

저전압, 저전력 BiCMOS 로그 도메인 필터 설계

안나영, 우영신, 성만영
고려대학교 전기공학과 반도체CAD연구실

Design of BiCMOS Log-Domain Filters for Low-Voltage and Low-Power

Na-Young Ahn, Young Shin Woo, Man Young Sung
Department of Electrical Engineering Korea University

Abstract - In this paper, the design of class AB BiCMOS log-domain filter for low-voltage and low-power was proposed. This filter is consist of a log-domain integrator using folded junctions with capacitor connected to emitter and it's class AB structure. A comparison between the proposed class AB BiCMOS log-domain filter and classical class A BiCMOS log-domain filter is drawn on the basis of SNR, THD and the frequency response. This comparison shows proposed filter are more than good SNR, THD and frequency characteristics than more class A log-domain filter for low voltage and low power.

1. 서 론

오늘날 전자통신분야에서 중요한 구성요소 중에 PLL 은 demodulator, frequency synthesizer, clock recovery 등으로 많은 분야에서 응용되고 있다. PLL는 VCO, phase detector, loop filter 등으로 구성되어 있는데 구성 요소들 각각을 제어하기 위해서 이제까지는 전압모드 회로 즉 전압을 통한 제어를 해오고 있었다. 그러나 공급 전압이 감소함에 따라 오히려 SNR와 bandwidth을 일정하게 유지하기 위해 소비전력이 증가한다는 사실이 밝혀졌다[1]. 이 문제를 해결하기 위해서 아날로그 회로에서 DR을 일정하게 유지하면서, 공급 전압을 줄이는 방안으로 컴팬딩(companding) 기술이 새롭게 제안되었다[4].

본 논문에서 응용하는 로그도메인 필터(log-domain filter) 는 이 컴팬딩 기술의 일종이다. 이 로그 도메인 필터는 BJT 또는 약한 반전상태 바이어스된 MOSFET 의 전류와 전압 사이의 로그 함수적인 특성을 이용하고 있다. 이러한 로그 도메인 기술을 이용한 회로는 트랜스리니어 원리(translinear principle)을 적용하여 이론적으로 DR 대한 제한이 없다. 로그 도메인 시스템에 입력되는 신호는 로그 함수적으로 압축되었다가, 역함수 관계는 결국 압축과 신장하는 동안에 내부적으로는 비선형적으로 컴팬딩 동작을 하지만, 전체 시스템은 선형적으로 작동한다. 이 컴팬딩 과정은 높은 압축률 때문에 로그 도메인 전압 swings은 크게 감소하게 되었고, 이 때문에 로그 도메인 기술은 매우 낮은 공급전압에서 동작하는 CTF에 응용하는데 매우 적합하였다.

특히 근래에 통신, 비디오, 하드디스크의 대용량 분야에서 고주파용 CTF의 대한 연구가 진행중인데, 바로 이 로그 도메인 기술을 이용하고자 시도가 많이 이루어지고 있다. 로그 도메인 필터는 고주파 동작, 저전압에서 DR 에 대한 잠재력 때문에 상당한 관심을 가지게 되었다.

본 논문은 에미터에 캐퍼시터가 달린 로그 도메인 적분기 Class AB 구조의 BiCMOS을 이용한 새로운 로그 도메인 필터를 설계하여 노이즈 특성 향상을 목적으로 하고 있다.

2. 트랜스 리니어 이론

트랜스리니어 회로는 크게 정적(static), 동적(dynamic) 회로로 구분되고 있다. 정적 트랜스리니어 회로는 1975년 B. Gilbert에 의해 제안되었고, 동적 트랜스리니어 회로는 1979년 R. W Adams에 의해 처음 도입되었으며, 1990년 Seevinck에 의해 컴팬딩기술에 처음으로 실제적인 응용을 하게 되었다[1].

2.2 정적 트랜스리니어 원리

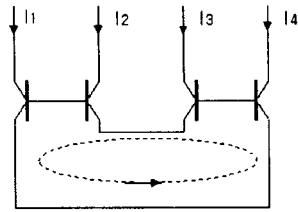


그림 1 네 개의 Tr.에 의한 트랜스리니어 루프

트랜스리니어 회로는 기본적으로 BJT나, 혹은 약한 반전 영역에서 MOSFET의 전압과 전류에 대한 지수 함수적인 특성을 이용하고 있다. 활성영역에서 바이폴라 collector 전류 I_C 는

$$I_C = I_s e^{V_{be}/V_T} \quad (1)$$

여기서 V_T 는 열전압, V_{BE} 는 베이스-에미터 사이의 전압이다.

트랜스리니어 원리는 junction들의 루프에 적용되고 있는데, 네 개의 트랜지스터의 경우 각 베이스-에미터 접합을 끼고 반시계 방향으로 루프를 생각해 볼 수 있다. 이 루프에 대하여 전압에 대한 방정식을 세워 보면 다음과 같이 기술되어 진다.

$$V_{BE1} - V_{BE2} + V_{BE3} - V_{BE4} = 0 \quad (2)$$

식(1)을 식(2)에 넣고, 전압에 대한 방정식을 전류에 대한 방정식으로 바꾸었을 때, 전류 I_4 을 통해 콜렉터 전류 I_1 가 바이어스 되고, 모든 에미터 영역의 면적은 같고, 모든 디바이스가 동일한 온도에서 동작한다고 가정하면, 트랜스리니어 루프는 전류들의 곱의 형태로 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$I_1 I_3 = I_2 I_4 \quad (3)$$

일반적인 트랜스리니어 방정식은 이론적으로 온도와 공정과는 독립적이라고 가정한다. 식(3)에서 알 수 있듯이 이러한 '정적 트랜스리니어 원리'는 multiplier 회로에 응용이 가능하다. 특히 PLL회로에서 위상 감지기부분이나 통신시스템의 주파수 변조기에 응용하는데 유용하다.

2.2 동적 트랜스리니어 원리

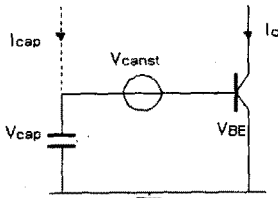


그림 2 동적 트랜스리니어 원리

트랜스리니어 루프에 캐퍼시터를 달아, 트랜스리니어 원리를 주파수에 의존하는 전달 함수까지 확장시켜 일반화할 수 있었다. 이 사실을 바탕으로 '동적 트랜스리니어'라고 불려지는 회로가 출현하게 되었다. '동적 트랜스리니어 원리'는 그림 2에서 볼 수 있듯이, 캐퍼시터 전류 I_{cap} 이 컬렉터 전류 I_C 와 캐퍼시터 용량 C , 열전압 V_T 로 표현된다.

$$I_{cap} = CV_T \frac{I_C}{I_C} \quad (4)$$

식(4)을 보면 DC 전압전원 V_{const} 는 캐퍼시터 전류 I_{cap} 에 영향을 주지 않는다.

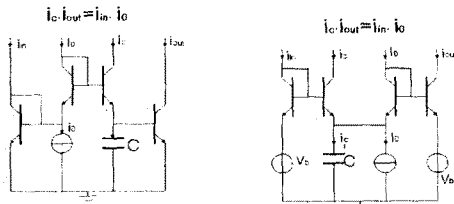
$$CV_T I_C = I_{cap} \cdot I_C \quad (5)$$

위 식은 '전류를 시간에 대하여 미분한 값은 전류의 곱으로 표현될 수 있다'로 해석된다. 이 부분은 앞에서 설명하였던 정적 트랜스리니어 원리도 식(5)의 오른쪽에 기술된 두 전류의 곱으로 표현되기 때문에 구현될 수 있다는 것을 알게 된다.

3. BiCMOS 로그 도메인 필터설계

로그 도메인의 적분기는 크게 stacked 적분기와 folded된 적분기로 분류되고 있다. 저전압, 저전력을 위해서 보통 folded 적분기를 가지고 필터를 설계하게 되는데, 이 때 공급 전압은 베이스-에미터 접합에 걸리는 전압에 바이어스를 유지하는데 필요한 포화전압을 더한 값으로 대개 1-2V에서 사용되고 있다.

3.1 기존의 로그 도메인 적분기



a) stacked b) folded 로그도메인 적분기
그림 3 저전압 로그 도메인 필터의 기본 구조들

로그 도메인 적분기는 $i_c \cdot i_{out} = \pm i_{in} \cdot i_0$ 을 만족하는 트랜스리니어 루프를 기본적으로 이용하고 있다. 로그 도메인 필터 처리는 매우 낮은 저전압에서 동작하도록 하는 회로 응용에 유용하도록 하는데 목적을 두고 있다. 따라서 folded 접합을 이용한 그림 3.1 a)는 되도록 피하고, 보통 그림 3.1 b) 같은 folded 트랜스리니어 루프를 이용한다.

그러므로 folded 트랜스리니어 루프를 이용한 로그 도

메인 적분기의 경우, 공급 전압은 하나의 정전압과 두 개의 포화 전압을 합친 정도로 최대 1V 정도가 되고 있다. 이러한 저전압 로그 도메인 필터는 npn 바이폴라 트랜스리니어 루프에 이론적 근거를 두고 있다.

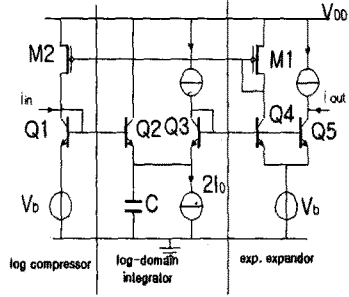


그림 4 기존의 로그 도메인 필터

위의 필터의 경우는 BiCMOS공정을 이용하였는데, 이는 MOSFET가 전류 mirror와 전압 follower를 응용하는데 장점을 최대한 활용하기 위해서였다. 왜냐하면 BJT의 경우는 유한한 전류이득 계수를 가지는 단점을 가지고 있지만, MOSFET는 이 문제가 심각하지 않고, 또한 포화전압도 BJT보다 낮게 형성하기 때문에 저전압에 유리하기 때문이다[22].

그림 4는 에미터 노드에 연결된 캐퍼시터를 가진 저전압 BiCMOS 로그 도메인 필터를 보여주고 있다. 신호는 트랜지스터 Q_1 에 의해 로그 함수적으로 압축된다. 이때 트랜지스터 Q_2 와 캐퍼시터 C 는 로그 도메인 적분기를 형성하게 된다. 트랜지스터 Q_3 는 적당한 레벨 쉬프트로서 작용하고, 트랜지스터 Q_5 는 압축되었던 신호를 지수 함수적으로 신장시켜 신호를 복원시키고 있다. 트랜지스터 Q_4 와 전류 mirror $M_1 - M_2$ 는 고정 전류에 의해 캐퍼시터를 방전시킴으로 인한 손실을 없애기 위해 사용된다. 트랜지스터 Q_1 와 Q_3 에서, 컬렉터와 베이스 노드 사이에 전압 follower를 삽입하여 베이스 전류에 대한 영향을 줄이고 있다.

3.2 제안된 Class AB BiCMOS 로그 도메인 필터

대다수의 능동 회로는 Class A에서 동작하는데, 이는 모든 능동소자 예를 들어 트랜지스터 같은 것들은 준 바이어스 포인트가 신호의 최대치보다 훨씬 크다는 것을 유지해야 되었다. 이러한 설계는 높은 선형성과 광대역 특성을 만족시킬 수 있었다. 그러나 이 Class A 구조의 설계는 전력 소비를 매우 증가되는 단점이 있다. 이러한 tradeoff, Class B 구조의 설계가 출현하였는데, 이 회로는 동작 사이클의 절반만 출력하고 나머지 절반을 차단시켰다. 양의 신호는 출력하고, 음의 신호는 차단시킴으로 상당한 전력 소비 감소와 노이즈 감소 효과를 가져왔다. 그러나 양의 신호와 음의 신호 사이의 스위칭으로 인한 crossover 왜곡이 문제가 되었다. Class AB 구조는 Class A 구조의 장점과 Class B 구조의 장점을 두루 가지고, 저전압, 저전력용 회로 설계를 위하여 접근되었다. 낮은 신호에서 Class A 구조에서처럼 좋은 선형성과 적은 노이즈 특성을 가졌으며, 대신호에서는 Class B 구조로 인한 적은 왜곡과 노이즈를 가지며, 전력소비는 또한 적어졌다. 소신호에서는 SNR 값이 향상되었다는 사실을 말해 준다.

이러한 Class AB 구조의 장점을 기대하며, 본 논문에서 에미터에 캐퍼시터에 연결한 로그 도메인 필터를 Class AB 구조로 만들어 보았다.

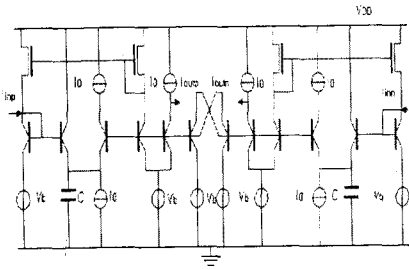


그림 5 제안된 BiCMOS 로그 도메인 필터

4. 시뮬레이션 결과

그림 6, 그림 7은 바이어스 전류에 의한 출력신호를 보았다. 이 때 바이어스 전류는 $1\mu A$, $3\mu A$, $5\mu A$, $7\mu A$, $9\mu A$ 이었다.

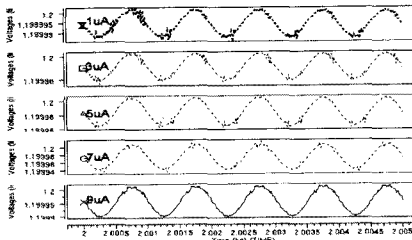


그림 6 바이어스 전류에 따른 출력신호: Class A

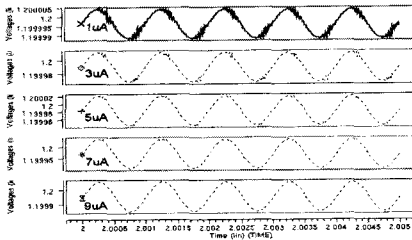


그림 7 바이어스 전류에 따른 출력신호: Class AB

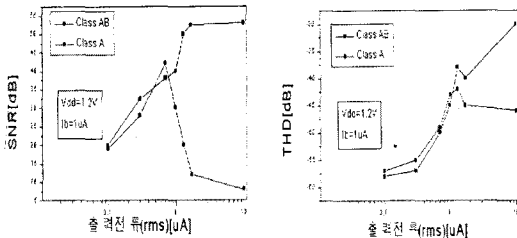


그림 8 Class A 구조와 Class AB 구조의 a) SNR b) THD 특성 (출력전류 $0.1\mu A$, $0.3\mu A$, $0.7\mu A$, $1.0\mu A$, $1.3\mu A$, $1.7\mu A$, $10\mu A$)

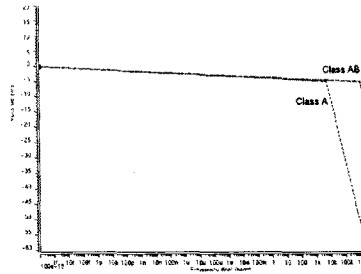


그림 9 기존의 Class A 구조와 제안된 Class AB 구조 사이의 주파수 특성(바이어스 전류는 $1\mu A$, 공급전압 $1.2V$, 신호크기는 $0.003\mu A$)

5. 결 론

로그도메인 필터 공급전압은 $1.2V$, 소비된 전력은 $1-2\mu W$ 안팎이었다. 이는 로그도메인 필터가 저전압, 저전력에 매우 유리하게 응용될 수 있다는 사실을 말해준다. 게다가 그림 6, 그림 7에서 보았듯이, 로그 도메인 필터는 바이어스 전류에 따라 자유롭게 입력 전압에 대한 출력 전압의 조절할 수 있는 필터로써 신호의 증폭을 자유롭게 할 수 바이어스 전류에 따라 쉽게 할 수 있다는 사실을 말해 준다. 그림 8은 로그 도메인 필터의 기존의 Class A 구조와 제안된 Class AB 구조의 SNR 특성과 THD 특성을 출력 전류에 따라 비교해 보았는데, 신호가 클 경우 Class AB 구조로의 필터설계가 노이즈 특성에 대하여 이점이 있음을 알 수 있었다. 그림 9은 기존 구조와 제안된 구조에 대한 주파수 특성을 결과를 살펴보았을 때, 제안된 Class AB 구조의 경우 있어 주파수 특성이 100배정도 늘어 났다는 사실을 알게 되었다. 전력 소비는 Class A 구조에서는 $1.7126\mu W$, Class AB 구조에서는 $1.7210\mu W$ 정도였다. 이상을 통하여, 제안된 Class AB 구조의 BiCMOS 로그 도메인 필터는 로그 도메인 필터는 기존의 회로에 비하여 노이즈와 디바이스의 비이상적 영향에서 상대적으로 안정적인 특성을 보였으며 광대역 주파수에 더욱 유리하게 되었다. 이로 볼 때, 새로운 Class AB 구조의 BiCMOS 로그 도메인 필터는 저전력, 저전압, 광대역용 필터 설계에 매우 유용하다는 사실을 알게 되었다. 나아가 CMOS을 이용한 Class AB 구조의 로그 도메인 필터에 대한 연구해볼 가치가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] E. Seevinck, "Companding current-mode integrator: A new circuit principle for continuous-time monolithic filters," Electron Lett., vol. 26, pp.2046-2047, Nov. 1990
- [2] R. W. Adams, "Filtering in the log domain," in 63rd Conv. AES, preprint 1970, May 1979
- [3] B. Gilbert, "Translinear circuit: A proposed classification," Electron Lett., vol. 11, pp. 14-15, 1975
- [4] Manfred Punzenberger and Christian C. Enz, "A $1.2V$ Low Power BiCMOS Class AB Log-domain Filter," IEEE J. Solid-State Circuits, vol.32, no.12, pp. 1968-1997, 1997
- [5] Christian Enz, Manfred Punzenberger, and Dominique Python, "Low-Voltage Log-Domain Signal Processing in CMOS and BiCMOS," IEEE Trans. Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, vol.46, No.3, pp.279-289, March 1999
- [6] M. Punzenberger and C. C. Enz, "A $1.2V$ BiCMOS Class AB Log-Domain Filters," Int. Solid-State Circ. Conf. Dig. of Tech. Papers, pp. 56-57, Feb. 1997