

저 감도 지연특성을 갖는 2차 저역통과 필터

인 정철, 김 춘수, 최 석우, 윤 창훈*

*한국전자통신연구원, 전북대학교 전기전자정보통신연구소, **우석대학교 정보통신공학과

Tel. 0652-270-3698, Fax. 0652-270-3699

A 2nd order Lowpass Filter with Low Group Delay Sensitivity

Joung Chul Ahn, Choon-Soo Kim, Gook-Sung Jeong[†], Seok-Woo Choi^{**}, Chang-Hun Yun

^{*}Electronics and Telecommunication Research Institute

^{††}Electrical Circuits and Systems Research Institute, Chonbuk National University

^{**}Dept. of Communication Engineering, Woosuk University

Tel. 0652-270-3698, Fax. 0652-270-3699

Abstract

This paper proposes a constant time-delay filter with low sensitivity, which can be used for hard-disk drive. The sensitivity of 2nd order lowpass filter by two kinds of method, one is based on lossy integrators and the other is lossy and lossless integrators is analyzed and designed. SPICE simulation shows feasibility of a filter by the proposed approach.

I. 서 론

최근 아날로그/디지털 회로가 하나의 칩에 동시에 탑재 되는 경우가 많고¹⁾ 이때 아날로그 회로는 중요한 역할을 한다. 특히 하드디스크 드라이브 회로는 고속의 데이터 처리를 위해 고주파수, 진폭특성 가변, 차단주파수 가변, 지연평탄 등의 특성이 요구되는 필터가 요구된다. 지금까지의 고주파, 진폭특성 가변, 차단주파수 가변, 지연평탄 특성을 실현한 아날로그 필터는 많이 발표되었다.²⁻⁴⁾ 이와 같은 아날로그 필터는 지연특성이 특히 중요하다. 종래의 필터는 지연감도가 높고 특성열화가 있으므로 저지연감도의 필터의 실현이 요구된다.

본 논문에서는 저지연감도의 필터를 실현하기 위해 유손실 적분기를 이용한 필터의 지연특성에 대한 감도 특성을 분석하고 SPICE 시뮬레이션에 의해 제안한 회로의 유효성을 확인한다.

II. 2차 저역통과 필터의 지연감도

2.1 2차저역통과 필터의 지연감도

2차저역통과 필터의 전달함수 T_{L2} 를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$T_{L2}(s) = \frac{H_L}{s^2 + as + b} \quad (1)$$

식 (1)에서 위상특성은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{L2} = -\tan^{-1} \frac{a\omega}{b - \omega^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 2차 저역통과 필터의 지연특성 DLY_{L2} 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} DLY_{L2} &= -\frac{\partial \theta_{L2}}{\partial \omega} \\ &= -\frac{1}{1 + \tan^2 \theta_{L2}} \frac{\partial \tan \theta_{L2}}{\partial \omega} \quad (3) \\ &= a \frac{b + \omega^2}{a^2 \omega^2 + (b - \omega^2)^2} \end{aligned}$$

식 (3)의 지연특성에서 대한 임의의 소자 x 에 대한 소자 감도를 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$S_x^{DLY} = \frac{x}{DLY} \frac{\partial DLY}{\partial x} \quad (4)$$

2차 저역통과 필터를 구성하는 각각의 소자값 x 의 지연특성에 대한 감도 S_x^{DLY} 는 식 (2)와 식 (4)로부터 구하면 식 (5)와 같다.

$$S_x^{DLY} = S_a^{DLY} S_x^a + S_b^{DLY} S_x^b \quad (5)$$

식 (5)는 필터의 계수의 지연에 대한 감도와 소자값 x 의 필터의 계수에 대한 감도에 의해 구해진다. 필터의 계수 a 와 b 의 지연특성에 대한 감도 S_a^{DLY} 와 S_b^{DLY} 를 각각 구하면 식 (6)과 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_a^{DLY_{L2}} &= \frac{a}{DLY} \frac{\partial DLY}{\partial a} \\ &= 1 - 2 \frac{a^2 \omega^2}{(b - \omega^2)^2 + a^2 \omega^2} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_b^{DLY_{L2}} &= \frac{b}{DLY} \frac{\partial DLY}{\partial b} \\ &= \frac{b}{b + \omega^2} - \frac{2b(b - \omega^2)}{(b - \omega^2)^2 + a^2 \omega^2} \quad (7) \end{aligned}$$

차단주파수가 $\omega^2 = b$ 일 때 각각의 감도를 구하면 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$S_a^{DLY} = -1 \quad (8)$$

$$S_b^{DLY} = \frac{1}{2} \quad (9)$$

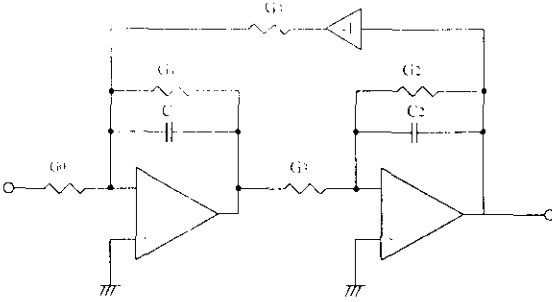


그림 1. 2차 지역 통과 필터

다음에 그림 1의 2차 지역 통과 필터에 대해 고려한다. 종래 이용되는 2차 지역 통과 필터는 그림 1에서 $G_3=0$ 또는 $G_2=0$ 인 회로이지만 그림 1의 회로가 보다 일반적인 회로이다.¹³⁾ 또한 -1배의 증폭기는 평형회로 구조에서는 불필요하므로 생략하지 않는다. 그림 1의 회로의 전달 특성 $T(s)$ 는 식 (10)과 같다.

$$T(s) = \frac{G_0 G_3}{C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{G_1}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} \right) + \frac{G_1 G_2 + G_3 G_4}{C_1 C_2}} \quad (10)$$

또한 각 소자치 x 의 지연특성에 관한 감도 $S(x, DLY)$ 는 식 (11)와 같이 주어졌으므로 분모의 계수 a 와 b 에 대한 감도를 구한다. 그림 1의 회로에서 계수 a 와 b 는 각각 식 (11) 식(12)와 같다.

$$a = \frac{G_1}{C_1} + \frac{G_2}{C_2} \quad (11)$$

$$b = \frac{G_1 G_2 + G_3 G_4}{C_1 C_2} \quad (12)$$

2차 필터 함수에서 분모의 계수 a, b 에 대한 각각의 소자의 감도는 식 (13)에서 식 (20)까지 나타낼 수 있다.

$$S_{G_0}^a = \frac{-G_1/C_1}{G_1/C_1 + G_2/C_2} \quad (13)$$

$$S_{G_2}^a = \frac{-G_2/C_2}{G_1/C_1 + G_2/C_2} \quad (14)$$

$$S_{G_1}^a = \frac{G_1/C_1}{G_1/C_1 + G_2/C_2} \quad (15)$$

$$S_{G_2}^a = \frac{G_2/C_2}{G_1/C_1 + G_2/C_2} \quad (16)$$

$$S_{G_3}^a = S_{G_4}^a = 0 \quad (17)$$

$$S_{G_1}^b = S_{G_2}^b = -1 \quad (18)$$

$$S_{G_1}^b = S_{G_2}^b = \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (19)$$

$$S_{G_3}^b = S_{G_4}^b = \frac{G_3 G_4}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (20)$$

따라서 식 (8), (9), 식 (13)에서 식 (20)까지의 식을 보면 각각의 형태에 대한 각각의 소자감도의 절댓값은 $\omega^2 = b$ 일 때 식 (21)에서 식 (25)까지와 같다.

$$|S_{G_0}^{DLY}| = \frac{G_1/C_1}{G_1/C_1 + G_2/C_2} - \frac{1}{2} \quad (21)$$

$$|S_{G_2}^{DLY}| = \frac{G_2/C_2}{G_1/C_1 + G_2/C_2} - \frac{1}{2} \quad (22)$$

$$|S_{G_1}^{DLY}| = \frac{-G_1/C_1}{G_1/C_1 + G_2/C_2} + \frac{1}{2} \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (23)$$

$$|S_{G_2}^{DLY}| = \frac{-G_2/C_2}{G_1/C_1 + G_2/C_2} + \frac{1}{2} \frac{G_1 G_2}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (24)$$

$$|S_{G_3}^{DLY}| = |S_{G_4}^{DLY}| = \frac{1}{2} \frac{G_3 G_4}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (25)$$

($G_2 = 0$ 인 종래의 2차 필터 함수의 경우에는 지연특성에 대한 각각의 소자감도의 절댓치는 식 (26)에서 식 (28)까지 나타낼 수 있다.

$$|S_{G_1}^{DLY}| = |S_{G_2}^{DLY}| = |S_{G_3}^{DLY}| = |S_{G_4}^{DLY}| = \frac{1}{2} \quad (26)$$

$$|S_{G_1}^{DLY}| = 1 \quad (27)$$

$$|S_{G_2}^{DLY}| = 0 \quad (28)$$

따라서 종래의 2차 필터의 지연특성에 대한 각각의 소자감도의 절댓치 총합 $\sum |S_x^{DLY}|$ 은 3이다. 또한 그림 1의 2차 필터에서 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 를 만족하도록 소자값을 선정하면 각각의 소자감도의 절댓치는 식 (29), 식 (30)과 같다.

$$|S_{G_1}^{DLY}| = |S_{G_2}^{DLY}| = 0 \quad (29)$$

$$|S_{G_1}^{DLY}| = |S_{G_2}^{DLY}| = |S_{G_3}^{DLY}| = |S_{G_4}^{DLY}| = \frac{1}{2} \frac{G_3 G_4}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \quad (30)$$

이 경우 소자감도의 절댓치 총합 $\sum |S_x^{DLY}|$ 은 식 (31)과 같다.

$$\sum |S_x^{DLY}| = 2 \frac{G_3 G_4}{G_1 G_2 + G_3 G_4} \leq 2 \quad (31)$$

식 (31)에서 알 수 있듯이 $\omega^2 = b$ 일 때 감도의 절댓치 총합은 반드시 종래의 방법에 2차 필터의 지연특성의 소자감도의 절댓치 총합보다 작아진다. 또한 G_1 과 G_2 를 0으로 하지 않으면 유손실 적분기의 사용이 가능하게

되므로 종래 유손실 성분기를 사용하지 위해 이용한 NIC와 PNP 트랜지스터에 의한 실험원이 필요하다.

3.2. 실험의 시뮬레이션

그림 1에서 $G_1=0$ 및 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 를 배의 지연 감도의 SPICE 시뮬레이션 결과를 그림 2에 의 5개 보였다. 감도를 $G_1=0$ 의 경우이고, 점선은 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 인 경우이다. 한편, 점선으로부터 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 의 배의 지연감도는 $G_2=0$ 의 배의 지연감도와 비교하여 작게 된 것에서 알 수 있다. 또한 Q가 작아지면 감도도 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 와 $G_2=0$ 의 차가 작고, Q가 커지면 작아지는 특성을 보였다. 일반적으로 배관 필터와 같이 일정한 지연 특성을 갖는 저역통과 필터의 2차원수는, Q가 작을수록 작고, Q가 커질수록 지연감도 특성에서 차가 없어지는 결과로 나타나는 분석이 되지는 않는다. 이상의 전라에서 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 의 회로에 대한 유효성을 확인할 수 있다.

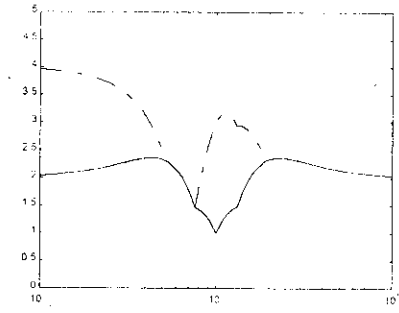


그림 2 지연감도(a=1.4, b=1일 경우; Q=0.7)

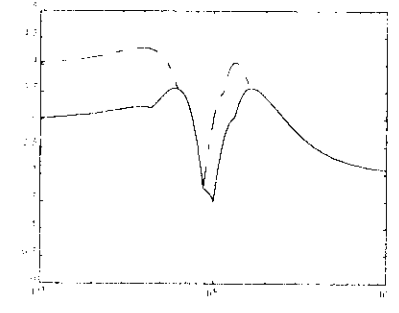


그림 3 지연감도(a=1, b=1일 경우; Q=1)

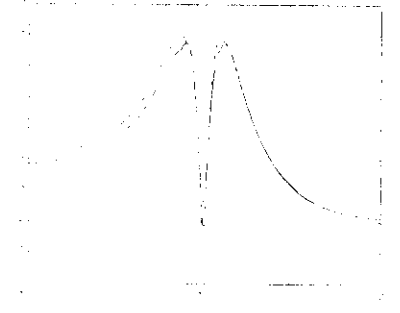


그림 4 지연감도(a=0.5, b=1일 경우; Q=2)

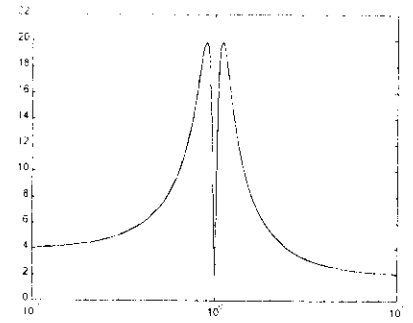


그림 5 지연감도(a=0.2, b=1일 경우; Q=5)

III. 시뮬레이션 및 고찰

3.1 2차 저역통과 필터

종래의 평형형 2차 저역통과 필터를 그림 6에 유손실 성분기를 이용한 평형형 2차 저역통과 필터를 그림 7에 나타내었다. 그림 6은 그림 1에서 $G_1=0$ 으로 설정한 회로이고 그림 7은 그림 1에서 $G_1/C_1 = G_2/C_2$ 로 설정한 회로이다.

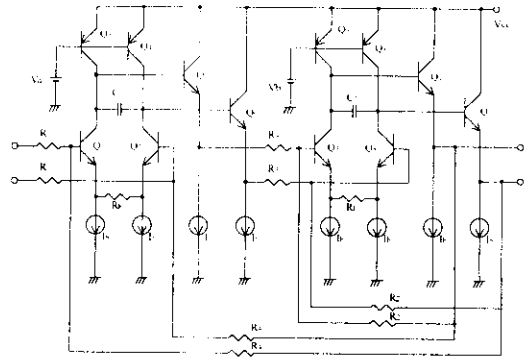


그림 6. 2차평형형 필터

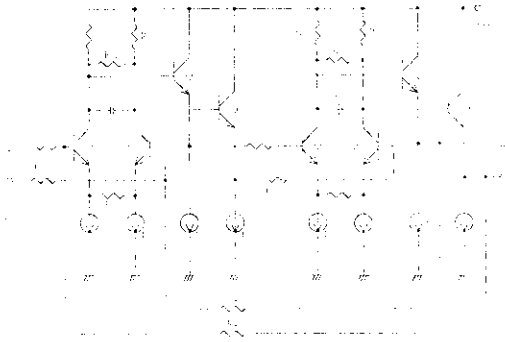


그림 7. 유손실 적분기를 이용한 2차역동화 필터

회단주파수 $f_c = 23$ MHz, $Q = 0.68$ 인 지역통과 필터를 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 비교한다. 가능한 한 같은 조건으로 비교를 수행하기 위해 전원전압, 바이어스 전압, 용량값은 같은 값으로 설계했다. 그림 6과 그림 7은 같은 전원전압 3.3V를 사용하고, 전류원은 $I_E = 30\mu A$, $I_{bias} = 100\mu A$, 용량은 $C_L = 1$ pF로 설계한다. 그림 6의 회로는 $R_0 = R_1 = 6.38$ k Ω , $R_2 = 5.06$ k Ω , $R_3 = 8.64$ k Ω , $R_E = 1.19$ k Ω 로 설계하여 설계하고 그림 7의 회로는 $R_{C1} = 38.6$ k Ω , $R_{C2} = 10.8$ k Ω , $R_0 = 4.66$ k Ω , $R_3 = 8.64$ k Ω , $R_1 = 10.11$ k Ω , $R_E = 4$ k Ω 로 설계한다. 그림 6과 그림 7의 시뮬레이션 결과는 그림 9, 그림 10과 같다. 그림 9에서 두 개의 필터 모두 기생소자의 영향으로 차단 주파수에 오차가 있으나 위상조파에 의한 오류는 유손실 적분기가 적음을 알 수 있다. 그림 10은 군지연 특성을 나타낸 결과로서 군지연 특성은 유손실적분기로 설계한 2차 필터가 오차가 적음을 알 수 있다.

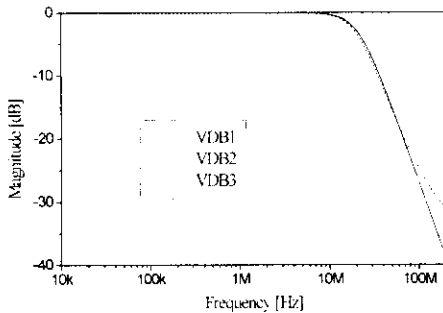


그림 9. 2차 저역통과 필터의 진폭특성

IV. 결 론

본 논문에서는 저 감도 지연특성을 갖는 저역통과 필터의 구성을 제안한다. 하드디스크 드라이브 등에 사용되는 아날로그 필터는 지연특성이 특히 중요하다. 2차 필터의 지연감도 특성에 대하여 분석하고 저 지연감도의 필터를 실현하기 위해 유손실 적분기를 이용한 필터의

지연특성에 대한 감도 특성과 분산된 적분기를 이용한 2차 필터의 지연감도 특성을 분석하였다. SPICE 시뮬레이션을 통하여 제안한 회로의 성능을 확인하였다.

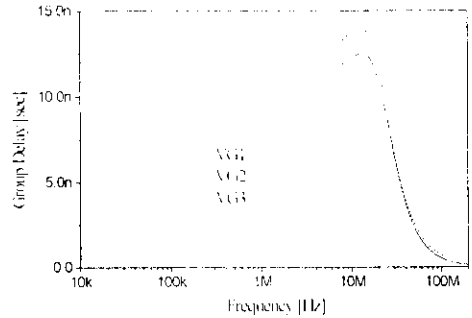


그림 10. 2차 저역통과 필터의 군 지연 특성

참 고 문 헌

- [1] Roy Batruni, Pierre Lemaitre, and Thierry Fensch, "Mixed digital/analog signal processing for a single-chip 2B1Q U-interface transceiver," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-25, No. 6, pp. 1414-1425, December 1990.
- [2] Joao Vital, Jose E. Franca, and Franco Maloberti, "Integrated mixed-mode digital-analog filter converters," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-25, No. 3, pp. 660-668, June 1990.
- [3] Greet A. De Veirman and Richard G. Yamasak, "Design of a bipolar 10-MHz programmable continuous-time 0.05equiripple linear phase filter," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-27, No. 3, pp. 324-331, March 1992.
- [4] Carlos A. Laber and Paul R. Gray, "A 20-MHz sixth-order BiCMOS parasitic insensitive continuous-time filter and second-order equalizer optimized for disk-drive read channel," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-28, No. 4, pp. 462-470, April 1993.
- [5] R. Schaumann, M. S. Ghauri, and K. R. Laker, *Design of analog filters: passive, active RC, and switched capacitor*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1989.