

비선형 레이다용 CRLH 전송선로 필터를 이용한 광대역 저잡음증폭기 설계

Wideband Low Noise Amplifier using CRLH Transmission Line Filter for Nonlinear Radar Application

김형주* · 남형석 · 우규식 · 서철현

Hyeong-Ju Kim* · Hyeong-Seok Nam · Gyu-Sik Woo · Chul-Hun Seo

요 약

본 논문은 비선형 레이다용 LNA(low noise amplifier)에서 메타 필터의 일종인 CRLH(composite right-handed and left-handed) 필터와 결합된 형태로 제작된 결과를 제시한다. 제안한 비선형 레이다용 LNA는 입력 매칭 네트워크와 출력 매칭 네트워크 그리고 CRLH 필터가 결합된 형태로 구성된다. LNA와 결합한 CRLH 필터는 광대역, 저잡음, 높은 주파수 선택성의 장점을 가지고 n 차 고조파를 필터링하며, 결과적으로 광대역으로 동작하며 동작주파수 대역에서 평탄한 S -parameter 값을 가지게 된다. 제안한 LNA의 성능을 검증하기 위해 제작 및 측정을 진행하였다. 제작된 LNA는 4~8 GHz의 넓은 주파수 대역에서 10 dBm 이상의 이득을 가지고 동작하였으며, 잡음지수는 4 GHz와 8 GHz에서 각각 1.521 dB, 1.682 dB의 값을 가지고 중간 주파수인 6 GHz는 1.542 dB로 측정되었다.

Abstract

This paper presents a low noise amplifier (LNA) for nonlinear radar applications combined with a composite right-handed and left-handed (CRLH) filter, a type of metamaterial. The proposed LNA consists of an input matching network, output matching network, and a CRLH filter combined. The LNA with a CRLH filter has advantages of broadband, low noise, and high frequency selectivity. It filters the harmonic frequency resulting in broadband operation and has a flat S -parameter value with a gain of more than 10 dBm in a wideband ranging from 4 GHz to 8 GHz. The noise figure value was measured at 1.521 dB and 1.682 dB at 4 GHz and 8 GHz, respectively, and 1.542 dB at 6 GHz, in middle frequency.

Key words: Wideband, Low Noise Amplifier, CRLH Filter, Noise Figure, Radar System

I. 서 론

비선형 레이다는 식별이 어려운 표적을 탐지하기 위한 레이다로, 비선형 주파수를 이용해 표적을 탐지할 수 있

「이 연구는 2023학년도 국방과학연구소 미래도전국방기술 연구개발사업(912902601)의 지원을 받았음.」

승실대학교 정보통신융합학과(Department of Information and Communications Convergence, Soongsil University)

*승실대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communications Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received November 10, 2023 ; Revised November 28, 2023 ; Accepted December 19, 2023. (ID No. 20231110-096)

· Corresponding Author: Chulhun Seo (e-mail: chulhun@ssu.ac.kr)

는 레이더 시스템이다. 비선형 레이더는 표적으로부터 반사된 고조파($2f_0, 3f_0$ 등)를 이용하여 비선형 표적을 탐지할 수 있으며, 고조파 성분을 사용하기 때문에 수신 안테나 뒤에 고역 통과 필터 또는 대역 통과 필터를 사용한다. 그러나 필터가 사용되는 비선형 레이더의 경우, 고조파 성분은 반송파에 비해 크기가 작아 수신단의 크기와 수신 감도의 문제를 일으킨다. 이러한 단점을 극복하기 위해 저손실, 광대역, 높은 주파수 선택성의 특성을 가지는 CRLH(composite of right-handed and left-handed) 전송선로를 활용하여 광대역 필터를 설계하고, 광대역에서 높은 이득과 낮은 잡음 지수를 달성하기 위해 입출력 매칭과 이미터 축퇴 기법을 사용했다. 현재까지 연구 및 제작된 CRLH 필터의 설계 및 구현은 마이크로스트립 라인으로만 구성되어 있다. 최근 국내의 CRLH 필터 관련 연구는 CRLH 필터를 통한 주파수 대역 확장 및 성능 향상을 위해 새로운 소재나 구조의 도입, 설계 최적화 기술 등이 연구되고 있다. 하지만 특정 조건식을 따라야 하므로 실제 설계 과정에서 너무 짧은 마이크로스트립 라인으로 인해서 구현하는데 있어서 외부 요인에 민감하다는 단점이 존재한다. 본 연구의 CRLH 필터는 이러한 단점을 보완하고자 필터 설계시 직렬 전송선로 필터를 커패시터로 대체하여 구현하였다.

설계된 CRLH 필터는 비선형 레이더 시스템에서 고조파 성분을 효과적으로 추출하고 필터링하여 표적을 탐지하는데 도움을 주며, 수신단의 성능을 향상시킨다. 이러한 기술은 표적 감지 및 식별 분야에서 중요한 역할을 하게 된다.

II. CRLH Filter

CRLH는 전자기 및 무선통신 분야에서 사용되는 메타물질로 이루어진 필터의 일종이다. CRLH 필터는 전파의 특성을 가지고 동작하는 회로로, 전기적 또는 자기적인 성질을 가진 새로운 물질의 개념이다. CRLH 필터의 주요 특징은 특정 주파수에서 LH(left-handed)와 RH(right-handed)의 두가지 전파 특성을 모두 포함하고 있다. 따라서 이 필터는 전파 필터의 특성을 주파수에 따라 유기적으로 조절할 수 있다는 것을 의미한다. CRLH 필터는 원하는 방

향으로 전파를 조절하거나 특정 주파수 대역을 효과적으로 통과하거나 차단하는데 큰 도움을 준다. 또한 CRLH 필터의 설계 방식에 따라 전체 시스템 크기를 줄일 수 있는 장점을 지니고 있다. 먼저, CRLH 필터 제작은 ADS(advanced design system) 회로 시뮬레이션 툴을 사용하여 설계하였다. 그림 2는 하나의 단위 셀 CRLH 필터의 회로도 나타내고 있다. 단위 셀 CRLH 필터는 직렬 커패시턴스(capacitance) C_L 과 병렬 인덕턴스(inductance) L_L 그리고 직렬 인덕턴스 L_R 과 병렬 커패시턴스 C_R 로 이루어져 있다. 낮은 주파수에서는 직렬 커패시턴스 C_L 이 단락되고 그리고 병렬 인덕턴스 L_L 이 오픈되면서 LH 성분들이 증가적으로 동작하며 고역 통과 필터 특성을 갖는다.

반대로 높은 주파수에서는 직렬 인덕턴스 L_R 이 단락되고 병렬 커패시턴스 C_R 이 오픈되면서 RH 성분들이 증가적으로 동작하며 저역통과 필터 특성을 가진다. CRLH 필터의 특징으로 한 주파수에서 RH 특성과 LH 특성을 모두 갖는다는 것을 보여주고 있다. 즉, 고역 통과 필터와 저역 통과 필터의 특성을 동시에 지니고 있다.

그림 1은 CRLH 필터의 분산 그래프이다. CRLH 필터의 공진주파수는 필요에 따라서 조절할 수 있다. 커패시턴스나 인덕턴스 크기를 조절함으로써 공진주파수를 조절할 수 있고, 이를 통해 필터의 동작 주파수 대역을 설계 요구에 맞게 최적화 할 수 있다. PLH(pure left-handed) 구조와 PRH(pure right-handed) 구조는 서로 공진주파수 ω_{sh} 가 다르기 때문에 LH와 RH 사이에 간격이 존재하게 된다. 공진주파수가 같게 되면 간격은 사라지고 무한과장($\lambda_g = 2\pi/|\beta|$) 전파가 발생하게 된다. 필터 특성에도 불구

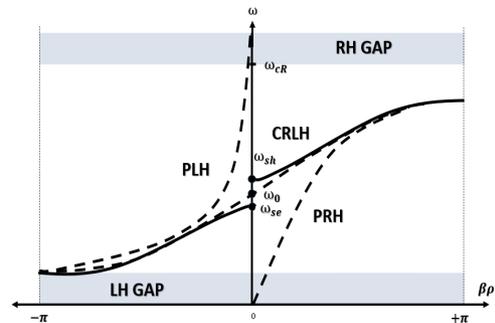


그림 1. CRLH 필터의 분산그래프
Fig. 1. Fundamentals CRLH filter' dispersion diagram.

하고 CRLH 구조는 $p \approx \lambda g/2$ 인 경우에만 동작하게 된다. 또한 유효-균질성이 보장되는 전이 주파수 근처 ($p < \lambda g/4$)에서 필터가 LH 특성과 RH 특성을 모두 지니며 CRLH 필터로서 동작한다.

III. 회로 설계

CRLH 특성을 지니는 필터 설계의 첫 번째 조건은 그림 2에서 유효-균질성이 보장되는 전이 주파수 근처 ($p < \lambda g/4$) 내에서 CRLH 구조가 LH와 RH 특성을 모두 지니며 CRLH의 특성을 가지고 동작한다.^{[1]-[6]} p 는 회로 시스템의 크기를 나타내므로 CRLH 필터의 크기는 전체 시스템의 1/4보다 작아야 한다. 위 조건을 만족하였을 때 Bloch-Floquet 이론에 의해 식 (1)과 같이 정리된다. 식에 변수들을 대입하여 결과적으로 LH와 RH를 구현하기 위한 성분들의 값을 얻을 수 있다.

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\Delta z} \cos^{-1} \left(1 + \frac{Z_c Y_c}{2} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 Δz 는 단위셀 CRLH 필터의 파장을 나타낸다. 또한 Z_c 와 Y_c 는 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_c(\omega) = R_S + j \left(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L} \right) \quad (2)$$

$$Y_c(\omega) = G_S + j \left(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L} \right) \quad (3)$$

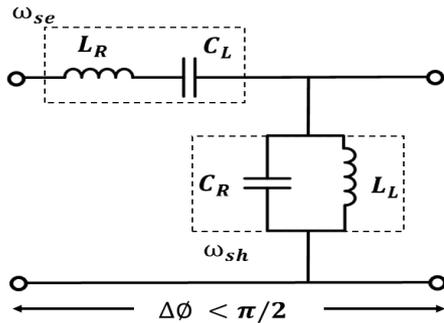


그림 2. Composite of right-handed and left-handed (CRLH) 필터의 등가 회로도
 Fig. 2. Equivalent circuit diagram of composite of right-handed and left-handed (CRLH) filter.

Z_c 는 등가 입력 임피던스 값을 나타낸다. 또한 Y_c 는 등가 입력 어드미턴스를 의미한다. 식 (1)을 토대로 테일러 근사화 방법을 통하여 근사화 하면 CRLH filter를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta(\omega) = \pm \frac{1}{\Delta z} \sqrt{R_e - j(R_S X_{se} + G_S X_{sh})} \quad (4)$$

또한 식 (2) 및 식 (3)도 근사화 하여 식 (5) 및 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 근사화가 적용된 식에서 R_e 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{se} = \left(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L} \right) \quad (5)$$

$$X_{sh} = \left(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L} \right) \quad (6)$$

$$R_e = \left[R_S G_S - \left(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L} \right) \left(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L} \right) \right] \quad (7)$$

위 계산식들을 이용하여 공진주파수를 고려한 CRLH 특성을 만족시키는 RH와 LH 성분 값을 구할 수 있다. 위와 같은 방식을 통하여 수식적으로 해석을 하고 설계를 진행하였다. 회로 시뮬레이션은 ADS(key sight)를 이용하여 진행하였다. 설계를 진행하는데 L, C 소자 대신 삽입 손실이 낮은 전송선로를 이용해 설계를 진행하였다.

그림 3은 CRLH 단위셀 필터 시뮬레이션 결과이다. 4 GHz부터 8 GHz까지 동작하며 중간 주파수인 6 GHz에서 0.314 dB의 삽입손실을 가지고 있다.

CRLH 필터와 결합된 비선형 레이다용 LNA의 통합

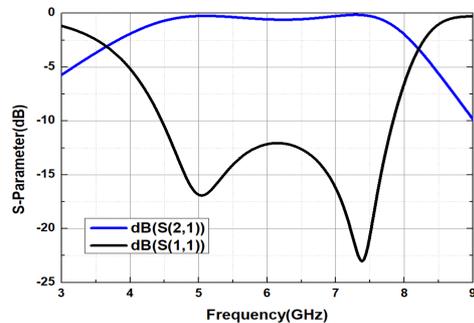


그림 3. CRLH 필터 시뮬레이션 결과
 Fig. 3. Simulation result of CRLH filter.

표 1. LNA 전송선로 파라미터 값

Table 1. Value of the transmission line for LNA.

Transmission line value					
TL1 (mm)	W:1.77 L:8.95	TL4 (mm)	W:1.38 L:4.85	TL8 (mm)	W:1.38 L:4.85
TL2 (mm)	W:1.28 L:5.08	TL5 (mm)	W:1.35 L:1.19	TL9 (mm)	W:1.23 L:2.20
TL3 (mm)	W:8.77 L:5.95	TL6 (mm)	W:2.4 L:8.7	TL10 (mm)	W:3.48 L:2.9
C1 (pF)	12	TL7 (mm)	W:1.35 L:2.71	TL11 (mm)	W:5.09 L:7.44

회로도에서는 입력 매칭과 출력 매칭 과정에서 CRLH 필터와 같은 구조를 사용하였다. 다만 제작 과정에서 용이함을 위하여 CRLH 단위셀의 직렬 마이크로스트립 라인은 커패시터로 대체하였다. 또한 이미터에 라인을 추가하여 이미터 축퇴 기법을 사용하여 잡음지수를 낮추고 입출력 매칭을 수월하게 하였다.

표 1은 설계에 쓰였던 전송선로와 소자의 파라미터 값을 정리한 표이다.

IV. 시뮬레이션 및 측정결과

그림 4는 제작된 LNA 사진이며 제작된 회로의 크기는 53×28 mm²이다. PCB는 3.2의 유전율과 0.813 mm의 두께를 가지고 있는 Taconic사의 TLC-32 기판을 사용하였다.

또한 비선형 특성을 지니며 낮은 잡음지수, 높은 이득의 장점을 가진 Infineon사의 BFP840FESD 소자를 사용하였다. 제안된 LNA에 전압을 인가하기 위하여 Aligent의 E3634A DC Supply를 사용하였으며 잡음지수는 Agilent사의 N8973A를 이용하여 측정하였다. 주파수 변화에 따른 특성 변화 확인은 Protek A338 Network Analyzer를 통해서 진행하였다. 측정 과정에 입력전력은 -38 dBm, V_{CC} 는 1.75 V, V_{BE} 는 0.8 V를 인가하였다. 베이스의 전류는 -65.7 uA로 측정되었다.

그림 5은 주파수에 따른 잡음지수 변화의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타내는 그래프이다. ADS 툴을 이용한 시뮬레이션 결과, 4 GHz와 8 GHz에서 각각 1.501 dB, 1.497 dB의 잡음지수를 갖는다. 또한 측정 결과, 4 GHz,

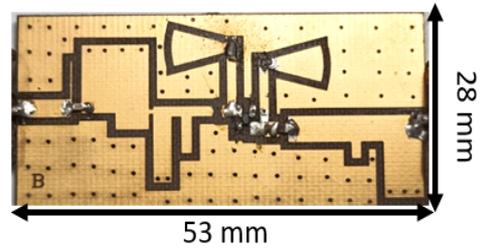


그림 4. 제작된 비선형 레이더용 low noise amplifier
Fig. 4. Fabricated LNA for non-linear radar's application.

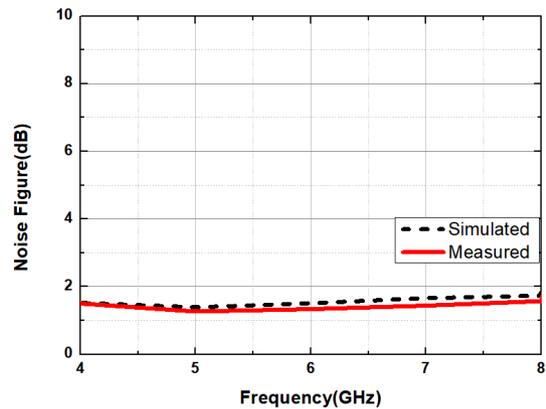


그림 5. 잡음지수 시뮬레이션 및 측정결과
Fig. 5. Simulated and measured result of noise figure.

8 GHz에서 각각 1.521 dB, 1.682 dB으로 측정되었다. 잡음 지수가 동작 주파수 대역에서 2 dB 이하의 평탄한 값을 가지고 동작하며 시뮬레이션과 측정 결과는 유사한 값을 가진다.

그림 6은 주파수에 따른 전력 이득 변화의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타내는 그래프이다. 회로 시뮬레이션 결과, 4 GHz와 8 GHz에서 각각 17.2 dB, 14.84 dB의 Gain을 갖는다. 측정 결과, 4 GHz와 8 GHz에서 각각 14.63 dB, 12.84 dB의 값을 가지는 것으로 측정되었다. 이득 또한 시뮬레이션 결과와 비슷한 값을 가지며 동작하고 전 동작 대역에서 10 dB 이상의 이득 값을 가지며 평탄하게 동작함을 확인할 수 있었다.

표 2는 기존 발표된 LNA와 제안한 LNA의 성능을 비교한 표이며, 기존 논문과 비교하여 낮은 잡음지수를 가지고 광대역으로 동작하며 동작 주파수에서 10 dB 이상의 이득을 가지며 동작한다. 결과적으로 비교를 통해서

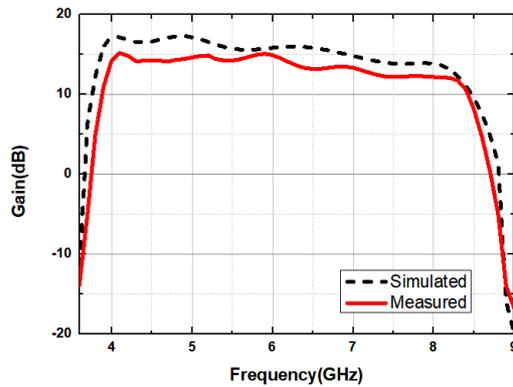


그림 6. 전력 이득 시뮬레이션 및 측정결과
Fig. 6. Simulated and measured result of power gain.

표 2. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교
Table. 2. Comparison with the previously reported works.

	This work	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]
Frequency [GHz]	4~8	2.6~9.2	2~9	2~4.6
S_{11} (dB)	-12	-11.5	-15	-9
S_{22} (dB)	-13.2	-	-12	-9.8
S_{21} (dB)	14.63	7.1	13	14
NF (dB)	1.5	3.5	3.9	2.3

CRLH Filter와 결합된 비선형 레이다용 LNA를 이용해 기존 연구보다 잡음특성과 BW면에서 향상된 결과를 얻을 수 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 메타 필터의 일종인 CRLH 필터와 결합된 비선형 레이다용 LNA를 제안하였다. 제안한 LNA는 left-handed 특성과 right-handed 특성을 동시에 지니며, 넓은 주파수 범위 특성을 갖도록 하였다. 제작된 LNA는 4~8 GHz 대역에서 14.63 dB~12.84 dB의 이득, 1.521 dB~1.682 dB의 잡음지수를 가지며, 동작 대역내에서 평탄한 값을 가지며 CRLH 필터의 특성을 지닌다.

References

- [1] S. Hu, Y. Gao, X. Zhang, & B. Zhou, "Design of a compact 5.7-5.9 GHz filter based on CRLH resonator units," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 89, pp. 141-149, Feb. 2020.
- [2] Q. Bu, J. Ding, & C. J. Guo, "New design of ultra-wideband bandpass filter using interdigitated coupled lines CRLH-TL structure," in *Proceedings of ISAPE2012*, Xi'an, China, 2012, pp. 486-489.
- [3] L. Chen, Y. L. Luo, "Compact filtering antenna using CRLH resonator and defected ground structure," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 21, pp. 1496-1498, 2014.
- [4] C. W. Kim, M. S. Kang, P. T. Anh, H. T. Kim, and S. G Lee, "An ultra-wideband CMOS low-noise amplifier for 3-5 GHz UWB system," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 40, no. 2, pp. 544-547, Feb. 2005.
- [5] C. T. Fu, H. Lakdawala, and S. S. Taylor, "A 2.5 GHz 32nm 0.35mm² 3.5 dB NF -5 dBm P1dB fully differential CMOS push-pull LNA with integrated 34 dBm T/R switch and ESD protection," in *2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, San Francisco, CA, Feb. 2011, pp. 56-57.
- [6] C. C. Wu, M. F. Chou, W. S. Wuen, and K. A. Wen, "A low power CMOS low noise amplifier for ultra-wideband wireless applications," in *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Kobe, Japan, Feb. 2005, pp. 5063-5066.

김 형 주 [숭실대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-4762-8498>



2021년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부
전자공학전공 (공학사)
2022년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 전력 증폭기, 무선전력
전송 기술등

우 규 식 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2811-2173>



2019년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부
IT융합전공 (공학사)
2019년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 정보통신공학과 석·박사통합
과정
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier

남 형 석 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5610-3437>



2017년 9월: 숭실대학교 정보통신전자공
학부 (공학사)
2017년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 정보통신공학과 석·박사통합
과정
[주 관심분야] EMC/EMI, RF 회로, WPT,
안테나, 레이다

서 철 현 [숭실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6765-8734>

한국전자과학회논문지, 17(12) 참조