

CMFF CMOS 인버터 타입 OTA를 이용한 Gm-C 필터 설계

A Gm-C Filter using CMFF CMOS Inverter-type OTA

최문호¹, 김영석^{2,a}

(Moon-Ho Choi¹ and Yeong-Seuk Kim^{2,a})

Abstract

In this paper, a Gm-C LPF utilizing common-mode feedforward (CMFF) CMOS inverter type operational transconductance amplifier (OTA) has been designed and verified by circuit simulations. The CMFF CMOS inverter OTA was optimized for wide input linearity and low current consumption using a standard 0.18 μm CMOS process; gm of 100 μS and current of 100 μA at supplied voltage of 1.3 V. Using this optimized CMFF CMOS inverter type OTA, an elliptic 5th order Gm-C LPF for GPS specifications was designed. Gain and frequency tuning of the LPF was done by changing the internal supply voltages. The designed Gm-C LPF gave pass-band ripple of 1.6 dB, stop-band attenuation of 60.8 dB, current consumption of 0.60 mA at supply voltage of 1.2 V. The gain and frequency characteristics of designed Gm-C LPF was unchanged even though the input common-mode voltage is varied.

Key Words : CMFF, CMOS, OTA, Gm-C, LPF

1. 서론

최근 몇 년 간 휴대폰, WLAN, DMB, GPS 등 무선 송수신기의 보급이 급속도로 확대되었다. 이러한 무선 송수신기에는 몇 가지의 기본 부품들이 사용되는데 그 중의 하나가 필터이다. 필터는 원하는 신호 대역을 선택적으로 통과시키는 역할을 하며, 크게 RF 및 IF (베이스밴드) 필터로 나누어진다. IF 필터는 주어진 밴드 내에서 할당된 채널만을 통과시키기 때문에 채널 필터라고도 불리며, RF 필터와 달리 IC 형태로 집적된다.

IF 필터는 능동 RC, Gm-C의 형태로 집적되는데, 주로 설계가 간단한 Gm-C 필터가 많이 사용된다. 그러나 OTA(operational transconductance amplifier)를 기본 능동소자로 사용하는 Gm-C 필

터[1-3]는 IF 신호가 직접 OTA 입력 단으로 들어가기 때문에, OTA 입력 부는 넓은 선형성을 가져야 한다. 본 논문에서는 넓은 선형성을 가지는 CMFF(common-mode feedforward) 방식을 채용한 CMOS 인버터 타입의 OTA[4]를 제안하였고, 이 OTA를 채용한 저역 통과 필터(LPF; low pass filter)를 설계하였다. 이 OTA는 입력 공통 모드 전압의 변화에 따른 비선형성 성분을 CMFF 방식으로 제거하였으며, 인버터를 기본 OTA 블록으로 사용하기 때문에 아주 낮은 전압에서도 동작 가능한 이점을 가지고 있다.

LPF는 5차 타원형으로 대역폭 4 MHz를 가지는 GPS에 사용될 수 있는 규격을 가지도록 설계되었다. 타원형 함수는 버터워스, 체비세프 함수와는 달리 저지 대역 감쇄 특성이 아주 우수하여 낮은 차수를 사용할 수 있는 반면에 군지연(group delay) 특성이 나쁘다. 그러나 군지연 에러는 ADC 통과 후에 DSP에서 교정이 가능하다. OTA 및 LPF는 표준 0.18 μm CMOS 공정을 이용하여 설계하였으며, Cadence SPECTRE를 이용한 모의실험을 통해서 필터 특성을 확인하였다.

1. 페어차일드코리아

2. 충북대학교 반도체공학과

(충북 청주시 흥덕구 성봉로 410)

a. Corresponding Author : kimys@cbu.ac.kr

접수일자 : 2009. 11. 9

1차 심사 : 2010. 2. 26

심사완료 : 2010. 3. 19

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 CMFF CMOS 인버터 타입의 OTA의 최적화에 대해 논의하였으며, 3절에서는 이 OTA를 이용한 GPS의 베이스밴드에 사용가능한 LPF를 설계하고, CAD 툴을 통해서 검증하였다. 마지막 4절에서 결론을 맺었다.

2. CMFF CMOS 인버터 타입 OTA 최적 설계

제안된 CMFF 방식을 채용한 CMOS 인버터 타입의 OTA는 그림 1과 같다. 기존의 CMOS 인버터 타입의 OTA는 PMOS 및 NMOS만의 아주 간단한 구조로 넓은 입력 선형성을 가지고 저전압에서도 사용 가능한 장점이 있으나[5,6], 입력 공통 모드 전압이 변화하면 선형성이 깨어지는 문제를 가지고 있다. 그림 1의 제안된 OTA는 입력 공통 모드 전압의 변화에도 상관없이 입력 선형성이 유지되도록 CMFF 방식을 채용하고 있다.

CMFF 회로는 그림 1의 M3n, M3p, M4n, M4p, M5n, M5p, M6n, M6p, M7n, M7p로 구성되어 있다. 예를 들어 입력 공통 모드 전압이 높을 경우, M3n 및 M4n의 전류가 증가하여 M5p, 그리고 전류 미러인 M6p, M7p로 흐른다. 반대로 M3p 및 M4p는 전류가 감소하여 M5n, M6n, M7n으로 흐른다. M7n 및 M7p의 전류 차이가 M1n 및 M1p CMOS 인버터의 전류 차이를 보상해 주어 선형성을 계속 유지해준다. 또한 M6n 및 M6p의 전류 차이가 M2n 및 M2p CMOS 인버터의 전류 차이를 보상해 준다. 만약 입력 공통 전압이 낮을 경우는 반대로 동작하여 전류를 보상하고 선형성을 유지해준다.

그림 1의 OTA는 전원 전압에 따라 트랜스컨덕턴스 gm과 전류 소모가 달라지기 때문에, 저전압 및 저전력 IF LPF에 사용할 수 있도록 gm 및 전원 전압을 최적화하였다. 전원 전압의 변화에 따른 OTA의 gm 및 공급 전류가 그림 2에 나와 있다. 전원 전압이 1.8 V일 때 gm은 약 200 μ S이며, 흐르는 전류는 400 μ A를 초과하고 있다. 설계하고자 하는 5차 타원형 Gm-C LPF의 경우 11개의 OTA가 사용되기 때문에 전원 전압 1.8 V의 조건에서 4.4 mA 이상의 전류가 흘러 저전력을 실현할 수가 없다. 전원 전압을 1.3 V로 낮추어, gm 100 μ S, 전류 100 μ A로 조건을 설정하였다.

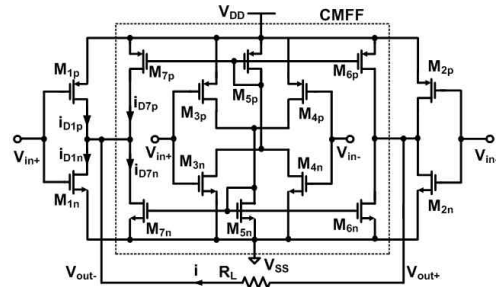


그림 1. 제안된 CMFF CMOS 인버터 타입의 OTA.
Fig. 1. Proposed CMFF CMOS inverter-type OTA.

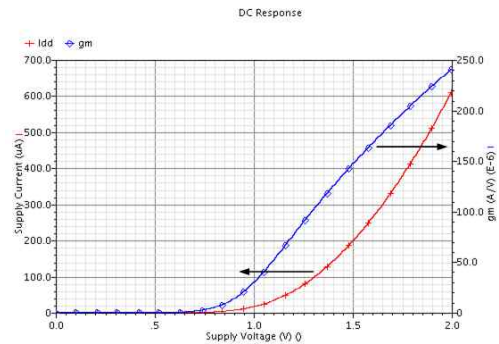


그림 2. 전원 전압 변화에 따른 OTA의 공급 전류 및 트랜스컨덕턴스 gm.
Fig. 2. Supply current and transconductance gm of OTA as a function of supply voltage.

최적 설계된 CMFF CMOS 인버터 타입의 OTA의 입력 공통 모드 전압이 변화(0.55 V, 0.65 V, 0.75 V)할 때 트랜스컨덕턴스 gm 대 입력 차동 전압이 그림 3에 나와 있다. 트랜스컨덕턴스 gm은 입력 차동 전압 -0.5 V ~ +0.5 V의 구간에서 선형성을 유지하고 있다. 입력 공통 모드 전압이 변화하더라도 gm 특성의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. CMFF를 채용한 경우와 그렇지 아니한 경우에 대해서, 입력 공통 모드 전압의 변화에 따른 선형성이 그림 4에 나와 있다. CMFF 회로를 채용한 경우는 입력 공통 모드가 변화하더라도 (0.35 V ~ 0.90 V) gm이 거의 100 μ S를 유지하지만, CMFF를 채용하지 않은 경우는 입력 공통 모드 전압이 조금만 변화하더라도 gm은 급격히 감소함을 알 수 있다.

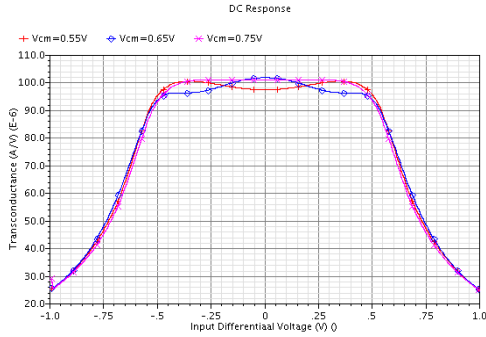


그림 3. 입력 차동 전압의 변화에 따른 트랜스컨덕턴스 gm.

Fig. 3. Transconductance gm as a function of input differential voltage.

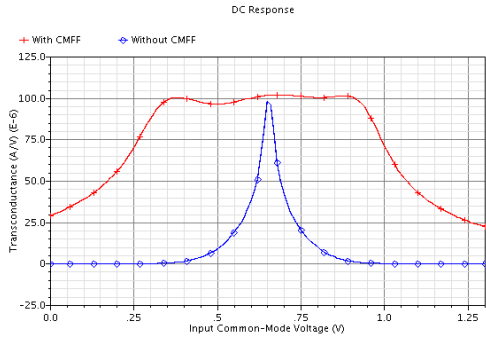


그림 4. OTA의 CMFF 회로가 있을 때와 없을 때의 입력 공통 모드 전압의 변화에 따른 트랜스컨덕턴스 gm.

Fig. 4. Transconductance gm as a function of input common-mode voltage with and without CMFF of OTA.

3. CMFF CMOS 인버터 타입 OTA를 사용한 Gm-C LPF 설계

CMFF CMOS 인버터 타입의 OTA를 사용하여 GPS에 사용되는 저전압 저전력 Gm-C LPF[7,8]를 설계하였다. LPF의 규격은 통과대역 리플 0.5 dB, 저지대역 감쇄 40 dB, 차단 주파수 4 MHz이다. 그림 5(a)는 필터 소프트웨어를 사용하여 얻어진 GPS 베이스밴드 LPF 규격을 만족하는 LC ladder 회로이다. 그림 5(a)에서 소스 및 부하 저항은 1 Ω,

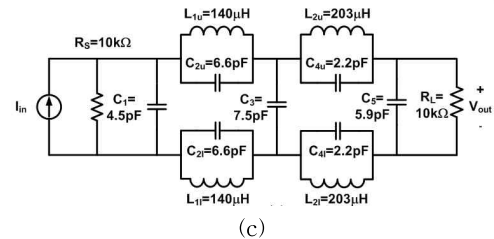
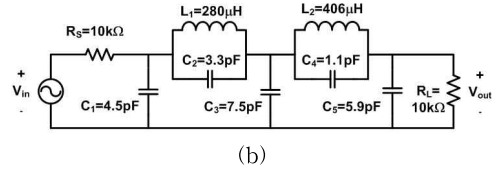
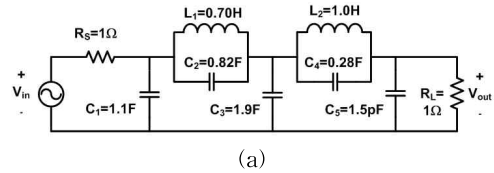


그림 5. LPF LC ladder: (a) normalized, (b) denormalized, (c) 차동 구조로 변환.

Fig. 5. LPF LC ladder: (a) normalized, (b) denormalized, (c) converted to differential structure.

차단주파수는 1 rad/sec으로 normalization 되어 있다. 그리고 소스 및 부하 저항이 모두 연결된 doubly terminated 구조이기 때문에 -6 dB 통과대역 감소가 있다. OTA의 gm=100 μS로 정하였으며, 소스 및 부하 저항(Rs, RL)은 10 kΩ(1/gm)으로 denormalization 하였다(그림 5(b)). ($R = R_n \cdot R_g$, $L = L_n \cdot R_s / w_c$, $C = C_n / R_s / w_c$) 그림 5(c)는 그림 5(b)를 차동 구조로 변환한 것이다. LC 공진 탱크의 L은 두 배 감소, C는 2배 증가하였음을 알 수 있다.

그림 5(c)의 LC ladder의 각 소자를 트랜스컨덕터 gm으로 모두 변환하여 그림 6의 Gm-C LPF를 구성할 수 있다. OTA1은 입력 전압을 전류로 변경하며, 입력 저항 Rs은 OTA2의 출력과 입력을 단락하여 구성하였다($R_s=1/gm$). 인덕터 L1 및 L2는 각각 OTA3 - OTA6 및 OTA7-OTA10의 자이레이터로 구성하였다($L = C/g_m^2$). 마지막으로 부하 저항 RL은 OTA11으로 구성하였다.

그림 6의 LPF는 필터 규격을 만족하기 위하여 주파수 튜닝을 필요로 한다. 주파수 튜닝은 사용한 CMOS 타입 OTA의 전원 전압을 변화시키면 gm이

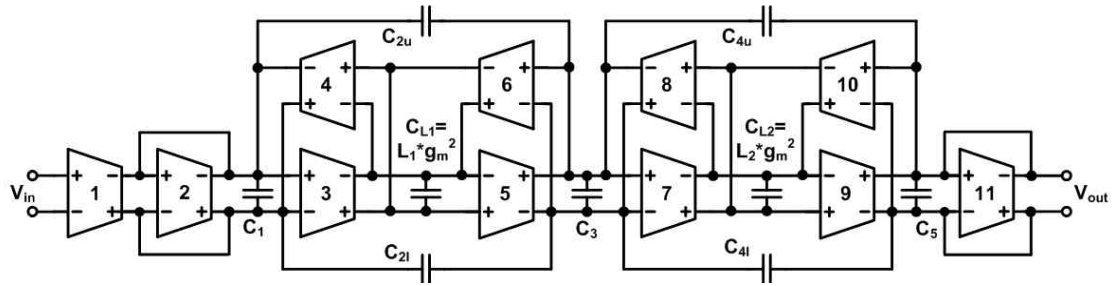


그림 6. GPS용 5차 타원형 Gm-C LPF.
 Fig. 6. 5th-order elliptic Gm-C LPF for GPS.

변화하는 성질을 이용하였다. 주파수 튜닝은 기본적으로 IF 필터 뒷단의 ADC와 DSP에서 수행할 수가 있기 때문에, 본 논문에서는 필터의 이득 및 주파수 대역폭의 튜닝 방법에 대해서 논한다. Gm-C LPF의 OTA1의 전원전압을 변화시켜 필터의 이득을 튜닝하고, OTA2-OTA11의 전원전압을 변화시켜 주파수 대역폭을 튜닝 할 수 있다.

그림 7(a)는 OTA1의 전원 전압을 1.22 V로 고정하고 OTA2-OTA11의 전원 전압을 1.1 V, 1.2 V, 1.3 V로 변화시킬 때의 주파수 대역폭의 변화를 볼 수 있다. OTA2-OTA11의 전원 전압이 1.2 V 일 때 주파수 대역폭 4 MHz를 실현할 수 있음을 알 수 있다. 다음으로 필터의 이득 조절은 그림 7(b)에 나와 있다. 그림 7(b)는 OTA2-OTA11의 전원 전압은 1.2 V로 고정하고 OTA1의 전원 전압을 1.20 V, 1.25 V, 1.30 V로 변화시킬 때의 주파수 특성을 보여 준다. OTA1의 전원 전압을 1.22 V로 맞출 때 원하는 필터 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 필터의 이득 및 주파수 튜닝 후에 주어진 규격인 40 dB 저지대역 감쇄비율, 그리고 4 MHz의 차단주파수를 만족하고 있음을 확인하였다.

마지막으로 입력 공통 모드 전압이 LPF에 미치는 영향을 알아보았다. CMFF CMOS 타입의 OTA를 채용한 LPF는 그림 8(a)에서와 같이 입력 공통 모드 전압이 0.6 V, 0.7 V로 변화하더라도 주파수 특성의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 CMFF 회로를 채용하지 않은 경우(OTA1)는 그림 8(b)와 같이 입력 공통 모드 전압이 0.6 V에서 0.7 V로 변화할 때 필터의 이득이 2 dB 감소함을 알 수 있다. 본 결과로부터 CMFF 회로를 채용한 OTA의 장점을 확인할 수 있다.

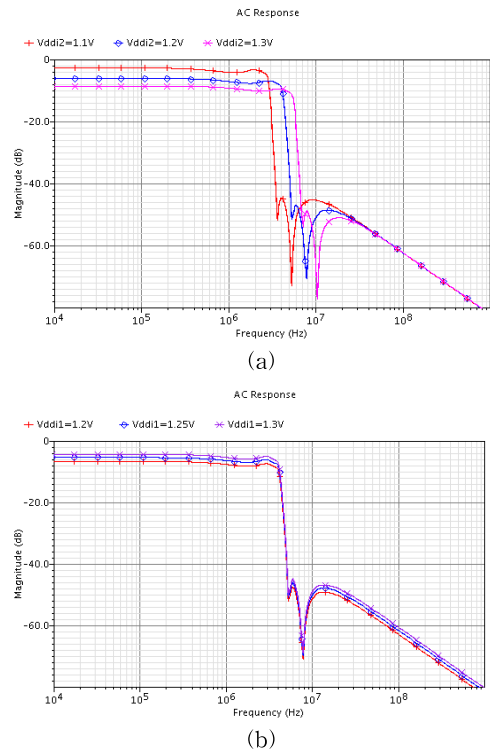


그림 7. Gm-C LPF 주파수 특성: (a) 주파수 튜닝, (b) 이득 튜닝.
 Fig. 7. Frequency characteristics of Gm-C LPF: (a) frequency tuning, (b) gain tuning.

LPF설계에서 동작 전압 1.8 V, 0.18 μm CMOS 공정을 사용하였으며, 내부 전압 1.2 V에서 전류는 0.60 mA가 흐르고 있다. 설계된 LPF의 성능 지수들이 표 1에 요약되어 있다. 참고로, 본 논문에서

4. 결론

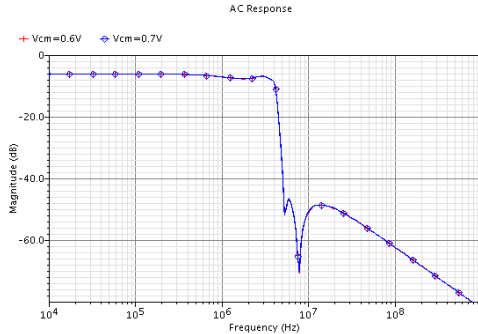
본 논문에서는 CMFF 방식을 채용한 CMOS 인버터 타입 OTA를 이용한 Gm-C LPF를 설계하였다. CMFF CMOS 인버터 타입의 OTA는 전원 전압 1.3 V에서 gm 100 μ S, 전류 100 μ A로 최적화하였다. 이 OTA를 사용하여 GPS용 타원형 Gm-C LPF를 설계하였다. 내부 전압 1.2 V, 전류 0.60 mA, 주파수 대역폭 4 MHz를 실현하였다. LPF의 이득 및 주파수 튜닝은 OTA1과 OTA2-OTA11의 내부 전압을 조절하여 실현하였다. 설계된 Gm-C LPF는 기존의 인버터 타입의 OTA를 채용한 필터와는 달리, 입력 공통 모드 전압이 변화하더라도 필터의 성능은 변화하지 않았다. 설계된 LPF는 저전압, 저전력, 입력 공통 모드 전압이 변화하는 환경에서도 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

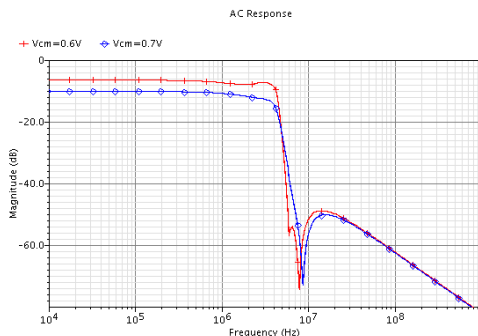
이 논문은 2008학년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] L. Acosta, M. Jimenez, R. G. Carvajal, A. J. Lopez-Martin, and J. Ramirez-Angulo, "Highly linear tunable CMOS Gm-C low-pass filter", IEEE Trans. Circuits and Systems-I, Vol. 56, p. 2145, 2009.
- [2] T. Sanchez-Rodriguez, C. I. Lujan-Martinez, R. G. Carvajal, J. Ramirez-Angulo, and A. Lopez-Martin, "CMOS linear programmable transconductor suitable for adjustable Gm-C filters", Electronics Lett., Vol. 44, p. 505, 2008.
- [3] G. Zhiqiang, W. Jinxiang, L. Fengchang, Y. Mingyan, and Z. Zhongzhao, "Wideband reconfigurable CMOS Gm-C filter for wireless applications", IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits, and Systems, p. 179, 2009.
- [4] 최문호, 다중 표준 수신기를 위한 아날로그 베이스 밴드 설계, 충북대학교 박사학위논문, 2009.
- [5] B. Nauta and E. Seevinck, "Linear CMOS



(a)



(b)

그림 8. 입력 공통 모드 전압 변화에 따른 Gm-C LPF 주파수 특성: (a) CMFF 있을 때, (b) CMFF 없을 때.

Fig. 8. Frequency characteristics of Gm-C LPF: with CMFF, (a) without CMFF (b).

설계한 Gm-C LPF는 공통 모드 전압을 맞추기 위한 CMFB 회로를 필요로 하지 않는다. CMOS 타입 OTA에 CMFF 방식을 채용하였기 때문에 공통 모드 전압은 자동적으로 맞추어 진다.

표 1. Gm-C LPF 성능 지수.

Table 1. Specifications of Gm-C LPF.

사용 공정	0.18 μ m CMOS
전원 전압	1.2 V
공급 전류	0.60 mA
통과 대역 리플	1.6 dB
저지 대역 감쇄	60.8 dB
주파수 대역폭	4 MHz

J. of KIEEME(in Korean), Vol. 23, No. 4, April 2010.

- transconductance element for VHF filters",
Electron. Lett., Vol. 25, p. 448, 1989.
- [6] B. Nauta, "A CMOS transconductance-C
filter technique for very high frequencies", J.
of Solid-State Circuits, Vol. 27, p. 142, 1992.
- [7] R. Schaumann and M. E. Van Valkenburg,
"Design of analog filters", Oxford University
Press, 2001.
- [8] 박송배, 애널로그 IC 필터의 설계, 홍릉과학출
판사, 1999.