분산증폭기 기반 GHz 대역 아날로그 FIR 필터 설계

여협구*

Design of GHz Analog FIR Filter based on a Distributed Amplifier

Hyeopgoo Yeo*

이 논문은 한신대학교 연구비를 지원받았음

요 약

본 논문에서는 분산증폭기 구조를 기반으로 한 아날로그 FIR 필터 구조를 제안하고 그 특성을 분석한다. 또한, 디지털 필터 설계 기술을 이용한 간단한 아날로그 FIR 필터 설계 방법을 제시한다. 제안된 아날로그 FIR 필터는 이동평균필터와 콤필터 형태로 그 회로 구조안에 곱셈기를 포함하지 않기 때문에 multi-GHz 의 높은 주파수 대역에서도 동작 가능하게 하며, RF 시스템에서 필터와 증폭기를 결합한 형태의 응용이 가능하도록 한 구조이다. 제안된 아날로그 FIR 필터는 표준 0.18 μ m CMOS 공정 기술을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 MATLAB으로 모델링하여 얻은 디지털 필터의 결과와 비교하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 아날로그 FIR 필터는 디지털 필터와의 시뮬레이션 결과에 잘 부합하였다.

ABSTRACT

This paper introduces analog FIR filters based on a distributed amplifier and analyzes the proposed filter's characteristics. A simple design method of an analog FIR filter based on the digital filter design technique is also introduced. The proposed analog FIR filters are a moving average(MA) and a comb type filters with no multiplier. This simple structures of the proposed filters may enable to operate at multi-GHz frequency range and applicable to combine a filter and an amplifier of RF system. The proposed analog FIR filters were implemented with standard 0.18 μ m CMOS technology. The designed GHz analog FIR filters are simulated by Cadence Spectre and compared to the results of digital FIR filters obtained from MATLAB simulations. From the simulation results, the characteristics of the proposed analog FIR filters are fairly well matched with those of digital FIR filters.

키워드

분산증폭기, 아날로그 FIR 필터, 디지털 FIR 필터, 이동평균필터, 콤필터

Key word

Distributed amplifier, analog FIR filter, digital FIR filter, moving average (MA) filter, comb filter

* 정회원 : 한신대학교 정보통신학부(hgyeo@hs.ac.kr)

접수일자 : 2012. 06. 18

심사완료일자 : 2012. 07. 29

I. 서 론

트랜스버스 아날로그 FIR 필터-이하 아날로그 FIR 필터-는 분산증폭기(distributed amplifier)와 그 구조의 유사성으로 인하여 분산형 증폭기의 구조를 기초로 한 설계가 이미 소개되었다[1]. 분산 증폭기의 형태 및 구조는 디지털 FIR 필터와 유사하여 디지털 필터 설계 기법을 이용해 분산 증폭기를 설계하는 기법 또한 소개되었다[1][2].

그러나, 아날로그 FIR 필터 설계에 있어 필요한 계수들을 아날로그 회로에서 조절하기에는 현실적이지 못하다. 디지털 FIR 필터는 비교적 간단한 수식으로 표현될 수 있으며 특히, 곱셈기를 필요로 하지 않는 이동평균(moving average)필터, 콤(comb)필터와 같은 FIR 필터는 매우 간단한 구조를 가진다. 이와 같은 곱셈기가 없는 FIR 필터의 경우 그 구조가 간단하기 때문에 아날로그 FIR 필터 설계에 적용하기 용이할 뿐 아니라 높은 주파수에서 동작 하는 아날로그 FIR 필터에 적용하기 비교적 쉬운 것을 예상할 수 있다.

본 논문에서는 분산증폭기 구조를 기반으로 한 아날로그 FIR 필터 구조를 제안하고 이를 설계하는 기법을 소개한다. 특히, 디지털 FIR 필터 설계 기법을 이용하여 곱셈기 없는 디지털 필터인 이동평균필터, 콤필터 구조를 도입하여 아날로그 FIR 필터를 설계할 한다. 본 논문에서 제안된 아날로그 FIR 필터는 분산증폭기 구조를 기반으로 하고 있기 때문에 필터의 역할 뿐 아니라 multi-GHz 대역의 높은 주파수에서 동작하는 증폭기의 기능을 가지고 있어, 향후 RF 시스템에서 LNA와 필터를 결합한 형태의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

설계된 필터는 Cadence Spectre를 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 MATLAB 모델링을 통하여 수행한 결과와 비교 평가한다.

II. 분산형 트랜스버스 아날로그 FIR 필터

2.1. 디지털 FIR 필터 구조

디지털 FIR 필터는 식(1)과 같이 표현된다[3]. $h[k]$ 는 시스템의 임펄스반응의 계수이다.

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot z^{-k} \quad (1)$$

그림 1(a)는 지연 단위와 덧셈기로 구성된 FIR 필터의 구조이다. 이동평균 필터와 콤필터는 임펄스반응 계수가 1로 곱셈기가 없는 FIR 필터이다. 따라서 이동평균 필터는 식(2)와 같이 표현된다.

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \quad (2)$$

이러한 이동평균 필터는 저주파 대역 통과 필터 특성을 가진다. 평균을 내지 않은 형태의 이동평균 필터는 식(3)과 같이 나타낼 수 있고 평균을 낼 필요가 없으므로 완벽하게 곱셈기가 없는 구조가 된다.

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \quad (3)$$

이러한 구조의 이동평균 필터는 저대역 통과 필터가 된다. 곱셈기가 없는 또 다른 필터중에 하나는 콤필터이다. 디지털 콤필터의 경우 식(4)와 같이 표현된다.

$$H(z) = 1 \pm z^{-N} \quad (4)$$

위에서 설명한 이동평균필터와 콤필터의 디지털 구현은 아래와 같다.

그림. 1 디지털 FIR 필터 구조 (a)일반적인 FIR 필터 (b)이동평균 FIR 필터 (c)콤 FIR 필터

Fig. 1 Digital FIR filter structure (a) General FIR filter (b) Moving Average(MA) FIR filter (c) Comb FIR filter

2.2. 분산형 트랜스버스 아날로그 FIR 필터

일반적인 아날로그 FIR 필터의 전달함수는 식(5)와 같이 표현된다. 여기서 a_n 은 가중치 계수이고 τ 는 기본 시간 지연이다.

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^n a_{k+1} \exp(-jk\omega\tau) \quad (5)$$

아날로그 FIR 필터는 지연 단위와 가중치 계수를 조절할 증폭기와 이 신호들을 모으는 결합기로 구성되어 있다. 그림 2는 일반적인 아날로그 FIR 필터의 구조를 보여주고 있다.

그림 2. 일반적인 트랜스버스 아날로그 FIR 필터 구조

Fig. 2 General transverse analog FIR filter structure

2.3. 아날로그 FIR 필터 구현

본 장에서는 위에서 설명한 디지털 FIR 필터 설계 기술을 이용하여 아날로그 FIR 필터를 구현한다. 일반적으로 분산증폭기는 매우 높은 주파수 영역에서 동작할 수 있다[4].

본 논문에서는 분산증폭기의 출력단의 지연 라인을 제거하여 출력으로 나오는 전류를 분산하여 합하는 것이 아니라 동 시간에 합할 수 있도록 하여 마치 디지털 FIR 필터의 덧셈기와 같은 역할을 하는 형태의 아날로그 FIR 필터를 제안한다. 이렇게 제안된 필터는 분산증폭기의 구조를 기반으로 하기 때문에 증폭기 기능을 동시에 가지게 된다.

그림 3(a),(b)는 각각 4개의 지연 단위를 가지는 분산증폭기와 이동평균 필터 증폭기를 보여준다.

그림 3. 지연선 기반

(a) 3단 분산증폭기 (b) 4단 이동평균 FIR 필터

Fig. 3 Delay-line based (a) 3-tapped distributed amplifier (b) 4-tapped analog moving average (MA) FIR filter

그림 3에서 보는바와 같이 분산증폭기의 경우 입력의 지연과 출력의 지연을 동일하게 가져감으로써 광대역에서 일정한 출력을 얻을 수 있도록 설계된 반면 아날로그 이동평균 FIR 필터의 경우 입력의 신호만이 지연되고 출력은 지연 없이 나타나기 때문에 앞서 설명한 평균을 내지 않는 형태의 이동평균 FIR 필터와 같은 형태의 출력 특성을 가지게 된다. 따라서 분산증폭기의 광대역 특성과는 달리 이동평균 필터 특성이 저대역 통과 특성을 지니며 대역폭은 지연 단위로 사용하는 지연선의 길이에 따라 결정된다. 즉, 디지털 FIR 필터의 샘플링 주파수는 그림 3(b)와 같이 제안된 이동평균 필터 증폭기의 지연선의 지연시간에 상응하고 MOS 소자의 드레인 출력은 디지털 FIR 필터의 덧셈기에 상응한다. 그림 3에서 보듯이 제안된 아날로그 FIR 필터는 출력단의 구조를 제외하면 분산증폭기와 유사한 구조를 지니고 있다.

지연 단위는 정확한 지연 시간을 갖는 소자라면 무엇이든 가능하나 상당히 정확한 지연 시간을 얻을 수 있는 전송선(transmission line)을 이용하여 지연선으로 사용하고 시뮬레이션에 사용하였다. 실제로 전송선은 특성 임피던스 뿐 아니라 높은 주파수에서도 매우 정확한 지연 특성을 가지고 있기 때문에 이러한 응용에 적합하다[5].

제안된 4단 아날로그 이동평균 FIR 필터는 식(6)과 같이 표현된다. 여기서 $Av \triangleq g_m Z_0/2$, g_m 은 MOS 소자의 트랜스컨덕턴스이고 $D = \exp(j\omega\tau)$ 이다.

$$H(\omega) = A_v(1 + D^{-1} + D^{-2} + D^{-3}) \quad (6)$$

식(6)과 같은 형태의 표현은 디지털 필터를 표현하는 방법과 동일한 형태로 표현하였고 다만 샘플링 주파수에 대신에 지연선의 지연시간이 샘플링 주파수에 상응하게 된다. 또한 능동 필터가 전력이득을 가지듯이 Av 만큼의 전력 이득을 가지게 되며 필터가 적용된 low noise amplifier (LNA)로의 응용이 가능함을 예상할 수 있다.

일반적으로 분산증폭기의 경우 지연을 맞추고 광대역 응용이 가능하도록 출력단을 저항으로 사용하는 것이 일반적이나 제안된 아날로그 FIR 필터의 경우 광대역 응용 회로로 사용하지 않을 경우 인덕터 등을 이용하여 출력 이득 및 노이즈 특성을 좋게 하여 LNA 구조에 필터를 결합한 형태로도 응용이 가능하여 RF 시스템의 복잡도를 감소를 기대할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 분산증폭기와 같은 저항 출력 형태의 회로만을 설계하여 그 특성을 분석한다.

아날로그 콦 FIR 필터는 식(7)과 같이 표현된다. 아날로그 이동평균 FIR 필터와는 다르게 첫 단과 마지막 단의 MOS 소자를 통하여 전류의 합이 일어나고 나머지는 제거된다.

$$H(\omega) = A_v(1 + D^{-3}) \quad (7)$$

그림 4(a)는 식(7)에서 표현한 아날로그 콦 FIR 필터를 회로로 구성한 것이다. 이와는 반대적인 주파수 특성을 지니는 콦필터는 식(8)과 같이 표현되며 이는 $z=1$ 에서 영점(zero)을 가지 특성을 지닌다.

$$H(\omega) = A_v(1 - D^{-3}) \quad (8)$$

이러한 콦필터를 설계하기 위해서는 식(7)에 나타난 콦필터와는 달리 마지막 단 신호의 차감이 필요한데 이것은 차동 구조를 도입함으로써 해결 할 수 있다. 그림 4는 차동 구조로 구성된 아날로그 콦 FIR 필터로 식(8)을 구현하는 회로이다. 그림 4에서 보듯이 신호 차감을 위해 M4와, M8의 게이트 입력을 서로 바꾸어 연결하였

다. 물론 MOS의 드레인 출력을 서로 바꾸어 구성할 수도 있다.

그림 4. 4단 지연선 아날로그 콦 FIR 필터

(a) $1+D^{-3}$ (b) $1-D^{-3}$

Fig. 4 4-tapped delay-line analog comb FIR filter
(a) $1+D^{-3}$ (b) $1-D^{-3}$

III. 시뮬레이션

그림 3(b), 그림 4(b)에서 나타낸 아날로그 이동평균 FIR 필터와 콦 FIR 필터를 Cadence Spectre를 이용하여 시뮬레이션 하고 이에 상응하는 MATLAB으로 모델링 된 디지털 필터로 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. 회로는 $0.18\mu\text{m}$ 표준 CMOS 공정 기술을 이용하여 구성하였다. 시뮬레이션의 편의성을 위하여 지연선으로 사용한 전송선은 특성 임피던스 50Ω 과 100ps 의 지연시간을 가지는 전송선으로 모델링하였다. 따라서 터미네이션 저항으로 사용된 저항 또한 50Ω 으로 통일하였다. 출력의 저항은 전송선이 없기 때문에 반드시 50Ω 에 맞출 필

요는 없으나 케스캐이드 형태로의 RF 응용을 가정하여 50Ω 으로 고정하였다.

특성 비교를 위한 디지털 필터는 MATLAB을 사용하여 모델링 하였고 아날로그 FIR 필터와 동일한 주파수에서의 비교를 위해 샘플링 주파수 $f_s=8\text{GHz}$ 로 시물레이션 하여 2π 범위인 8GHz 까지 나타내었다.

(a)

(b)

그림 5. 전달함수 $1+D^{-1}+D^{-2}+D^{-3}$ 로 주어진 이동평균 FIR 필터의 주파수 및 위상 응답 특성

(a) 아날로그 이동평균 FIR 필터 (Cadence Spectre)
(b) 디지털 이동평균 FIR 필터 (MATLAB)

Fig. 5 Simulation results of the frequency and phase response of MA FIR filter given by $1+D^{-1}+D^{-2}+D^{-3}$

(a) analog MA FIR filter (Cadence Spectre)
(b) digital MA filter (MATLAB)

주파수 응답 시뮬레이션 결과 그림 5(a)(b)에서 보듯이 구성된 필터의 극점(pole)과 영점(zero)가 디지털필

터의 그것들과 정확하게 일치함을 볼 수 있다. 아날로그 이동평균 FIR 필터의 메인 로브와 첫 번째 사이드 로브와의 차이가 대략 13dB로 이론적인 수치와 일치함을 볼 수 있고 이것은 디지털 이동평균 필터 결과인 그림 5(b)에서 비교 확인할 수 있다.

그림 6(a)(b)는 아날로그 콤 FIR 필터와 디지털 콤 FIR 필터의 전달 특성이다. DC 주파수를 제거하는 형태인 $1-D^{-3}$ 전달함수를 가지는 콤필터를 이용하여 시물레이션 하였는데 이는 그림 4의 차동 구조를 가지는 아날로그 FIR 필터 회로이다.

(a)

(b)

그림 6. 전달함수 $1-D^{-3}$ 로 주어진 콤 FIR 필터의 주파수 및 위상 응답 특성 (a) 아날로그 콤 FIR 필터 (Cadence Spectre) (b) 디지털 콤 FIR 필터 (MATLAB)

Fig. 6 Simulation results of the frequency and phase response of comb FIR filter given by $1-D^{-3}$

(a) analog comb FIR filter (Cadence Spectre)
(b) digital comb filter (MATLAB)

주파수 응답 시뮬레이션 결과 그림 6에서와 같이 아날로그 이동 평균 필터 결과와 마찬가지로 필터의 극점(pole)과 영점(zero)가 정확하게 일치하였다.

IV. 결과 고찰

본 논문에서는 전송선을 지연 단위로 이용한 아날로그 FIR를 제안하고 디지털필터의 유사성을 기반으로 한 설계상의 편의성을 소개하였다. 제안된 아날로그 FIR 필터는 분산증폭기를 변형하여 설계된 것으로 GHz 대역의 고주파수에 적용 가능한 구조로 0.18 μ m 표준 CMOS 공정 기술을 이용하여 회로를 설계하였다. 전송선로의 정확한 지연특성으로 인하여 디지털필터에서 예상된 결과와 정확하게 일치하는 특성을 보였다. 따라서, 제안된 아날로그 FIR 필터는 RF 응용회로에 사용되는 증폭기로서의 역할을 수행하면서 주파수를 선택하는 필터를 결합 형태의 응용이 가능할 것으로 판단되고 이는 RF 시스템의 복잡도 및 신뢰도를 높일 것으로 판단된다.

본 논문에서는 제안된 아날로그 FIR 필터의 특성을 검증하고 그 결과를 디지털 필터의 특성과 비교 평가만을 하였으나 GHz 대역에서 LNA에 이러한 구조를 적용하여 필터와의 결합 응용을 위해서는 기생성분 및 전송선의 감쇄를 감안한 설계 및 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 시스템에 적용하기 위해서는 제안된 구조보다 높은 전력 이득 특성을 가지는 출력 구조와 높은 스킨트 특성을 가지는 높은 차수의 구조가 필요한데 케스케이드 형태의 회로 구성을 응용하면 높은 차수의 필터 구성이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 상대적으로 그 크기가 큰 전송선로의 최소화를 위한 회로 구조 설계 및 효율적인 배치 또한 해결해야 할 문제이다. 구체적인 회로 구현은 추후 과제로 남겨 둔다.

참고문헌

- [1] Wilhelm Jutzi, "Microwave Bandwidth Active Transversal Filter Concept with MESFETs," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-19, pp760-767, Sept. 1971.
- [2] Wen Wu, Quanrang Yang, TongLi, "New Design Method for the Distributed Amplifier," IEEE MTT-S Digest, 1993, pp301-303
- [3] Fred Taylor, Jon Mellott, Hands-on Digital Signal Processing, McGrawHill, 1998.
- [4] Thomas H. Lee, The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits, Cambridge, 1998.
- [5] Howard W. Johnson, Martin Graham, High-Speed Digital Design, Prentice Hall, 1993.

저자소개

여협구(Hyeopgoo Yeo)

1991년 연세대학교 전자공학과 공학사

1993년 연세대학교 전자공학과 공학석사

1993년~1999년 삼성전자(주) 연구원

2007년 University of Florida 전기공학 공학박사

2008년~2009년 삼성전자(주) 수석연구원

2009년~현재 한신대학교 정보통신학부 조교수

※ 관심분야: RFIC, 혼성회로설계, 초고속 데이터링크

감사의 글

본 연구는 한신대학교 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구임.