

50 [MHz] 이상의 대역폭을 갖는 OTA 설계

* 김 석, 방준호, 윤창훈, 김동용

* 전북대학교 공과대학 전기공학과

The Design of OTA Which Has Band-width Above 50[MHz]

* S. Kim, J. H. Bang, C. H. Yun, D. Y. Kim

* Dept. of Electrical Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

In this paper, a CMOS Operational Transconductance Amplifier (OTA) which is used for high-frequency operation has been designed and simulated by SPICE 2G program.

To increase input linear range, the input stage is designed by cross-coupled pair. And the output stage insert buffer stage for the buffering and gain.

The band-width of designed OTA is 50 ~ 60 [MHz].

I 서론

최근, 아날로그와 디지털 회로를 하나의 칩(chip)으로 집적하는 기술이 통신분야 (디지털통신, 통신선을 통한 데이터의 전송, 통신선널 등)에 응용되고 있는 추세에 있다. 이와같이 아날로그 회로와 디지털 회로를 하나의 칩으로 집적할 경우, 칩면적이 적고 부가적인 상호 연결에 의한 수행특성의 저하를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 가격도 저렴하게 일반화 할 수 있다. 그러므로 동일 칩상에 디지털과 아날로그회로를 실현하기 위한 새로운 MOS집적 회로 기술에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

아날로그에서 많이 사용되고 있는 회로중의 하나가 스위치드 커패시터 필터(switched-capacitor filter : SCF)로써, 이는 능동 RC필터에서 저항 R을 스위치 역할을 하는 MOSFET과 커패시터로 전하(charge)의 충전 및 방전에 의해 모의하는 방법이다. 이 방법은 디지털회로 등과 함께 집적할 수 있고, 가격과 집적 밀도의 향상이라는 커다란 장점을 갖고 있다. 그러나, SCF는 연속시간(continuous-time)상의 저항소자를 이산시간(discrete-time)상의 샘플링 소자로 대체함으로써, 동작 특성중 샘플링으로 인한 문제점이 발생한다. 즉 SCF의 동적범위(dynamic range)는 클럭 feed through잡음, 광대역 연산증폭기의 aliasing과 스위치 잡음의 발생등으로 감소하게 되며, 입력단과 출력단에 각각 anti-aliasing 필터와 smoothing필터가 있어야 하며, 또한 스위칭을 할 수 있도록 클럭 발생회로가 필요하다. 따라서 이들에 의해서 설계(layout)가 복잡해진다. 이러한 문제점들을 해결하기

위하여 M. Banu와 Y. Tsividis는 저항을 MOSFET로 대체하고 이에 따르는 비선형 저항특성을 제거시키기 위하여 연속시간의 완전 대칭 구조를 갖는 MOSFET-C필터(continuous-time fully balanced MOSFET-C filter)를 제시했다. 그리고 I. S. Han과 S. B. Park은 저항을 MOSFET 2개로써 실현하여 직접 능동 RC필터에 적용하는 방법, 즉 연속시간의 MOSFET-C필터를 제안했다. 이 방법들은 모두 SCF의 단점들을 보완할 수 있으나 아직도 여분의 소자들이 필요하게 된다.

이러한 문제점은 VCCS(Voltage Controlled Current Source)방식 의 OTA(Operational Transconductance Amplifier)로써 해결할 수 있다. 이것은 능동 RC회로에서 저항 R이 제거된 상태의 능동 C필터를 설계할 수 있기 때문에 OTA와 커패시터만으로 구성된 간단한 회로로써 연속시간상에서 직접 VLSI화 할 수 있는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 OTA를 설계함에 있어, 10~20 [MHz]인 OTA의 대역폭(band width)을 더욱 확장시켜 설계된 고주파용 OTA를 제시한다.

II. OTA

(1) OTA의 특성

Operational Transconductance Amplifier (OTA)는 전달특성이 전압이득이 아니라 전달콘덕턴스(transconductance)로 나타나는 것을 제외하고는 Op-Amp의 일반적인 특성을 가지고 있다. Op-Amp와 비교할때, OTA의 특징은 다음과 같다.

1. 넓은 대역폭 :

일반적인 Op-Amp의 대역폭은 수 MHz인데 비해 OTA의 일반적인 대역폭은 10 ~ 20 [MHz]이다.

2. 용이한 집적화 :

bias전류로 출력을 조절할 수 있으며 일반적으로 그 응용 회로가 간단하여 집적화가 용이하다.

3. OTA를 이용한 회로는 보통 수동소자를 적게 요구한다.

OTA의 출력은 전류이고, 크기는 다음 식과 같다.

$$I_{out} = g_m V_{in}$$

그림 1의 (a)는 OTA의 symbol이고, (b)는 이상적인 OTA의 등가회로를 나타낸 것이다. OTA의 주요특성은 그림1에서 보여 주듯이 bias전압이 변화함에 따라 전달콘덕턴스가 변화하고, 이에 따라 bias전류가 조절된다는 것이다. 결과적으로 전달콘덕턴스의 변화에 따라 소비전력도 변화될 수 있다.

설계하고자 하는 OTA의 주요 parameter특성을 표1에 나타냈다.

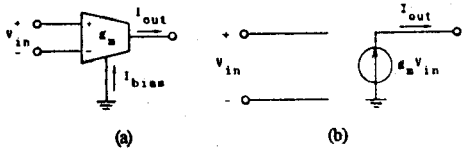


그림 1. (a) OTA symbol, (b) OTA의 이상적인 등가회로

표 1. 설계조건

Design Parameters	Values
Low-Frequency Open-Loop Gain	> 60 dB
Unity-Gain Frequency	> 50 MHz
Slew Rate	> 2 V/us
CMRR : Low-frequency	60 ~ 80 dB
Unity-Gain Frequency	> 40 dB
PSRR : Low-frequency	60 ~ 80 dB
Unity-gain Frequency	> 0 dB
Phase Margin	60° ~ 90°
Input Offset Voltage	< 1 mV
Power Dissipation	controllable
Output Resistance	> 100 MΩ

(2) OTA의 구조

그림 2는 쌍극성 트랜지스터(bipolar transistor) OTA[CA3080, CA3094]의 일반적인 구조이다. 그림2의 출력저항이 클때에는 그림1 (b)의 회로와 등가이고, 출력단자에 OTA-C 필터처럼 부하가 capacitor일 때는 큰 dc 개방 루프이득(dc open loop gain)이 얻어진다. 이러한 구조의 OTA는 여러 응용분야에서 그 유용성이 증명되어 사용되어지고 있고, 또한 고주파 신호처리 분야에서도 일반적인 Op-Amp보다는 우수한 기능을 발휘하고 있다. 그러나 OTA 역시 그 대역폭이 아직은 충분치 못하여 20 [MHz] 이상의 고주파 신호처리에는 사용이 제한되고 있는 실정이다. 따라서 대역폭을 넓히기 위하여 기존의 1 stage current mirror 방식에서 벗어나 2 stage 개념을 도입하여 고주파 신호처리용 OTA를 설계한다.

2-1) 차동입력단의 설계

OTA에서 차동입력단의 설계는 중요하다. 차동입력단의 설계시 source-couple pair가 아닌 그림3과 같은 cross-couple pair로 설계하면 입력선형영역은 더욱 증가하게 된다.

이때의 출력 Iout은

$$I_{out} = 4kV_bV_n$$

여기에서

$$k = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \left[\frac{W}{L} \right]$$

$$2V_b = V_{GS1} + V_{GS2} - 2V_T$$

$$V_{in} = \frac{V_{GS1} - V_{GS2}}{2}$$

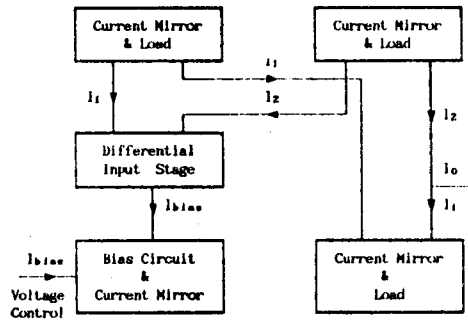


그림 2 일반적인 OTA의 구조

위의 식으로부터

$$g_m = \frac{I_{out}}{V_{in}} = 4kV_b$$

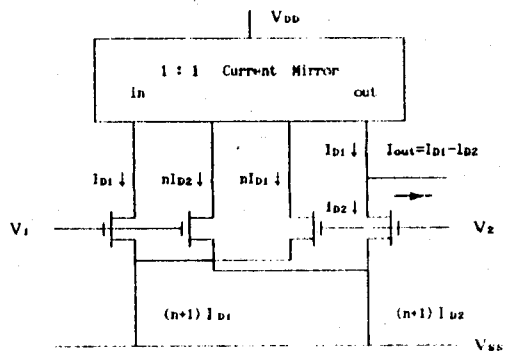


그림 3. Cross-couple Pair의 구조

2-2) buffer단의 설계

완충기작용, 이득을 위한 buffer는 아래의 그림 4와 같은 구조를 갖도록 설계하였다. 그림 4는 MOS를 이용한 source follower 형태이고, 이는 buffer 또는 dc-level shifter로 사용된다.

출력 node에서의 전류방정식은

$$(g_{d1} + g_{d2})V_{out} + g_{mb1}V_{out} - g_{m1}V_{gs1} = 0$$

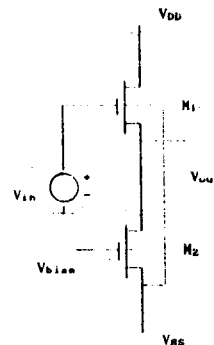


그림 4. MOS source follower의 기본 구조

(3) OTA의 설계

그림2의 OTA 기본구조에 그림3의 입력단과 그림 4의 buffer

단을 합하여 그림5와 같은 CMOS OTA회로를 구할 수 있다. 그림5에서, M1 ~ M4는 입력영역을 선형화하기 위한 cross-couple pair이고, M5 ~ M21은 current mirror이다. 또한 M22 ~ M23은 완충역활을 하는 buffer단이다.

그림 5의 회로에서 unity-gain current mirror가 사용된다고 가정할 때, 전체 transconductance는

$$g_m = g_{m1}$$

와 같고, 출력저항은 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{out} = (r_{ds13} + r_{ds14} + r_{ds13}r_{ds14}g_{m13}) // (r_{ds17} + r_{ds18} + r_{ds17}r_{ds18}g_{m17})$$

여기에서 r_{ds} 들은 drain저항이고, g_m 들은 전압제어전류원(Voltage Controlled Current Source;VCCS)에 의해 나타나는 전달conductance이다.

설계된 그림5의 OTA가 표1의 설계조건을 만족할 수 있도록 각 MOS transistors의 channel 폭(W)과 길이(L)를 구하면 표2와 같다.

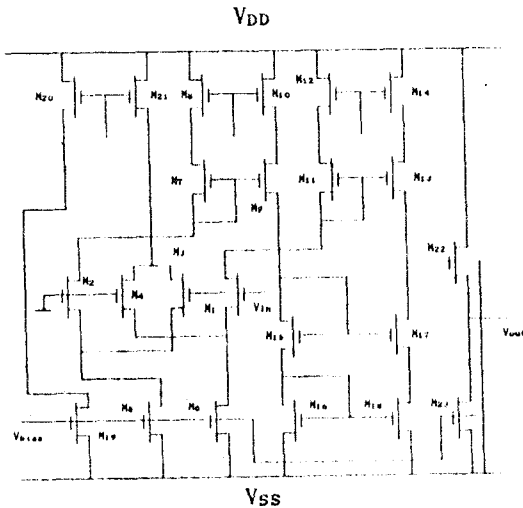


그림 5. CMOS OTA의 내부회로

표 2. 설계된 OTA의 Tr. 크기

devices	W / L, [μm]
M ₁ , M ₂	5 / 3
M ₃ , M ₄	130 / 3
M ₅ , M ₆	8 / 39
M ₇ ~ M ₁₄	10 / 3
M ₁₅ ~ M ₁₈	70 / 13
M ₁₉	20 / 100
M ₂₀ , M ₂₁	10 / 350
M ₂₂ , M ₂₃	3 / 3

설계된 OTA회로를 analog simulation program인 SPICE 2G에 의해 특성을 조사한 결과, 그 주파수 특성이 매우 우수함을 알 수 있었다. 또한 bias전압에 대한 전달conductance의 값을 구해 보면 이득 g_m 은 bias전압으로 조절할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 입력전압과 출력전류의 관계는 완전히 비례함을 특성곡선에서 보여준다.

위의 simulation 결과를 종합하여, 설계된 CMOS OTA의 dc bias조건이 VDD = -Vss = 5 [V]와 Vb = -3 [V]에서 load capacitor가 0.1[pF]일 때의 수행특성을 표 3에 요약했다. 표3에서 알 수 있듯이 앞에서 제시된 OTA의 설계 parameter 특성을 모두 만족 하였다.

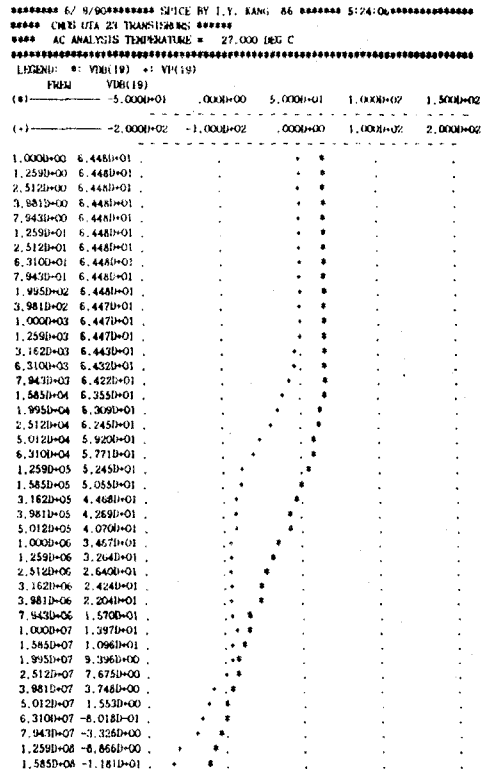


그림 6. 주파수 특성 곡선

Design Parameters	Values
Low-Frequency Open-Loop Gain	64.4 dB
Unity-Gain Frequency	56 Mhz
Slew Rate	15 V/ μs
Phase Margin	65°
Input Offset Voltage	1.5 mV
Power Dissipation	0.282 mW

표 3. CMOS OTA의 특성

III. Computer Simulation

IV. 결론

현재 각종 신호처리분야에서 기본이 되는 소자인 Op-Amp는 회로의 구성이 복잡하고, 대역폭에 제한을 받는 등의 단점을 안고 있다. Op-Amp의 일반적인 특성을 가지고 있고, 이 소자의 여러가지 단점을 보완해 주는 것이 OTA이다.

본 논문에서는 20[MHz] 이상의 고주파 신호처리에 제한을 받고 있는 기존의 OTA 기본구조에 완충 및 이득역활을 할 수 있는 buffer단을 삽입하여 대역폭을 넓힘과 동시에 feedback되는 신호의 영향을 보다 적게받을 수 있는 고주파용 OTA를 제시하였다. 설계된 OTA는 50 ~ 60 [MHz]의 대역폭을 갖고, 또한 load capacitor의 값에 대하여 보다 완만한 반응을 보임으로써 high-speed기술과 고주파에서 충분한 성능을 필요로 하는 시스템 등에서 중요한 역할을 하게될 것이다.

앞으로의 연구는 설계된 OTA를 더욱 보완하여 대역폭을 100[MHz] 이상으로 확장시켜 재설계하여 이를 layout할 예정이다.

[12] L.E.Franks and I.W.Sandberg, "An alternative approach to realization of network transfer functions, the N-path filter," Bell Syst. Tech. J., pp.1321-1350, Sept. 1960.

[13] A.Feutweis and H.Wupper, "A solution to the balancing problem in N-path filters," IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-18, pp.403-405, May 1971.

[14] M.B.Ghaderi, G.C.Temes and J.A.Nossek, "Switched-capacitor pseudo N-path filter," in Proc. IEE Int. Symp. Circuits and Systems, Apr. 1981, pp.519-522.

[15] G.M.Jacobs, D.J.Allstot, R.W.Broderson, and P.R.Gray, "Design techniques for MOS switched-capacitor ladder filters," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-26, pp.1014-1021, Dec. 1979.

참고 문헌

- [1] R.Castello and P.R. Gray, "Performance Limitations in Switched-Capacitor filter," IEEE Trans. circuits and Systems, vol. CAS-32, no.9, pp.865-876, Sept. 1985
- [2] R.Gregorian, K.W.Martin and G.C.Temes, "Switched-Capacitor Circuit Design," Proc. IEEE, vol.71, no.8, pp.941-946, aug.1983.
- [3] K.Martin, "Improved Circuits for the Realization of Switched-Capacitor Filters," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol CAS-27 no.4, pp.237-244, Apr. 1980
- [4] R.W.Broderson, P.R.Gray and D.A.,..Hodges, "MOS Switched-Capacitor Filters," Proc. IEEE, vol.67, no.1, 61-75, Jan. 1979.
- [5] P.E.Allen and A.Sanche Capacitor Circuits, Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1984.
- [6] R. Gregorian and G.C.Temes, Analog MOS Integrated Circuits for Signal Processing, John Wiley & Sons, N.Y., 1986.
- [7] M.Banu and Y.Tsividis, "Fully Integrated Active RC Filters in MOS Technology," IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-18, no.6, pp.644-651, Dec. 1983.
- [8] I.S. Han and S.B.Park, "Voltage-Controlled Linear Resistor by Two MOS Transistors and Its Application to Active RC Filter MOS Integration," Proc. IEEE, vol72, no.11, pp.1655-1657, Nov. 1984.
- [9] Y.Tsividis and P.Antognetti, Design of MOS VLSI Circuits for Telecommunications, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y., 1985.
- [10] W.G.Jung, IC OP-Amp Cookbook, Howard W.Sams, Indiana, 1974.
- [11] T.C.Choi, R.T.Kaneshiro, R.W.Broderson, P.R.Gray, W.B. Jett, and M. Wilcox, "High-frequency CMOS switched-capacitor filters for communications application," IEEE J.Solid-State Circuits, vol.SC-18, pp.652-664, Dec.1983.