

공통 모드 노이즈를 흡수하는 소형 공통 모드 필터 설계

Design of Compact Common Mode Noise Absorption Filter

정 현 중 · 정 진 우* · 임 영 석

Hyeonjong Jung · Jinwoo Jung* · Yeongseog Lim

요 약

본 논문에서는 수동소자를 이용한 소형 공통 모드 필터를 설계 및 제작하였다. 주어진 주파수 응답을 갖는 공통 모드 필터를 설계하기 위해 차동 모드와 공통 모드에서 등가회로를 분석하였다. 제안된 구조는 기존의 $\lambda/4$ 공진기로 구현된 필터에 비해 60 %의 크기가 감소하였다. 또한, 제작된 공통 모드 필터는 $|S_{dd11}|$, $|S_{cc21}|$, $|S_{cc11}| < -10$ dB를 만족하는 27.5 %의 공통 모드 흡수 대역폭에서 최대 1.2 dB의 차동 모드 삽입손실과 최소 78.2 %의 공통 모드 흡수 효율을 갖는다.

Abstract

In this paper, a compact common mode filter using passive elements is designed and fabricated. To design a common mode filter with required frequency response, the equivalent circuits of the common mode filter in differential mode and common mode were analyzed. Compared with the former filter using a $\lambda/4$ resonator, the size of the proposed structure was reduced by 60 %. The fabricated common mode filter has a maximum differential mode insertion loss of 1.2 dB and a minimum common mode absorption efficiency of 78.2% in the CMA - bandwidth of 27.5 %.

Key words: Common-Mode Filter, Common Mode Noise, Differential Mode(DM), Noise Absorption, Reflectionless Filter

I. 서 론

차동신호 전송(differential signaling)은 외부 노이즈에 강하며, EMI(Electromagnetic Interference)가 감소한다는 장점이 있다. 따라서 USB, HDMI, Thunderbolt 등과 같은 고속 차동 인터페이스에 사용된다. 그러나 실제 시스템 회로에서는 제한된 PCB 공간상의 소자 배치 문제로 비대칭적인 신호선 사용이 증가하고 있으며, 이로 인해 모드 변환에 의한 공통 모드 노이즈가 발생되고 있다. 이러한 공통 모드 노이즈는 고속 디지털 회로 시스템에서 심각

한 EMI 또는 RFI(Radio Frequency Interference) 문제로 이어진다^{[1]~[2]}.

이에 따라 공통 모드 노이즈를 제거하기 위해 공통 모드 초크, DGS, SRR 등 공통 모드 필터(common mode filter: CMF)에 대한 다양한 방법의 연구가 이루어지고 있다^{[2]~[6]}. 그러나 이러한 방법들은 공통 모드 노이즈를 모두 반사시켜 삽입손실을 높이기 때문에 노이즈가 시스템 속에 계속 존재하여, SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 낮춰 통신 품질을 저하시키고, 새로운 방사 문제를 야기한다. 이에 따라 공통 모드 노이즈를 반사나 전송 없이 차단하

「제작된 공통 모드 필터의 성능 측정에 도움을 주신 한국방송통신전파진흥원 전파기술센터에 감사의 뜻을 표합니다.」

전남대학교 전자컴퓨터공학부(School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)

*동신대학교 에너지IoT전공(Department of Energy IoT, Dongshin University)

· Manuscript received November 14, 2018 ; Revised December 8, 2018 ; Accepted December 14, 2018. (ID No. 20181114-115)

· Corresponding Author: Yeongseog Lim (e-mail: limys@jnu.ac.kr)

는 방법이 필요하지만 이에 대한 연구가 부족하다. 지금까지 연구된 공통 모드 노이즈를 흡수하는 CMF의 경우 모두 $\lambda/4$ 공진기를 이용하여 설계되어왔다. 그러나 이는 CMF 회로의 크기가 크다는 단점을 가지고 있다^{[5]~[6]}.

본 논문에서는 수동소자를 이용한 3개의 공진기를 적용하여 공통 모드 노이즈를 흡수하는 소형 CMF를 제안하였다. 제안된 CMF는 SMD 유형의 수동 소자를 이용하여 회로의 크기가 감소하였으며, 저항을 이용하여 공통 모드에서 반사되어 돌아오는 노이즈를 흡수할 수 있도록 하였다.

II. 제안된 공통 모드 필터 설계

그림 1은 제안된 CMF의 등가회로를 보여준다. 수동소자를 이용한 3개의 공진기로 구성되어 있으며, 각 공진기 사이에는 동작 주파수에서 길이가 $\lambda/4$ 이고, Z_q 의 특성 임피던스를 갖는 전송 선로로 연결되어 있다. 양측의 공진기에는 공통 모드에서 반사되어 되돌아오는 노이즈를 흡수하기 위해 대칭선을 따라 저항으로 접지되어 있다.

2-1 차동 모드 회로 해석

그림 2(a)는 제안된 CMF의 차동 모드 등가회로 구조이며, 그림 2(b)는 인덕터 $L_{s1,m1}$ 을 마이크로스트립선로로 구현한 등가회로의 구조이다^[7]. CMF가 차동 모드에서 동작하는 경우, 그림 1의 대칭선을 가상의 접지선으로 볼 수 있다. 따라서 커패시터 C_{s2} , C_{m2} 와 저항 R은 무시되며, C_{s1} , C_{m1} 의 커패시턴스는 회로이론에 따라 2배가 된다.

그림 2(b) 기준, 양측 공진기의 입력 임피던스는 $Z_{in,DM}^s$ 이고, 중앙 공진기의 입력 임피던스는 $Z_{in,CM}^m$ 으로 식 (1)과 같다.

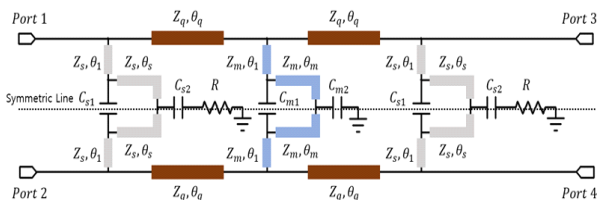
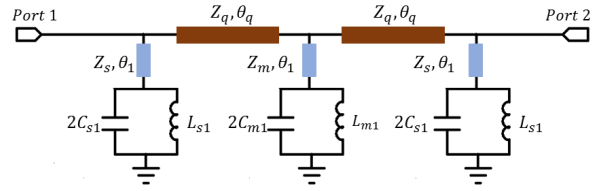
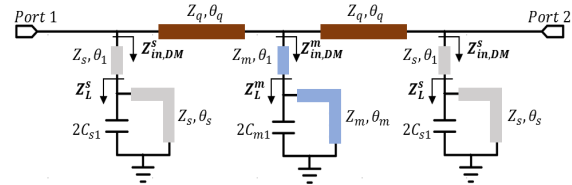


그림 1. 공통 모드 필터의 등가회로
Fig. 1. The equivalent circuit of CMF.



(a) 제안된 공통 모드 필터의 차동모드 등가회로
(a) The differential mode equivalent circuit of the proposed CMF



(b) 마이크로스트립선로를 이용한 등가회로
(b) The equivalent circuit using microstrip line

그림 2. 차동 모드에서 등가 회로

Fig. 2. The equivalent circuit in differential mode.

$$Z_{in,DM}^{m,s} = Z_{m,s} \frac{Z_L^{m,s} + jZ_{m,s} \tan \theta_1}{Z_{m,s} + jZ_L^{m,s} \tan \theta_1} \quad (1)$$

여기서, $Z_L^{m,s} = (j\omega(2C_{m1,s1}) - jY_{m,s} \cot \theta_{m,s})^{-1}$ 이다.

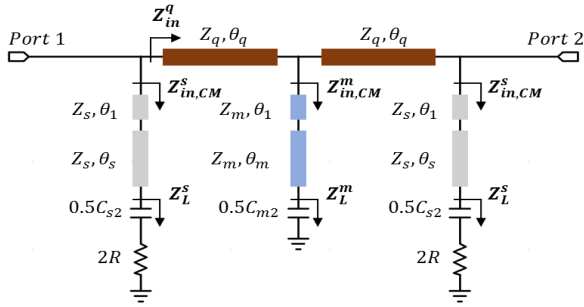
동작 대역의 중심주파수에서 $Z_{in}^{m,s}$ 가 무한대이면 차동 모드 신호의 무반사 전송이 가능하다.

그림 2(b)의 전체 ABCD 행렬은 식 (2)와 같으며, 이를 이용하여 차동 모드에서 반사손실 S_{dd11} 과 삽입손실 S_{dd21} 을 구할 수 있다.

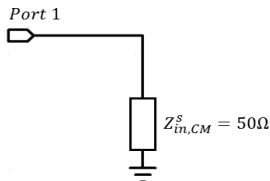
$$\begin{bmatrix} A_{DM} & B_{DM} \\ C_{DM} & D_{DM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,DM}^s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_q & jZ_q \sin \theta_q \\ jY_q \sin \theta_q & \cos \theta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,DM}^m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_q & jZ_q \sin \theta_q \\ jY_q \sin \theta_q & \cos \theta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,DM}^s & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2-2 공통 모드 회로 해석

CMF가 공통 모드에서 동작하는 경우에는 그림 1의 대칭선을 가상의 개방선으로 볼 수 있다. 이에 따라 공통 모드 기준 등가회로 구조는 그림 3(a)와 같다. 여기서, 커패시터 C_{s1} , C_{m1} 은 무시할 수 있으며, C_{s2} , C_{m2} 의 커패시턴스는 회로이론에 따라 절반이 되며, R은 2배가 된다. 그림 3(b)는 동작 주파수에서 간략화된 회로를 보여준다.



(a) 제안된 공통 모드 필터의 공통 모드 등가회로
(a) The common mode equivalent circuit of the proposed CMF



(b) 동작 주파수에서 간략화된 회로
(b) The simplified circuit at the operation frequency

그림 3. 공통 모드에서 등가 회로
Fig. 3. The equivalent circuit in common mode.

그림 3(a)에서 양측 공진기의 입력 임피던스 $Z_{in,CM}^s$ 과 중앙 공진기의 입력 임피던스 $Z_{in,CM}^m$ 은 식 (3)과 같다.

$$Z_{in,CM}^{m,s} = Z_{m,s} \frac{Z_L^{m,s} + jZ_{m,s} \tan(\theta_1 + \theta_{m,s})}{Z_{m,s} + jZ_L^{m,s} \tan(\theta_1 + \theta_{m,s})} \quad (3)$$

여기서, $Z_L^m = (j\omega(0.5C_{m2}))^{-1}$ 이며, $Z_L^s = 2R + (j\omega(0.5C_{s2}))^{-1}$ 이다.

그림 3(b)와 같이 동작하기 위해 동작 주파수에서 $Z_{in,CM}^m$ 은 0이 되어야 하며, 동작 주파수에서 θ_q 가 90° 이기 때문에 Z_{in}^q 는 무한대가 된다. 임피던스 정합을 위해 동작 주파수에서 $Z_{in,CM}^s$ 은 50Ω 이 되어야 한다.

그림 3(a)의 전체 ABCD 행렬은 식 (4)와 같으며, 이를 이용하여 공통 모드에서 반사손실 S_{cc11} 과 삽입손실 S_{cc21} 을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{CM} & B_{CM} \\ C_{CM} & D_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,CM}^s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_q & jZ_q \sin\theta_q \\ jY_q \sin\theta_q & \cos\theta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in,CM}^m & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

표 1. 임피던스, S 파라미터 조건식

Table 1. The impedance, S parameter conditional equation.

| | Differential mode | Common mode |
|-----------------------|---|--|
| Impedance condition | $Z_{in,DM}^{m,s} = \infty$ | $Z_{in,CM}^m = 0 \Omega$ $Z_{in,CM}^s = 50 \Omega$ |
| S-parameter condition | $ S_{dd11} = -30 \text{ dB}$ $ S_{dd21} = -1 \text{ dB}$ | $ S_{cc11} = -20 \text{ dB}$ $ S_{cc21} = -30 \text{ dB}$ |

표 2. CMF 설계 파라미터

Table 2. CMF design parameter.

| Element | Value | Element | Value |
|------------|-------------|------------|------------------|
| Z_s | 87Ω | θ_1 | 14.5° |
| θ_s | 34° | R | 33Ω |
| Z_m | 87Ω | C_{s1} | 0.3 pF |
| θ_m | 28° | C_{s2} | 0.6 pF |
| Z_q | 50Ω | C_{m1} | 0.4 pF |
| θ_q | 90° | C_{m2} | 0.6 pF |

2-3 공통 모드 필터 설계

등가회로 소자값의 범위를 정한 후 회로 해석을 통해 얻은 표 1의 조건식을 만족하는 등가회로 소자값을 구하였다. 이후 선로 간의 결합 현상, 선로의 구부러짐에 의한 커패시턴스 영향 등을 고려하기 위해 EM 시뮬레이션으로 등가회로 소자값을 구조 최적화하였다. 최적화된 등가회로 소자값은 표 2와 같다.

III. 측정 및 결과

그림 4는 비유전율 4.2, 유전체 두께 1.2 mm, Loss Tan-

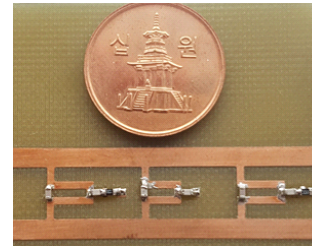


그림 4. 제작된 공통 모드 필터 사진
Fig. 4. Photograph of the fabricated CMF.

gent가 0.02인 FR-4 기판을 이용하여 동작 주파수가 3.5 GHz로 제작된 공통 모드 필터의 사진을 보여준다.

그림 5는 제안된 CMF의 측정치와 시뮬레이션 결과를 보여준다. EM 시뮬레이션은 SEMCAD X^[8]를 이용하였으며, Keysight사의 VNA(Vector Network Analyzer) E5080A를 이용하여 측정하였다. 본 논문에서는 $|S_{cc11}|$, $|S_{cc21}|$, $|S_{dd11}| < -10$ dB인 주파수 범위를 공통 모드 흡수 대역폭 (common mode absorption-fractional bandwidth: CMA-FBW)으로 정의하였다. 그림 5(a)에서 공통 모드 흡수 대역폭은 27.5%임을 알 수 있다. 그림 5(b)는 대역폭 내에서 최대 1.2 dB의 차동 모드 삽입손실과 최소 16.7 dB의 반사 손실을 가지며, 차동 모드에서 대역 통과 필터와 같이 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 식 (5)를 이용하여 구한 공통 모드 흡수 효율을 보여준다^[2]. 대역폭 내에서 최소 78.2 % 이상의 공통 모드 흡수 효율을 보여주며, 대부분의 공통 모드 노이즈

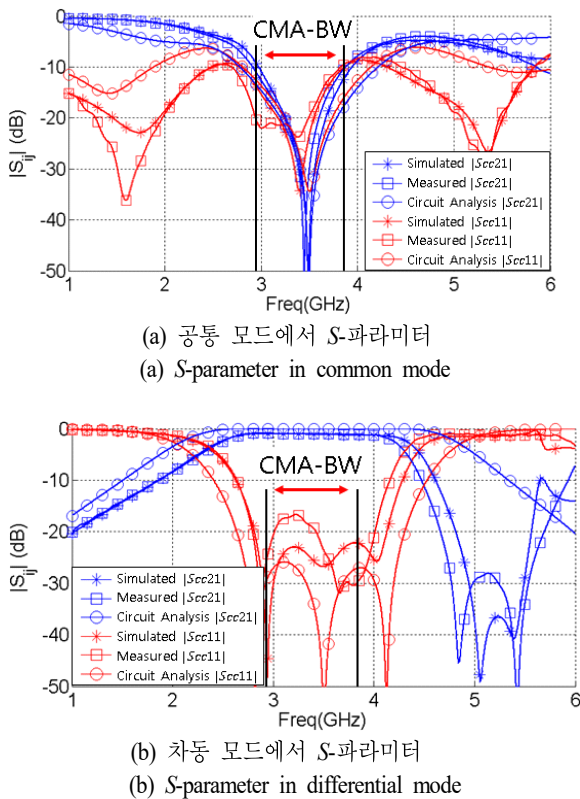


그림 5. 시뮬레이션과 측정 결과
Fig. 5. The simulated and measured results.

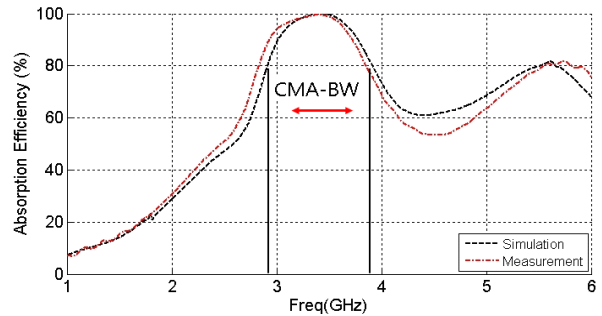


그림 6. 공통 모드 흡수 효율
Fig. 6. Common mode absorption efficiency.

가 회로 내부로 반사되지 않고 저항에서 열로 소모됨을 알 수 있다.

Absorption efficiency=

$$(1 - |S_{cc11}|^2 - |S_{cc21}|^2) \cdot 100(\%) \quad (5)$$

표 3은 기존에 연구된 CMF와 제안된 CMF를 비교 정리한 표이다. 참고문헌 [4]는 공통 모드 노이즈가 모두 반사되어 되돌아가는 것을 알 수 있다. 참고문헌 [5]~[6]은 모두 공통 모드 노이즈를 흡수하는 CMF에 관한 연구이다. 참고문헌 [5]는 3개의 $\lambda/4$ 공진기를 이용하여 비교적 넓은 대역폭과 적은 삽입손실을 가지고 있지만 CMF 회로의 크기가 크다는 단점이 있다. 참고문헌 [6]은 1개의 미앤더 구조의 $\lambda/4$ 공진기와 수동소자를 이용한 2개의 공진기를 이용하였다. 참고문헌 [5]에 비해 회로 크기는 감소하였지만, 좁은 대역폭과 큰 차동 모드 삽입손실을 가지고 있다. 제안된 CMF는 수동소자를 이용한 3개의 공진기를 이용하였다. 기존의 수동 소자를 이용한 참고문헌

표 3. 기존 연구와의 비교
Table 3. Comparison with previous research.

| Ref. | f_0 (GHz) | Size (λ_g^2) | Lumped element (ea) | $ S_{cc11} $ (dB) | $ S_{dd21} $ (dB) | CMA-FBW (%) |
|-----------|-------------|------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| [4] | 1.85 | 0.39 | 0 | ≈ 0 | -0.56 | - |
| [5] | 2 | 0.24 | 2 | -25.38 | -0.29 | 55.5 |
| [6] | 2.4 | - | 6 | -18 | -2.35 | 20 |
| This work | 3.5 | 0.09 | 8 | -22.5 | -1.2 | 27.5 |

[5]와 비교하여 우수한 공통 모드 반사손실 특성과 차동 모드 삽입손실 특성을 보이며, 더 넓은 공통 모드 흡수 대역폭을 갖는다. 또한 기존 연구들과 비교하여 가장 많은 수동소자를 필요로 하지만 회로의 크기가 가장 작은 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 수동 소자를 이용한 3개의 공진기를 적용함으로써 공통 모드 노이즈를 흡수하는 소형 CMF를 설계 및 제작하였다. 기존의 공통 모드 노이즈를 흡수하는 CMF에 비해 크기가 약 60 % 감소하였으며, 대역폭 내에서 최소 78.2 % 이상의 공통 모드 흡수 효율을 보여준다. 제안된 필터는 반사되어 돌아가는 공통 모드 노이즈를 흡수하여 통신 품질을 향상시키며, 전자기기의 집적화 현상으로 인한 소형화 요구에 맞춰 집적회로에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] T. W. Koo, H. S. Lee, and J. G. Yook, "Recent trends in system-level EMC investigation and countermeasure technology for RF interference due to high-speed digital system noise," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 10, pp. 966-982, Oct. 2014.

[2] P. J. Li, Y. C. Tseng, C. H. Cheng, and T. L. Wu, "A

novel absorptive common-mode filter for cable radiation reduction," *IEEE Transactions on Components*, vol. 7, no. 4, pp. 511-518, Apr. 2017.

[3] H. Hung, S. Yoon, Y. Kim, S. Bae, and Y. Lim, "Method for high frequency modeling of common-mode choke," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 12, pp. 964-973, Dec. 2017.

[4] L. Lin, J. Bao, J. J. Du, and Y. M. Wang, "Differential wideband bandpass filters with enhanced common-mode suppression using internal coupling technique," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 300-302, May 2014.

[5] W. Zhang, Y. Wu, Y. Liu, C. Yu, A. Hasan, and F. M. Ghannouchi, "Planar wideband differential-mode bandpass filter with common-mode noise absorption," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 27, no. 5, pp. 458-460, May 2017.

[6] T. Y. Lin, T. L. Wu, "Balanced bandpass filter with reflectionless common-mode suppression," in *2016 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems (EDAPS)*, Honolulu, HI, Apr. 2017, pp. 17-19.

[7] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2001.

[8] SEMCAD X by SPEAG. Available: <http://www.zurichmedtech.com>, <http://www.speag.com>.

정 현 중(전남대학교/학생)



2017년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학부(공학사)
 2017년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파회로설계, EMC/EMI

정 진 우(동신대학교/교수)



2005년 2월: 전남대학교 정보통신공학부 전자공학전공(공학사)
 2007년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과(공학석사)
 2011년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과(공학박사)
 2012년~2017년: 국방과학연구소 선임연구원

2018년~현재: 동신대학교 에너지 IoT 전공 교수
 [주 관심분야] 위상배열안테나, 적응형 빔 형성 알고리즘

임 영 석[전남대학교/교수]



1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)

1984년 9월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터

공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나, EMC/EMI