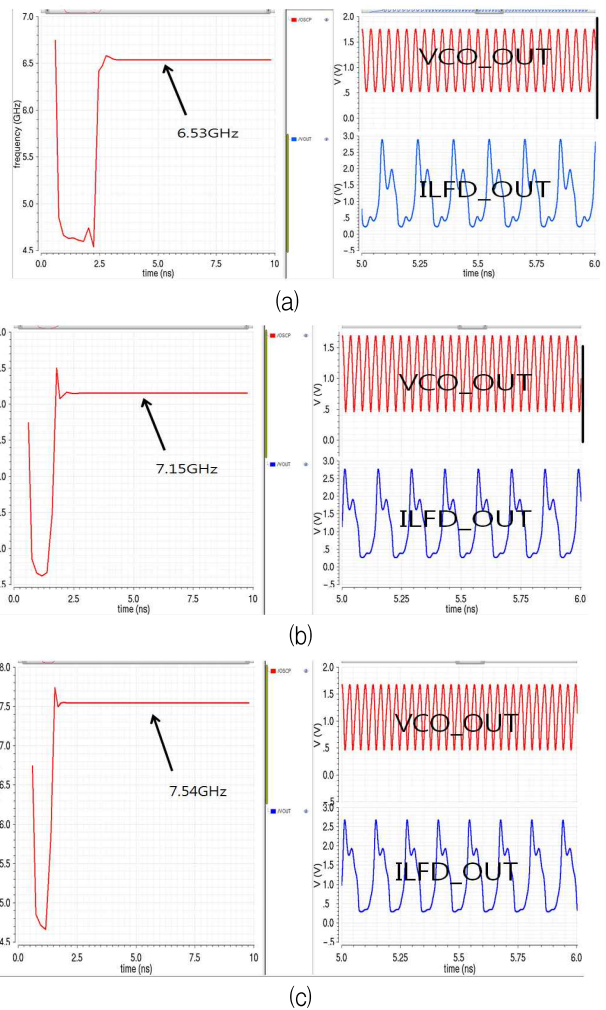


그림5. VCO의 출력이

- (a) 최고 주파수 일 때 분주기의 출력파형
- (b) 28.5GHz일 때 분주기의 출력파형
- (c) 최저 주파수 일 때 분주기의 출력파형

Fig.5. ILFD output of

- (a)When VCO output is highest frequency
- (b)When VCO output is 28.5GHz frequency
- (c)When VCO output is lowest frequency

그림 6. (a)는 전압제어발진기의 동작범위이고, 그림6. (b)는 전압제어발진기에 ILFD를 붙이기 전후의 위상잡음에 대한 그래프이다.

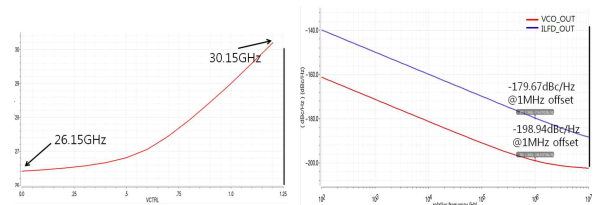


그림 6. (a) 전압제어발진기 동작범위

- (b) 전압제어발진기와 ILFD의 위상잡음

Fig. 6. (a) operation range of VCO

- (b)Phase noise of LC-VCO and ILFD

2. 레이아웃 후 모의실험

앞서 회로도를 기반으로 설계한 값을 바탕으로 레이아웃을 진행하였다. 레이아웃 후의 각종 기생성분에 따라 변경된 결과 값은 소자 값을 수정하여 원하는 동작 범위 내에서 동작하는 전압제어 발진기와 ILFD의 설계를 완료하였다. 그림 7은 설계된 전압 제어 발진기와 ILFD의 레이아웃이다. 설계된 전압제어 발진기와 ILFD의 면적은 $426 \times 290 \mu\text{m}^2$ 이다.

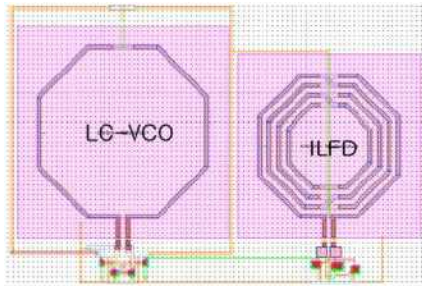


그림 7. LC-VCO와 ILFD의 레이아웃

Fig. 7. Layout of LC-VCO and ILFD

그림 8에서는 전압제어발진기의 레이아웃 후의 동작범위와 전압제어발진기와 ILFD 모두 레이아웃 후에 위상잡음을 나타내었다.

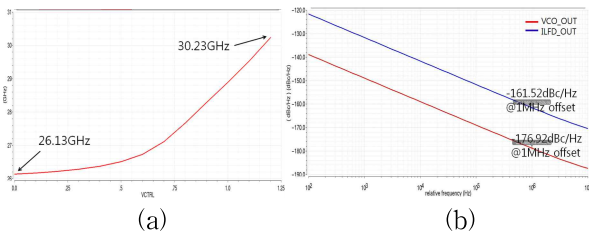


그림 8. (a) 전압제어발진기의 동작범위

(b) 전압제어발진기와 ILFD의 위상잡음

Fig. 8. (a) operation range of VCO

(b) phase noise of VCO and ILFD

그림 6과 그림 8에서 레이아웃 전과 후의 파형을 비교해보면, 전압제어발진기의 동작범위 상에서 선형성이 떨어지고, 위상잡음이 23 dBc/Hz 만큼 감소한 것을 볼 수 있다. 레이아웃 후 특성을 개선하기 위해서 소자의 크기를 변화시키면서 동작범위를 설정했다.

그림 9 (a), (b), (c)는 레이아웃 후 추출된 넷리스트를 가지고 모의실험을 진행한 결과이며 각각 전압제어 발진기의 출력주파수가 최대, 최저 일 때와 28.5 GHz 일 때 전압제어 발진기와 ILFD의 출력파형이다.

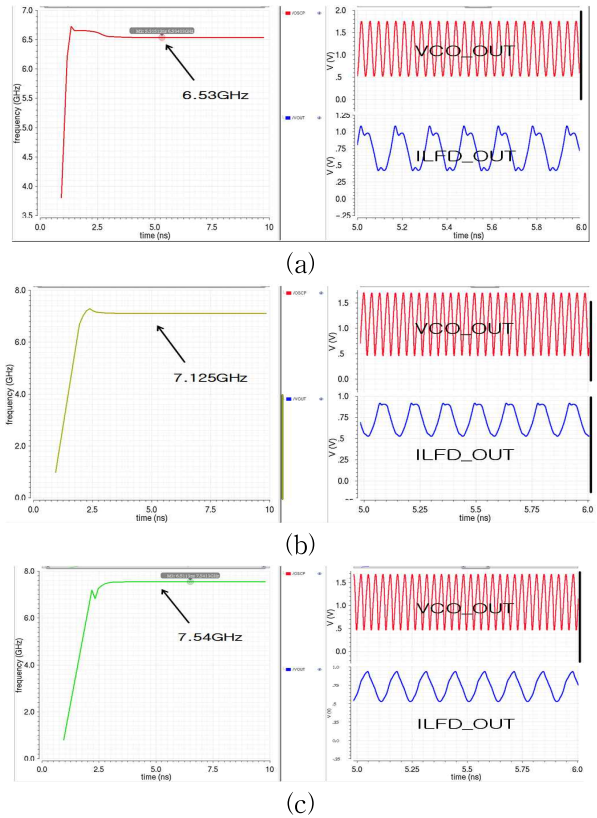


그림 9. (a) VCO의 출력이 최고 주파수 일 때 출력파형
(b) VCO의 출력이 28.5 GHz 일 때 출력파형
(c) VCO의 출력이 최저 주파수 일 때 출력파형

Fig.9. ILFD output of

(a)When VCO output is highest frequency

(b)When VCO output is 28.5 GHz frequency

(c)When VCO output is lowest frequency

그림 5와 그림 9은 각각 layout 전, 후의 파형이다. 기생 성분이 많이 생기는 L과 C를 주요 소자로 사용하는 만큼 layout후의 L과 C값이 각각 41%, 98.7%의 큰 폭으로 감소했으며, 출력 전압 폭도 기존의 2.6 V 에서 0.5 V 로 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 또한, layout추출 후 감소된 캐패시터의 크기로 인해 줄어든 분주 범위는 베렉터에 입력 전압값을 변경해가며 보완하였다. 표 2은 ILFD의 입력 전압에 따른 분주범위를 나타낸다.

표 2. ILFD 입력 전압에 따른 분주범위
Table 2. Frequency tuning range of ILFD input voltage.

VCO_OUT(GHz)	ILFD 입력 전압(V)
29.34-30.23	0
27.96-29.34	0.6
26.5-27.96	0.8
26.14-26.17	0.9
26.17-26.5	1

레이아웃 전 후의 전압제어 발진기의 동작범위와 크기로 인해 줄어든 분주 범위는 베렉터에 입력 전압값을 변

경해가며 보완하였다. 베렉터가 없는 경우 분주범위가 1GHz 정도 였던 것을 베렉터를 추가하면서 4GHz로 늘릴 수 있었다. 제안한 베렉터 적용 ILFD는 기존 ILFD 보다 분주범위를 300% 증가시킬 수 있었다. 표 2는 ILFD의 입력 전압에 따른 분주범위를 나타낸다.

IV. 결론

28.5GHz 5G용 PLL의 핵심 블록인 전압 제어 발진기와 고속 4분주기를 65nm CMOS공정을 사용하여 설계하였다. 높은 주파수 대역에서 필요한 동작범위와 안정된 발진을 위해 LC 구조의 전압 제어 발진기를 설계하였고, 이 전압 제어 발진기의 출력을 고속으로 분주하기 위해 LC구조의 ILFD를 사용하였다. ILFD에 베렉터를 사용하여 전압제어발진기의 모든 동작범위 내에서 분주가 가능하도록 하였다.

제안된 전압 제어 발진기와 ILFD는 고속으로 동작해야 하는 5G 시스템에서 통신용 주파수의 생성이나, 데이터 전송을 위한 PLL등에 적용 가능하다. 본 연구에서 CAD Tool은 IDEC의 지원을 받아 수행하였다.

감사의 글

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT 연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2017-2012-0-00641)

REFERENCES

- [1] E.K. Jorgensen, P.R. Mukund, "A Comparative Study of multi-GHz LCVCOs Designed in 28nm CMOS Technology", SOCC, page 82-87, 2015
- [2] Chunqi Shi, Runxi Zhang, Zongsheng Lai, "A 30GHz Wideband CMOS Injection-Locked Frequency Divider for 60GHz Transceiver" Scientific Research, June, 2013
- [3] Seungwoo Seo, Hyogi Seo, Sanggeun Jeon, and Jaesung Rieh " A 20-30GHz divide-by-3 ring-oscillator-based injection locked frequency divider with a wide locking range" Microwave and Optital Technology Letters, 2011