

마이크로파 라디오미터를 위한 하모닉 억제 특성을 가진 헤어핀 필터

윤대순*

Harmonic-Suppressed Hairpin Bandpass Filter for the Microwave Radiometer

Tae-Soon Yun*

요약

본 논문은 토양 수분 함유량 검출을 위한 L-band 마이크로파 라디오미터의 주파수 선택 및 우수한 수신감을 위한 하모닉 억압의 헤어핀 필터에 관한 것이다. 전형적인 반파장 공진기가 공진주파수의 배수에서 하모닉을 가지는 것에 비해, 각 부분의 임피던스 비와 전기적 길이 비로써 하모닉 주파수를 조절할 수 있는 SIR을 이용하여 하모닉 억압 특성을 구현하였다. 필터의 하모닉을 효율적으로 억압하기 위해 5단의 헤어핀 필터에는 서로 다른 임피던스 비를 갖는 3종류의 SIR이 사용되었고, 제작된 필터는 1390 [MHz]의 중심주파수의 5배 주파수까지 35 [dB] 아래로 하모닉을 억압하는 특성을 가진다.

ABSTRACT

In this paper, for improving the performance of selecting and the sensitivity of the L-Band microwave radiometer for remote sensing of soil-moisture, the harmonic-suppressed hairpin bandpass filter is described. As the harmonic frequencies of the SIR can be controlled by the ratio of the impedance and electrical length, SIRs are used in the hairpin BPF for suppressing harmonics. Manufactured harmonic-suppressed hairpin BPF has the SIRs of three types and its harmonic is suppressed under 35 [dB] until 5 times of the center frequency of 1390 [MHz].

키워드

Hairpin BPF, Harmonic, Stepped Impedance Resonator, Radiometer.
헤어핀 대역통과 필터, 하모닉, 계단형 임피던스 공진기, 라디오미터

1. 서론

마이크로파 라디오미터는 토양에서 복사되는 마이크로파 대역의 미약한 열잡음 전력을 수신하여 토양 수분 함유량의 변화를 실시간으로 원격 모니터링할 수 있도록 응용 가능한 시스템이다[1]. 이것은 지표면과 대기간의 물과 에너지 순환에 결정적인 영향을 미

치는 수문기상 인자로써의 토양 수분을 통해 가뭄, 홍수, 산불 등의 재해관리나 산림, 농작물, 초지 등의 생육상태 및 생태환경에 관한 중요한 정보를 제공받기 위한 것이다[1-4].

현재 통상적으로 널리 사용되고 있는 토양 함수율 측정 센서는 직접 현장의 토양에 센서의 탐침을 삽입하여 측정하는 접촉 방식으로 토양에 함유된 수분의

* 교신저자(corresponding author) : 호남대학교 이동통신공학과(easteryun@gmail.com)

접수일자 : 2014. 08. 04

심사(수정)일자 : 2014. 09. 25

게재확정일자 : 2014. 10. 17

압력을 측정하거나 전극의 저항 변화를 이용하여 토양의 유전율을 측정함으로써 토양의 함수율을 측정한다[5]. 이러한 접촉 방식의 센서는 측정범위가 국소 지점에 한정됨에 따라 광범위한 지역에 대해 토양 함수율의 공간적 분포와 변화를 실시간으로 관측하기 위해서는 다량의 센서를 설치해야 하므로 정보 수집 및 유지 보수에 많은 인력과 비용이 요구된다. 따라서 다양하고 광범위한 육상지역을 대상으로 토양 수분 정보를 실시간 원격으로 수집할 수 있는 기술이 필요하며 이에 대한 마이크로파 라디오미터연구가 진행 중에 있다[1].

마이크로파 라디오미터는 대역폭 40 [MHz]를 가지며 중심 주파수 1390 [MHz]에서 설계되고 있는데[1], 토양에서 복사되는 미약한 열잡음을 검출하기 위해서는 원하는 주파수 대역을 선택하는 우수한 특성을 갖는 필터를 통해 시스템의 수신 감도를 크게 높여야 한다.

일반적으로 필터에서는 중심 주파수의 배수의 주파수에서 하모닉(harmonic) 성분을 발생시키는데, 이러한 하모닉은 라디오미터의 수신 감도를 저해하는 요소가 된다. 따라서, 본 논문에서는 라디오미터의 수신 감도 향상을 위해 계단형 임피던스 공진기 (SIR: stepped impedance resonator)의 하모닉 주파수 특성을 분석하고 이를 통해 하모닉 억제 필터를 설계 및 제작하고자 한다.

계 공진이 발생되게 된다. 그러나, 그림 1과 같이 공진기 내부에서 서로 다른 임피던스를 갖는 선로로 구성되는 계단형 임피던스 공진기(SIR)는 각 선로의 임피던스 비율에 의해 하모닉 주파수를 이동시킬 수 있을 뿐만 아니라 공진기의 크기를 줄일 수 있다는 장점에 의해 다양한 마이크로파 주파수 대역에서 응용되고 있다[6-9].

SIR을 해석하기 위해서 일반적으로 대칭 구조로 하여 식 (1)과 같이 입력 임피던스를 계산하게 된다.

$$Z_{in} = jZ_H \frac{K_Z \tan \theta_H \tan \theta_L - 1}{\tan \theta_H + K_Z \tan \theta_L} \quad (1)$$

식 (1)에서 K_Z 는 각 선로의 임피던스 비(= Z_H/Z_L)를 나타내고 있으며, θ_H 와 θ_L 은 각각 높은 임피던스와 낮은 임피던스를 갖는 선로의 전기적 길이를 나타낸다. 각 선로의 전기적 길이가 동일하다고 가정하여 ($\theta = \theta_H = \theta_L$) SIR의 기본 공진 주파수를 구하면,

$$\theta = \theta_H = \theta_L = \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{K_Z}} \quad (2)$$

이 되고, 하모닉을 발생시키는 각 부분의 전기적 길이는 다음과 같다.

II. SIR의 하모닉 주파수

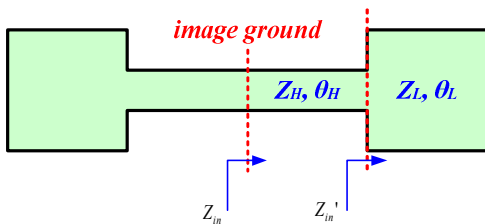


그림 1. 계단형 임피던스 공진기의 구조
Fig. 1 Structure of the stepped impedance resonator(SIR)

$$\theta_{harmonic} = \begin{cases} n\pi \pm \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{K_Z}} \\ \frac{n\pi}{2} \end{cases} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (3)$$

식 (2)에 의해 SIR의 전체 길이는 임피던스 비 K_Z 가 1보다 커짐에 따라 일반적인 반파장 공진기에 비해 줄어들게 되고, 임피던스 비 K_Z 가 1보다 작아짐에 따라 증가하게 된다. 하모닉 주파수는 식 (1)이 0 또는 무한대가 되도록 전기적 길이를 구한 것이다. 식 (2)와 (3)을 통해 임피던스 비에 따른 하모닉 주파수의 크기를 나타내면 그림 2와 같다.

일반적인 마이크로파 전송 선로의 공진기는 반파장으로 되어 공진 주파수의 배수 주파수에서도 동일하

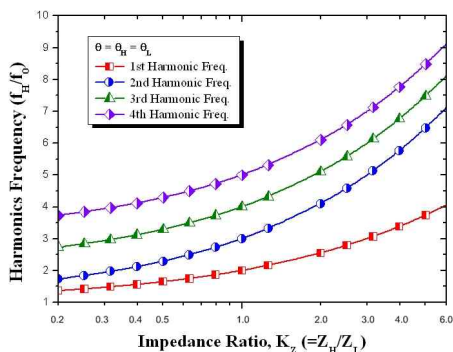
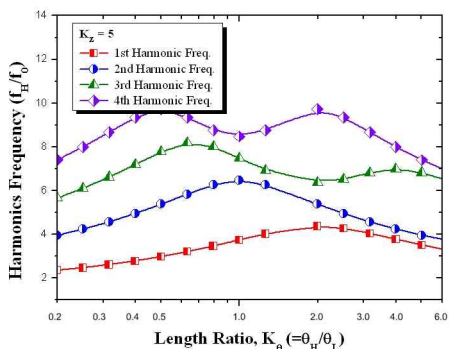


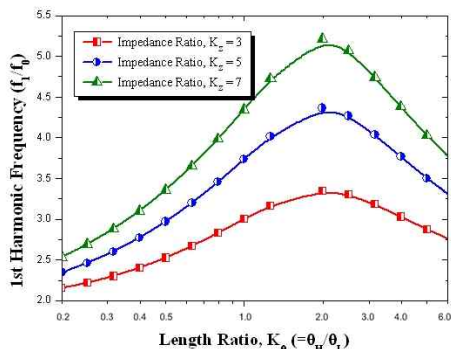
그림 2. 임피던스 비율에 따른 SIR의 하모닉 주파수
Fig. 2 Harmonic frequencies of SIR as the impedance ratio

그림 2는 SIR에서 높은 임피던스를 갖는 부분과 낮은 임피던스를 갖는 부분의 전기적 길이가 동일한 경우의 임피던스 비에 따른 하모닉 주파수의 크기를 나타낸 것으로 임피던스 비가 증가할수록 모든 하모닉 주파수의 크기도 증가하는 것을 알 수 있다. 실제적으로 SIR을 응용한 설계에서는 높은 임피던스는 좁은 폭의 선로로, 낮은 임피던스는 넓은 폭의 선로로 구현되므로 임피던스 비는 제작 환경에 의해 제한을 받게 된다.

한편, 높은 임피던스의 선로와 낮은 임피던스의 선로의 전기적 길이가 상이한 경우 하모닉 주파수의 크기는 전기적 길이에 의해 다르게 나타나게 된다.



(a) 임피던스 비가 5인 경우의 1, 2, 3, 4차 하모닉
(a) Harmonics for the impedance's ratio of 5



(b) 다른 임피던스 비를 갖는 SIR의 1차 하모닉
(b) 1st harmonics of SIR as the impedance ratio
그림 3. 전기적 길이 비율에 따른 SIR의 하모닉 주파수

Fig. 3 Harmonic frequencies of SIR as the electrical length ratio

그림 3(a)는 임피던스 비가 5인 경우에, 높은 임피던스의 선로와 낮은 임피던스의 선로의 전기적 길이 비 K_0 에 따른 하모닉 주파수의 크기를 나타내었고, 그림 2(b)에서는 임피던스 비가 3, 5, 7인 경우의 2차 하모닉 주파수의 특성을 비교하였다. 전기적 길이가 동일한 경우와 달리 높은 임피던스의 선로와 낮은 임피던스의 선로의 전기적 길이 비에 따라 하모닉은 그림 3(a)와 같이 변화한다. 실제적인 설계에서는 낮은 임피던스를 갖는 선로의 전기적 길이를 높은 임피던스를 갖는 부분보다 상대적으로 짧게 설계하는 경우가 많으므로 설계 환경에 맞게 하모닉 주파수를 파악하여야 한다. 그림 3(b)에 나타나듯이 임피던스 비는 크게 하고 높은 임피던스를 갖는 선로의 전기적 길이가 낮은 임피던스를 갖는 선로의 전기적 길이가 2배가 되었을 때, 1차 하모닉이 기본 공진 주파수에 비해 가장 멀리 떨어지게 설계할 수 있다.

임피던스 비의 증가에 따라 SIR의 크기는 감소하게 되는데, 전기적 길이 비에 따라서는 비가 1인 경우가 가장 작은 크기로 SIR을 설계할 수 있고, 전기적 길이 비가 1보다 증가하거나 감소하였을 때 SIR의 크기는 증가하게 된다. 이러한 결과를 그림 4에 나타내었다.

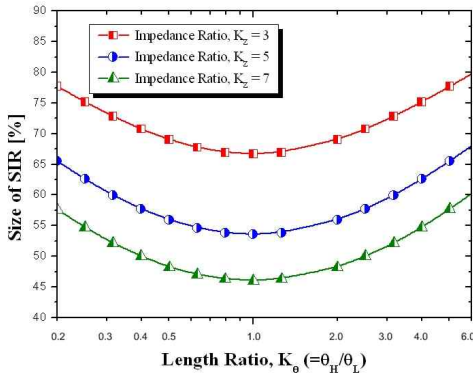


그림 4. 전기적 길이 비율에 따른 SIR의 크기
Fig. 4 Size of SIR as the electrical length ratio

III. 하모닉 억제의 헤어핀 필터 설계 및 제작

마이크로파 라디오미터의 주파수 선택을 위해 중심 주파수 1390 [MHz]에서 대역폭 40 [MHz]를 가지도록 5단 체비셰프 타입의 헤어핀 필터를 설계하였다. 헤어핀 필터의 인버터 구현을 위해 입·출력부는 탭 선로를 이용하였고, 각 공진기 사이의 J-인버터는 75°의 전기적 길이에서 결합이 일어나도록 설계하였다. 이때의 우수 모드 임피던스 ($Z_{0e,k}$) 및 기수 모드 임피던스 ($Z_{0o,k}$)는 다음 식으로 계산된다[10].

$$\begin{aligned} Z_{0e,k} &= \frac{1 + J_k Z_0 \csc \theta_c + (J_k Z_0)^2}{1 - (J_k Z_0 \cot \theta_c)^2} \\ Z_{0o,k} &= \frac{1 - J_k Z_0 \csc \theta_c + (J_k Z_0)^2}{1 - (J_k Z_0 \cot \theta_c)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 J_k 는 k번째 인버터를 의미하고, θ_c 는 공진기 간의 결합이 이뤄지는 부분의 전기적 길이를 나타낸다. 0.1 dB의 5단 체비셰프 타입의 헤어핀 필터의 설계 변수 값은 다음 표 1과 같다.

표 1. 헤어핀 필터의 설계 변수 값
Table 1. Value of the design parameters for hairpin bandpass filter

Parameter	Parameter Value	Parameter	Parameter Value
$Q_{e,in} = Q_{e,out}$	39.546	-	-
$Z_{0e12} = Z_{0e45}$	51.951 Ω	$Z_{0o12} = Z_{0o45}$	48.190 Ω
$Z_{0e23} = Z_{0e34}$	51.474 Ω	$Z_{0o23} = Z_{0o34}$	48.608 Ω

표 1의 변수 값을 적용하여 유전율 2.55의 테플론 기판을 이용하여 헤어핀 필터를 설계하였을 때, 중심 주파수 1390 [MHz]에서 필터의 특성을 보이며, 2743, 5560, 6913, 8266 [MHz]에서 하모닉 특성을 가진다. 하모닉이 중심 주파수의 배수에서 형성되지 않는 것은 탭 선로의 영향에 의한 것이다.

필터의 공진기를 동일한 SIR로 설계하였을 때, SIR의 하모닉에 의해 필터의 하모닉이 발생되게 되므로, 효율적인 하모닉 억압을 위해 표 2와 같이 1390 [MHz]에서 기본 공진주파수를 가지며 서로 다른 임피던스 비 및 전기적 길이 비를 갖는 SIR을 설계하였다.

표 2는 하모닉 억제의 헤어핀 필터에 응용될 각 SIR의 설계 변수 값을 나타내었다. 표 2에 나타낸 바와 같은 임피던스 비 및 전기적 길이 비를 갖는 SIR의 하모닉 특성은 표 3에 나타내었다.

표 2. 헤어핀 필터의 SIR 설계 변수 값
Table 2. Value of the design parameters of SIR for the hairpin bandpass filter

Parameter	1 st Reso.	2 nd Reso.	3 rd Reso.
Z_H	105 Ω	90 Ω	126 Ω
θ_H	39.7°	41.7°	39.6°
Z_L	25 Ω	23 Ω	28 Ω
θ_L	16°	16°	15°
K_Z	4.20	3.91	4.50
K_θ	2.48	2.61	2.64

표 3. 헤어핀 필터의 각 공진기의 하모닉 주파수
Table 3. Harmonic frequencies of each resonators for hairpin bandpass filter

Harmonic	1 st Reso.	2 nd Reso.	3 rd Reso.
1 st	2.637ℓ	2.553ℓ	2.650ℓ
2 nd	4.632ℓ	4.437ℓ	4.663ℓ
3 rd	6.695ℓ	6.398ℓ	6.754ℓ
4 th	8.683ℓ	8.309ℓ	8.806ℓ

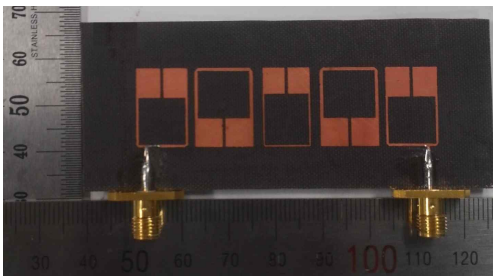


그림 5. 하모닉 억제 헤어핀 필터의 제작 사진
Fig. 5 Photograph of the harmonic-suppressed hairpin bandpass filter

표 3에서 나타나듯, 각 SIR은 다른 임피던스 비와 전기적 길이 비로 인해 서로 다른 하모닉 주파수 특성을 가진다. 이러한 SIR들을 통해 AWR사의 MWO와 AXIEM을 이용하여 설계한 필터는 유전율 2.55, 높이 0.76 [mm]의 테플론 기판을 이용하여 제작되어 측정되었다.

본 논문에서는 동일한 임피던스 비를 갖는 SIR(표 2의 첫 번째 공진기)에 의한 헤어핀 필터와 서로 다른 임피던스 비를 갖는 SIR을 이용한 헤어핀 필터를 설계 제작하였다. 그림 5는 PCB 상에 제작된 SIR을 통해 하모닉 억제된 헤어핀 필터의 실물 사진으로 필터의 전체 크기는 16.9 × 64.0 [mm²]으로 일반적인 헤어핀 필터의 크기 16.9 × 62.2 [mm²]에 비해 다소 증가하였다.

제작된 헤어핀 필터는 회로망 분석기를 통해 측정되었고 그 결과는 그림 6과 같다.

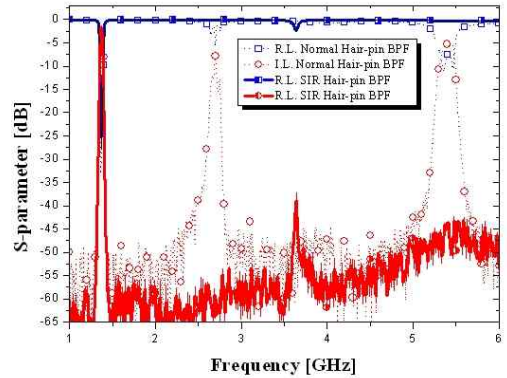


그림 6. 하모닉 억제 헤어핀 필터의 측정 결과
Fig. 6 Measured results of the harmonic-suppressed hairpin bandpass filter

그림 6에서 나타나듯, 일반적인 헤어핀 필터와 본 논문에서 제시한 하모닉 억제의 헤어핀 필터는 동일하게 마이크로파 라디오미터에 응용될 수 있도록 1390 [MHz]의 중심 주파수를 만족하고 있다.

동일한 임피던스 비를 갖는 SIR을 사용한 일반적인 헤어핀 필터는 중심주파수에서 삽입 손실 1.19 [dB], 반사 손실 34.63 [dB]로 측정되었고, 본 논문에서 제시한 하모닉 억제의 헤어핀 필터는 중심주파수에서 삽입 손실 1.21 [dB], 반사 손실 30.47 [dB]로 설계되어 삽입 손실 1.34 [dB], 반사 손실 27.85 [dB]로 측정되었고 중심주파수에서 14.5 [ms]의 군지연 (group delay) 특성을 보였다. 또한, 일반적인 헤어핀 필터가 2743 [MHz] 및 5560 [MHz]에서 하모닉 특성을 보이는 것과 달리 본 논문에서 제시한 필터는 3640 [MHz]에서 37.3 [dB]의 삽입 손실을 가지며 6000 [MHz]까지 하모닉이 억제된 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하모닉 억제를 위해 많은 응용이 되고 있는 SIR의 특성을 분석하여 헤어핀 필터에 적용하였다. 전형적인 반파장 공진기가 공진주파수의 배수에서 하모닉을 가지는 것에 비해, SIR은 각 부분의 임피던스 비가 증가함에 따라 하모닉 주파수가 증가하고, 각 부분의 전기적 길이 변화에 따라서도 하모닉

주파수가 변화함을 나타내었다. 1차 하모닉은 경우에는 높은 임피던스를 갖는 부분이 낮은 임피던스를 갖는 부분의 2배가 되는 전기적 길이를 가질 때 가장 큰 주파수에서 나타났다.

이러한 SIR의 특성을 이용하여 토양 수분 함유량 검출을 위한 마이크로파 라디오미터의 주파수 선택 및 우수한 수신감도를 위한 하모닉 억제의 헤어핀 필터를 설계 및 제작하였다. 필터의 하모닉을 효율적으로 억제하기 위해 5단의 헤어핀 필터에는 서로 다른 임피던스 비를 갖는 3종류의 SIR이 사용되었고, 제작된 필터는 1390 [MHz]의 중심주파수의 5배 주파수까지 하모닉을 35 [dB] 아래로 억제하였다.

본 논문에서 제시한 하모닉 억압의 헤어핀 필터는 L-band용 마이크로파 라디오미터에 응용될 것이며, 논문에서 제시한 SIR 특성을 이용하여 하모닉 억제가 요구되는 다양한 마이크로파 시스템에 응용될 수 있다.

References

[1] H.-M. Son and H.-K. Park, "Design of a Microwave Radiometer Receiver for Soil Moisture Monitoring," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 2, Feb. 2014, pp. 173-180.

[2] Y. A. Liou and A. W. England, "A land surface process/radiobrightness model with coupled heat and moisture transport in soil," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* vol. 36, no. 1, Jan. 1998, pp. 273-286.

[3] E. Hong, "Soil moisture monitoring and recession characteristics analysis in conifer forest," *The Korea Society of Agricultural Engineers*, vol. 53, no. 4, 2011, pp. 1-9.

[4] T. J. Jackson, D. M. Le Vine, A. J. Griffis, D. C. Goodrich, T. J. Schmugge, C. T. Swift, and P. E. O'Neill, "Soil moisture and rainfall estimation over a semiarid environment with the ESTAR microwave radiometer," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* vol. 31, no. 4, July 1993,

pp. 836-841.

[5] K. Kim and N. Lee, "Measurement of Soil moisture content Using RF Impedance in the Range of 1 th 30MHz," *The Korea Society of Agricultural Engineers*, vol. 40, no. 14, 1998, pp. 79-88.

[6] J. Hong and M. J. Lancaster, *Microwave Filters for RF/Microwave Applications*, New York : John Wiley & Sons, 2001.

[7] H. Nam, T.-S. Yun, M.-G. Lee, J.-C. Lee, and U.-S. Hong, "A Stepped Impedance Resonator Bandpass Filter with Superior Cut-off Response for ITS Application," *J. of Korean Institute of Transport Systems*, vol. 4, no. 3, Dec. 2005, pp. 73-78.

[8] S.-M. Kim and J.-H. Song, "Miniaturized UWB BPF design that is applicable to Ultrafast Wireless Communication Systems," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 6, Dec. 2010, pp. 620-624.

[9] Y.-W. Park, "Design and Fabrication of Diplexer using Lumped Elements," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 1, Jan. 2012, pp. 9-14.

[10] M. Makimoto and R. Yanashita, *Microwave Resonator and Filters for Wireless Communication*, Berlin : Springer, 2001.

저자 소개

윤태순(Tae-Soon Yun)



2000년 국민대학교 전자공학과(공학사)

2002년 광운대학교 전파공학과(공학석사)

2006년 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2007년 10월~2008년 9월 The SUNY at Buffalo Post Doc.

2008년 10월~2010년 2월: 광운대 BK사업단 연구교수

2010년 3월~현재: 호남대학교 이동통신공학과 조교수

※ 관심분야 : 마이크로파 소자, 무선전력전송, CRLH 전성 선로