

Active inductor 를 적용한 선형 송신기용 주파수 변환기 설계

Design of Linear Up-Conversion Mixer with Active Inductor

홍남표*, 김도균, 최영완

(Nam-Pyo Hong, Do-Gyun Kim and Young-Wan Choi)

Abstract : CMOS 기반의 고주파 집적회로에서는 높은 이득과 출력을 얻기 위하여 인덕터와 같은 수동소자를 사용한다. 그러나 수동소자를 사용하게 되면 넓은 면적을 차지하기 때문에 회로의 크기를 증가시키는 단점을 갖는다. 본 논문에서는 PMOS 를 기반으로 구현한 active inductor 를 적용하여 회로의 면적을 줄일 수 있으며, 기존의 주파수 변환기와 동등한 선형 특성을 갖는 상향 주파수 변환기를 설계하였다. 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기의 OIP3 (3rd Output Intercept Point)는 1.3 dBm 을 가지며, 제안한 상향 주파수 변환기의 OIP3 는 0.8 dBm 으로 동등한 선형 특성을 보이며, layout 상에서 회로의 면적을 40 % 이상 감소하는 특성의 선형 송신기용 주파수 변환기를 설계 분석하였다.

Keywords: CMOS, up-conversion mixer, active inductor, linearity (OIP3)

I. 서론

최근 정보화 시대에 무선 통신 시스템이 급속하게 성장하고 있으며, 송수신기 모듈의 소형화, 저전력과 저비용을 요구하고 있다.

이와 같은 요구에 의하여 다양한 RF 소자 기술이 연구되고 있다. 이 중에서 실리콘 기반의 CMOS 기술은 높은 잡음 저항, 낮은 구동 전류 등과 같은 단점이 있지만, 다른 RF 소자와 비교하여 높은 집적도, 낮은 생산 단가와 같은 장점 때문에 무선 통신 시스템의 송수신기 설계에 널리 적용되고 있다.

또한, 무선 통신 시스템의 송수신기를 구성하고 있는 RF front-end 의 칩의 개수와 면적을 줄이기 위한 방법으로 기존의 사용되고 있는 헤테로다인 방식에서 RF 신호 및 기저대역(Baseband) 신호를 직접 주파수 변환하여 신호를 처리하는 직접 변환(Direct conversion) 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

헤테로다인 구조는 수신 감도 및 신호의 혼선 방지 특성이 우수한 반면에 고주파 신호를 중간 주파수(Intermediate Frequency, IF) 신호로 변환한 후 다시 기저대역으로 변환하기 때문에 많은 수의 칩과 능동 필터를 사용하기 때문에 단말기의 소형화가 어렵다. 그러나, 직접 변환하는 방식을 사용하면 칩의 사용 개수가 적으며 능동 필터의 수도 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 신호의 누설과 self-mixing에 의한 DC-offset 문제를 수반함에 따라 선형 특성 저하와 1/f (flicker noise) 에 대한 단점이 발생된다[1].

무선 통신 시스템의 송수신기 설계 시 고려되어야 하는 특성으로 변환이득, 선형성, EVM (Error Vector Magnitude), 소비

* 책임저자(Corresponding Author)

홍남표, 김도균, 최영완 : 중앙대학교 전자전기공학부

(nphong@wm.cau.ac.kr, kdk2327@gmail.com, ychoi@cau.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 출연금으로 ETRI, SoC산업진흥센터에서 수행한 IT SoC 핵심설계인력양성사업의 연구결과입니다.

전력 등이 있으나 이들간에는 trade-off 관계가 존재하여 모든 특성을 향상시킬 수는 없다. 이 중에서 직접 변환 방식을 적용한 상향 주파수 변환기 경우는 출력 신호의 선형성 지표인 OIP3 (3rd Output Intercept Point) 가 중요한 요소가 된다[2].

본 논문에서는 TSMC 0.18 μm CMOS 공정을 이용하여 선형 송신기용 주파수 변환기를 설계하였다. 주파수 변환기에 사용된 구조로는 더블 밸런스 믹서(Double Balanced Mixer)를 적용하였으며, 상향 주파수 변환기 설계 시 출력 신호가 중요하기 때문에 부하 임피던스는 수동 소자인 인덕터를 많이 사용하였다. 그러나 수동 소자인 인덕터를 사용하게 되면 회로의 면적을 많이 차지하는 단점을 가지고 있기 때문에 인덕터를 대신하여 CMOS 을 이용하여 active inductor 를 구현하였다. Active inductor 는 PMOS, 저항 과 캐패시터로 구성되어 있어 인덕터와 동일한 출력 특성을 가지면서 회로의 면적을 작게 가져 갈 수 있는 장점이 있다[3].

II. 본론

1. Active inductor 설계

그림 1은 PMOS 를 기반으로 구현한 active inductor 회로이다.

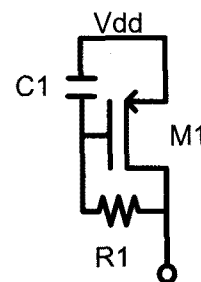


그림 1. PMOS 기반으로 구현한 능동형 인덕터.

Fig. 1. PMOS configured as active inductor.

그림 1에서 동작 주파수에 따라 특성 임피던스가 변화하는 것을 알 수 있다. 저주파 일 때 임피던스는

$$(1/g_{m1}) \square r_{O1} \quad (1)$$

이며, 고주파 일 때 임피던스는

$$R_G \square r_{O1} \quad (2)$$

이다. 이때, 식 (3)의 조건을 만족하면,

$$1/g_{m1} < R_l \quad (3)$$

수동 소자 인덕터와 동일한 동작을 하는 active inductor가 된다[3].

2. 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기

그림 2는 일반적으로 주파수 변환기에서 사용되는 길버트 셀 (Gilbert-cell) 구조를 적용한 상향 주파수 변환기를 나타내며, transconductor stage (M5 ~ M6), switching pairs (M1 ~ M4) 그리고 부하 임피던스는 인덕터로 구성되어 있다. Transconductor stage는 낮은 주파수 전압 신호를 전류 신호로 변화시키는 동작을 하며, switching pairs는 두 개의 신호 paths 사이에서 전류 신호를 ON/OFF 한다. 그리고 부하 임피던스는 전류 신호를 전압 신호로 다시 변환시켜 주는 동작을 한다.

그림 3은 switching stage와 transconductor stage 간에 위치를 바꿔서 동작하는 switched transconductor 상향 주파수 변환기를 나타낸다[4]. 이는 transconductor stage (M1 ~ M4), switching pairs (M5 ~ M6) 그리고 부하 임피던스는 인덕터로 구성되어 있으며, 바이패스 캐패시터 (C1)는 3차 비선형 성분을 감소시켜 준다[2].

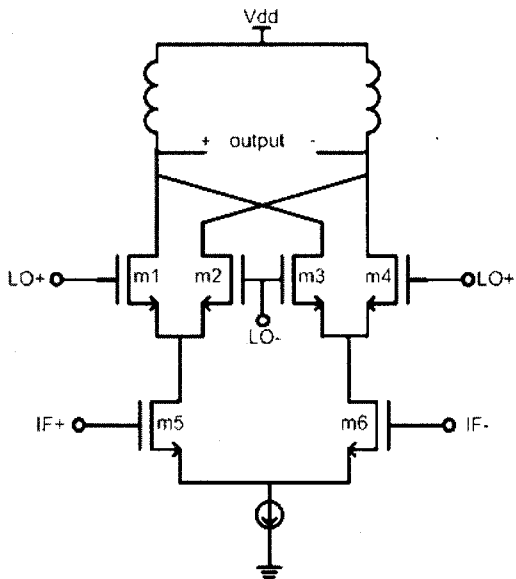


그림 2. 일반적인 상향 주파수 변환기.
Fig. 2. Conventional up conversion mixer.

그림 3의 변환 이득을 보면 식 (4)와 같이

$$CG \approx \frac{2}{\pi} \cdot g_{m0} \cdot \frac{R_L}{2} \quad (4)$$

이 되며, 그림 2 회로의 변환 이득과 비교를 해보면 동일한 변환 이득을 갖게 된다[4].

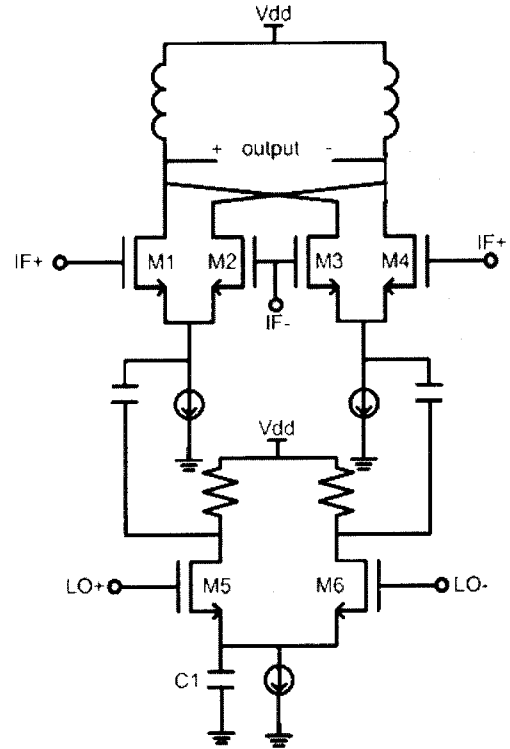


그림 3. Transconductor의 위치를 교환한 상향 주파수 변환기.
Fig. 3. Switched transconductor up conversion mixer with inductor.

그림 4는 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기에 대한 OIP3의 시뮬레이션 결과이다. 이때, baseband amplitude가 0.4 mVp-p 일 때 OIP3가 1.3 dBm의 값을 가지게 된다.

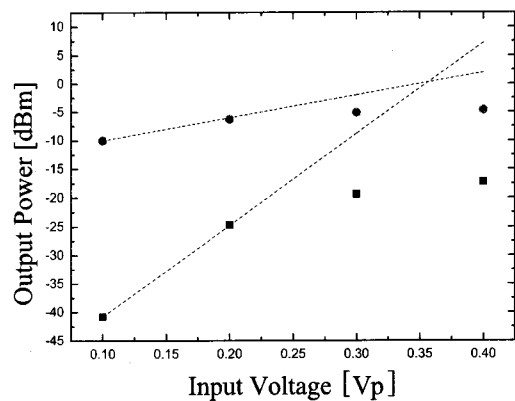


그림 4. OIP3 시뮬레이션 결과.
Fig. 4. Simulation OIP3 of up conversion mixer with inductor.

3. Active inductor 를 적용한 상향 주파수 변환기

그림 5는 제안한 active inductor 를 적용한 상향 주파수 변환기로서 회로의 면적을 감소와 동등한 선형 특성인 OIP3 (3rd Output Intercept Point) 를 갖는 상향 주파수 변환기를 나타낸다. 그림 3에서 부하 임피던스로 사용된 인덕터를 그림 1과 같이 PMOS 로 구현된 active inductor로 대체하였다. 이는 수동소자인 인덕터를 적용할 때와 비교하면 면적을 작게 가져 갈 수 있는 장점이 있다.

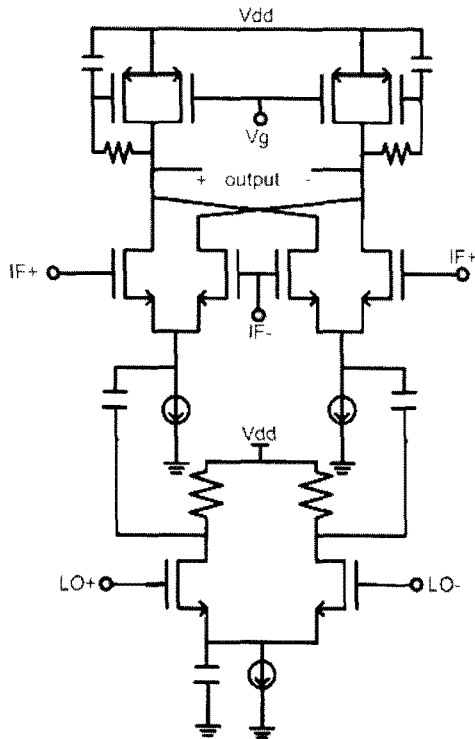


그림 5. Active inductor를 적용한 상향 주파수 변환기.
Fig. 5. Up conversion mixer with active inductor.

이때, 그림 3에서 구현한 능동형 인덕터에서 선형 특성을 제어할 수 있도록 PMOS를 추가로 연결 하였다. PMOS의 gate 전압 값의 변화에 따라서 선형 특성이 변화는 것을 알 수 있다.

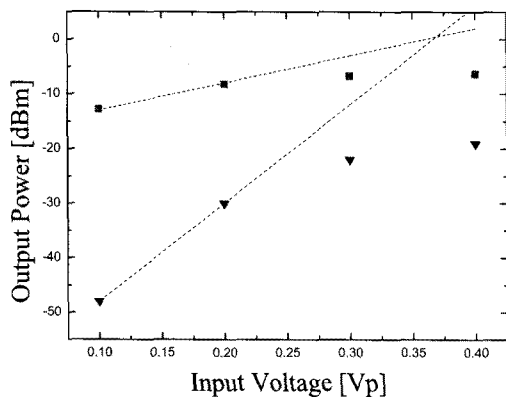


그림 6. OIP3 시뮬레이션 결과.
Fig. 6. Simulation OIP3 of up conversion mixer with active inductor.

그림 6은 능동형 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기의 OIP3에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이때, baseband amplitude 가 0.4 mVp-p 일 때, OIP3 가 0.8 dBm 의 값을 가지게 된다.

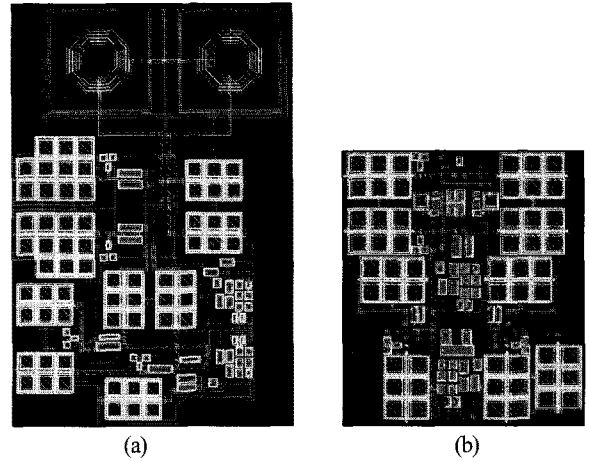


그림 7. 상향 주파수 변환기 layout.
Fig. 7. Layout of up conversion mixer.

그림 7에 (a)는 인덕터를 이용한 상향 주파수 변환기의 layout이며 칩 사이즈는 0.7 mm x 1.1 mm 이고, (b)는 능동형 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기의 칩 사이즈는 0.5 mm x 0.6 mm 이다. 칩의 면적을 40 % 정도의 면적을 줄일 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기와 동등한 성능을 보이면서, 회로의 크기를 줄일 수 있는 active inductor 를 적용한 선형 송신기용 주파수 변환기를 설계하였다. Active inductor 는 특정 조건에서 수동소자 인덕터와 유사한 동작 특성을 보이며, PMOS 를 추가로 연결해 줌으로써 gate 전압을 가변 함으로써 동작 특성이 변화 시킬 수 있다. 인덕터를 적용한 상향 주파수 변환기와 active inductor를 적용한 상향 주파수 변환기의 OIP3 특성은 각각 1.3 dBm, 0.8 dBm 의 값을 가지며, 회로의 면적을 40 % 감소 시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. A. Abidi, "Direct-Conversion Radio Transceivers for Digital Communication," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 30, no. 12, pp. 1390-1409, Dec. 1995.
- [2] Alireza Zolfaghari and Behzad Razavi, "A Low-Power 2.4-GHz Transmitter/Receiver CMOS IC," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 38, no. 2, pp. 176-183, Feb. 2003.
- [3] Behzad Razavi, "Design of Integrated Circuits for Optical Communications," Mc Graw Hill, 2003.
- [4] E.A.M. Klumperink, S.M. Louwsma, G.J.M. Wienk and B. Nauta, "A CMOS Switched Transconductor Mixer," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 39, no. 8, pp. 1231-1240, Aug. 2004.



홍 남 표

2007년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2007년~현재 중앙대학교 전기전기공학부 공학석사 재학중. 관심분야는 RFIC, CMOS IC Design.



김 도 균

2003년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2005년 중앙대학교 전자전기공학부(공학석사). 2005년~현재 중앙대학교 일반대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 RFIC, CMOS IC Design.



최 영 완

1985년 서강대학교 전자공학과 (공학사). 1987년 SUNY at Buffalo, 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사). 1992년 SUNY at Buffalo, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사). 1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원. 1995년~ 현재 중앙대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 Microwave-Photonics, Optical interconnection, 광스위칭 시스템 및 소자, RFIC