
저위상 변화 특성을 갖는 π -형 가변 감쇠기

박응희* · 안길초**

A π -type Variable Attenuator with Low Phase Shift

Unghee Park* · Gilcho Ahn**

요 약

본 논문에서는 한 개 PIN 다이오드와 두 개 저항을 이용하여 π -형 고정 감쇠기 구조 형태의 전압 제어 방식의 가변 감쇠기를 설계 및 제작하였다. 제안된 가변 감쇠기는 저항과 외부 인가 전압에 따른 PIN 다이오드의 저항 값의 변화에 따라 원하는 일정 감쇠 범위에서 동작하며, 작은 크기의 회로로 낮은 입력 VSWR 특성과 혼변조 발생 특성을 갖는다. 또한, 제안된 가변 감쇠기에서는 PIN 다이오드에 추가적인 개방 선로를 연결하여 감쇠량의 변화에 따른 위상 변화량을 적게 하였다. 추가적인 개방 선로의 길이는 Deloach 방법과 초고주파 회로 특성을 이용하여 계산하였다. 제안된 가변 감쇠기의 특성을 살펴보기 위하여 2110~2170 MHz 주파수 대역에서 마이크로스트립 기판을 이용하여 가변 감쇠기를 제작하였다. 제작된 감쇠기는 0~2.7 V의 전압 범위에서 4 dB의 감쇠량의 변화를 가졌으며, 이때 위상 변화량은 2도 이내, 반사계수(S11)는 -20 dB 이하의 값을 가졌다.

ABSTRACT

A voltage controlled attenuator using a PIN diode and two resistors of the π -type fixed attenuator is described in this paper. The proposed variable attenuator operating for a fixed attenuation range has a good input VSWR and a low intermodulation signal. For the low phase shift, a PIN diode is connected with open stub for the purpose of phase compensation. The stub for phase compensation is calculated by the Deloach method and the related circuit theory. This attenuator is easily fabricated on the microstrip and can be normally used in fine control circuits within small attenuation range. The fabricated attenuator for 2110~2170 MHz frequency band has about 4 dB of an attenuation range, 2° of phase variance, and -20 dB of S11 according to the input voltage from 0 to 2.7 V.

키워드

감쇠기, 가변 감쇠기, PIN 다이오드 감쇠기

* 강원대학교 삼척캠퍼스 전자공학과

** 서강대학교 전자공학과

접수일자 : 2009. 04. 28

심사완료일자 : 2009. 05. 22

I. 서 론

감쇠기는 큰 범위로 고정형 감쇠기와 가변형 감쇠기로 분리된다. 고정형 감쇠기는 입력되는 신호의 세기를 원하는 크기로 조정하는 기능과 회로 보호 기능으로 RF 회로에서 자주 사용하며, 가변형 감쇠기는 일정 간격으로 감쇠량이 정해진 디스크리트(discrete) 형태와 연속적으로 값이 변하는 아날로그 형태로 구분할 수 있다. 디스크리트 형태의 가변 감쇠기는 RF 회로 실험에서 입력전력을 변화시키는 경우에 자주 이용하며, 아날로그 형태의 가변 감쇠기는 자동 이득 조정 시스템 또는 대전력 증폭기에서 혼변조 신호를 감쇠시키는 선형화에 주로 이용된다. 본 논문에서 설계, 제작한 가변 감쇠기는 아날로그 형태의 가변 감쇠기이다.

아날로그 형태의 가변 감쇠기는 투과형과 반사형으로 구분이 가능한데, 투과형은 일반적으로 가변 감쇠기에서 감쇠량의 변화는 경우에 많은 위상변화량이 발생하며 입출력 반사특성이 좋지 않다. 투과형의 이러한 특성을 개선하기 위하여 최근 Stewart Walker가 제시한 투과형 가변 감쇠기가 있으나 반사형 보다는 감쇠량에 따른 위상변화와 입출력 반사계수가 좋지 않다.[1] 반사형 가변 감쇠기는 감쇠량에 따른 위상 변화량이 작으나 3 dB 90° 하이브리드 커플러를 사용하게 되므로 가변 감쇠기의 크기가 커지는 단점이 있다.[2]

본 논문에서는 일정량의 감쇠 변화 범위에서 감쇠량의 변화에 대하여 작은 위상 변화량이 가지며 입출력 반사특성이 좋은 투과형 형태의 π -형 가변 감쇠기를 설계 및 제작하였다.

II. 본 론

1. π -형 구조의 가변 감쇠기 설계

그림 1에서와 같은 세 개의 저항을 이용한 π -형 구조의 고정 감쇠기는 넓은 주파수 대역에서 좋은 입력 반사특성과 출력 반사 특성을 가지고 안정적으로 동작하여 초고주파 회로에서 자주 사용된다. 그림 1의 고정 감쇠기는 선로의 임피던스를 Z_s 라 하면, 원하는 감쇠량에 따른 저항 값 R_s 와 R_p 는 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.[3]

$$R_s = Z_s \frac{10^{A(\text{dB})/10} - 1}{2 * 10^{A(\text{dB})/20}} \tag{1}$$

$$R_p = Z_s \frac{10^{A(\text{dB})/20} + 1}{10^{A(\text{dB})/20} - 1} \tag{2}$$

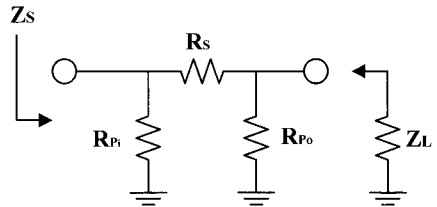


그림 1. π -형 구조의 고정 감쇠기
Fig. 1 A π -type fixed attenuator

제안된 아날로그 가변 감쇠기는 그림 2와 같이 고정형 가변 감쇠기 구조에서 출력부에 존재하는 R_s 를 PIN 다이오드로 대체하여 구현하였다. PIN 다이오드는 외부에서 인가되는 전압에 의하여 저항값이 변하게 된다. 그림 2의 R_s , R_p 값과 PIN 다이오드의 저항 범위에 의해 가변 감쇠기의 기본 감쇠량과 감쇠 범위에 결정된다. [표 1]은 R_s 가 33 Ω , R_p 가 220 Ω 인 일 경우에, 다이오드의 저항 값이 0 Ω 에서 10000 Ω 으로 변화하는 것에 대한 제안된 가변 감쇠기의 입출력 반사 특성과 감쇠 특성을 살펴본 것이다. 다이오드의 임피던스가 10000 Ω 일 때에는 가변 감쇠기의 감쇠량이 -3.7 dB이고, 5 Ω 일 때에는 가변 감쇠기의 감쇠량이 -20.5 dB로 약 17 dB의 변화가 가능함을 볼 수 있다. 이는 외부 전압에 따른 다이오드의 저항 특성의 변화가 제안된 회로의 감쇠 범위를 결정하게 됨을 알 수 있다.

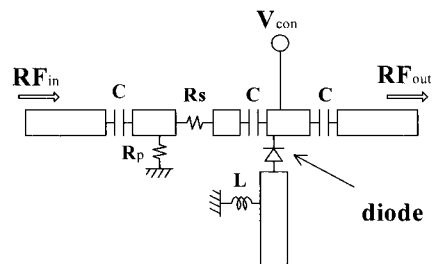


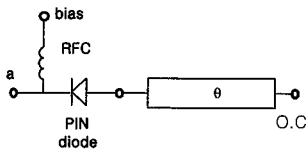
그림 2. 제안된 π -형 가변 감쇠기
Fig. 2 The proposed π -type variable attenuator

표 1. 다이오드의 저항값에 따른 제안된 가변 감쇠기의 감쇠 특성

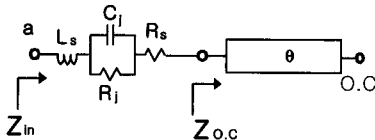
Table. 1 The characteristics of the proposed attenuator due to the resistor value of a diode

($R_s=33 \Omega$, $R_p=220 \Omega$)

다이오드의 저항값 [Ω]	S_{11} [dB]	S_{21} [dB]	S_{22} [dB]
0	-11.3	-193.1	-0.01
5	-13.2	-20.5	-1.7
10	-15.0	-15.6	-3.1
15	-16.6	-13.1	-4.4
20	-18.1	-11.6	-5.7
25	-19.6	-10.5	-6.8
30	-21.1	-9.6	-7.9
35	-22.7	-9.0	-9.0
40	-24.2	-8.5	-10.0
50	-27.5	-7.7	-12.0
70	-36.5	-6.7	-15.7
100	-40.0	-5.9	-21.8
500	-22.7	-4.1	-18.0
1000	-21.6	-3.9	-16.0
5000	-20.8	-3.7	-14.6
10000	-20.7	-3.7	-14.5



(a) 다이오드 회로



(b) 등가회로

그림 3. 다이오드의 등가 회로
Fig. 3 The equivalent circuit of a diode

그림 3과 같이 다이오드는 저항, 인덕터, 커패시터의 값으로 등가 회로를 나타낼 수 있다. 외부 전압에 의해 PIN 다이오드 등가회로의 내재 저항 R_j 가 변함에 따라 위상 특성이 바뀌게 되는데, 이는 PIN 다이오드의 기생 성분인 C_j, L_s 에 의한 것이라 볼 수 있다. 또한, 인덕터와

커패시터는 주파수의 함수이므로, 주파수에 따라 가변 감쇠기에서의 위상 변화 특성이 변하게 된다. 가변 감쇠기에서는 위상 변화없이 감쇠량의 변화만을 원하는 것이므로, 감쇠기에서의 주파수와 감쇠량의 변화에 따른 위상 특성의 변화는 적은 것이 좋은 감쇠기라 할 수 있다. 본 논문에서는 PIN 다이오드를 이용하여 가변 감쇠기의 감쇠량을 조절하므로, PIN 다이오드의 등가 회로 값인 L_s, C_j, R_j, R_s 를 추출한 뒤 개방 스테르브를 이용하여 인덕터와 커패시터의 값을 최소화 시키게 되면 위상 변화량을 줄일 수 있다.[4] 그림 3(b)과 같이 다이오드 회로에 개방 스테르브가 연결되어 있을 경우의 선로에서의 임피던스 특성을 수식적으로 살펴보면 다음과 같다.[5] 개방 스테르브의 입력 임피던스는 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 식(3)을 그림 3(b)의 전체 입력 임피던스 Z_{in} 에 적용하면 식(4)로 표현된다. 초고주파 회로 입력부에 존재하는 반사 계수는 식(5)와 같이 표현되며, 여기서 다이오드와 개방 스테르브가 연결된 회로의 위상 특성은 식(6)으로 정리할 수 있다.

$$Z_{o.c} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \theta}{Z_0 + jZ_L \tan \theta} \quad (\Leftarrow Z_L = \infty)$$

$$= \frac{Z_0}{j \tan \theta} \tag{3}$$

$$Z_{in} = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{\frac{1}{R_j} + j\omega C_j} + Z_{o.c}$$

$$= R_s + \frac{R_j}{1 + j\omega R_j C_j} + j(\omega L_s - \frac{Z_0}{\tan \theta}) \tag{4}$$

$$\Gamma_{in} = |\Gamma_{in}| e^{j\phi} = (Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0) \tag{5}$$

$$\phi = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{\omega L_s - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + \omega^2 R_j^2 C_j^2} - \frac{Z_0}{\tan \theta}}{R_s - Z_0 + \frac{R_j}{1 + \omega^2 R_j^2 C_j^2}} \right]$$

$$- \text{Tan}^{-1} \left[\frac{\omega L_s - \frac{\omega R_j^2 C_j}{1 + \omega^2 R_j^2 C_j^2} - \frac{Z_0}{\tan \theta}}{R_s + Z_0 + \frac{R_j}{1 + \omega^2 R_j^2 C_j^2}} \right] \tag{6}$$

식(6)에서 R_j 가 50 Ω 일 경우에 위상을 $\phi_{R_j=50}$ 이라 표현하면 $R_j=Max$ 일 경우의 위상을 $\phi_{R_j=Max}$ 라 표현할 수 있다. 여기서, ϕ 가 θ 의 함수이므로 θ 값을 조정하여

$\varphi_{R_j=0} = \varphi_{R_j=Max}$ 가 되도록 한다면 저항의 변화에 대해 위상 변화가 없는 저위상 변화 가변 감쇠기를 구현할 수 있게 된다.

2. 실험 결과

그림 4는 Taconic사의 TLC-32($\epsilon_r=3.2$) 기판을 이용하여 본 논문에서 제안한 저위상 변화 감쇠기를 2110 ~ 2140 MHz 주파수 대역에서 마이크로스트립 형태로 제작한 모습이다. 제작된 회로에서 R_s 는 33 Ω , R_p 는 220 Ω , 다이오드는 Hewlett Packard사의 HSMP-4810 PIN 다이오드를 사용하였다. HSMP-4810 PIN 다이오드의 등가회로에 대한 소자 값은 DeLoach 방법을 이용하여 추출하였는데, 추출된 파라미터 값은 $C_j=0.2034$ pF, $L_s=1.748$ nH, $R_s=3.342$ Ω 이었다.[5] 추출된 등가 소자값에서 R_j 의 값의 변화에 대해 적은 위상 변화량 특성을 가지기 위한 개방 스테르브의 전기적 길이는 73.1 $^\circ$ 로 계산되며, 이에 대한 본 제작 기판에서의 구현된 선로의 길이는 18.3 mm, 폭은 1.81 mm이었다.

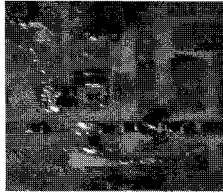


그림 4. 제작된 π -형 가변 감쇠기 회로 (크기: 25 mm x 13 mm)

Fig. 4 The circuit of the fabricated π -type variable attenuator (Size: 25 mm x 13 mm)

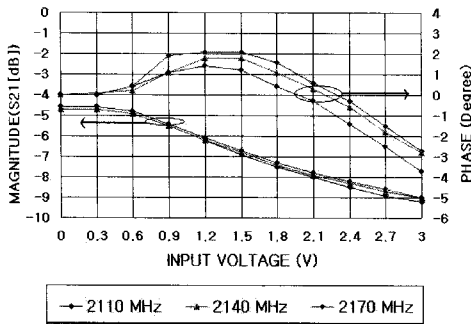


그림 5. 제작된 가변 감쇠기의 주파수 특성

Fig. 5 The frequency characteristics of the fabricated variable attenuator

표 2. 제작된 가변 감쇠기의 특성

Table. 2 Characteristics of the fabricated variable attenuator ($R_s=33$ Ω , $R_p=220$ Ω , Freq.=2140 MHz)

인가 전압 [V]	S ₁₁ [dB]	S ₂₁ [dB]	S ₂₁ [DEG]	S ₂₂ [dB]
0.0	-24.1	-4.7	-141.0	-16.5
0.3	-24.1	-4.7	-141.0	-16.5
0.6	-25.4	-4.9	-140.8	-17.0
0.9	-31.3	-5.5	-139.9	-18.3
1.2	-57.7	-6.2	-139.5	-18.1
1.5	-33.9	-6.8	-139.4	-16.0
1.8	-28.4	-7.4	-140.1	-14.6
2.1	-25.4	-7.9	-140.7	-12.9
2.4	-23.6	-8.3	-141.5	-11.3
2.7	-22.2	-8.7	-142.5	-9.8
3.0	-21.2	-9.0	-143.4	-8.5
4.0	-19.1	-9.8	-147.3	-7.4
5.0	-18.0	-10.3	-151.4	-6.5

[표 2]는 제작된 가변 감쇠기에 대해 외부 인가 전압을 0~5 V까지 변화시켰을 때, 감쇠기의 동작 특성을 측정된 것이다. 측정된 가변 감쇠량의 값으로 보아 HSMP-4810 PIN 다이오드의 저항값은 외부 인가 전압을 0~5 V에 대하여 약 25 Ω 부터 400 Ω 정도의 값으로 변함을 알 수 있다. 인가 전압의 범위가 0~2.7 V인 경우를 살펴보면, 가변 감쇠기의 세기변화 4 dB, 위상변화 1.6 $^\circ$, 입력 반사 계수 -20 dB 이하, 출력 반사 계수 약 -10 dB 이하의 값을 가짐을 볼 수 있다. 또한, 인가 전압의 변화량과 가변 감쇠기의 감쇠량의 변화가 일정함을 볼 수 있다. 인가 전압의 일정 전압 범위에서 급격하게 가변 감쇠기의 감쇠량의 변화가 발생한다는 것은 다이오드 특성의 급격한 변화를 의미하는 것으로, 이는 가변 감쇠기 회로에서 높은 혼변조 신호를 발생하게 만든다. 본 논문에서 설계한 투과형 가변 감쇠기는 측정 결과 입력전력 5 dBm에서 65 dBc 이상의 우수한 선형성을 가졌다.

III. 결 론

본 논문에서는 일정 전력 범위에서 안정적으로 동작하는 새로운 형태의 투과형 저위상 변화 가변 감쇠기를 제안하였다. 제안된 가변 감쇠기의 기본 구조는 π -형 고정 감쇠기 형태로, 출력 단자에 있는 저항을 PIN 다이오드를 이용하여 구현하였다. PIN 다이오드는 외부 전압

에 의해 내부 저항 값이 변하는데, 이를 이용하면 제안된 가변 감쇠기에서의 원하는 기본 감쇠량과 감쇠 범위를 설정할 수 있다. 또한, 제안된 가변 감쇠기에서 감쇠량의 변화에 대한 위상 변화량의 변화를 최소화하기 PIN 다이오드에 개방 선로를 연결하였다. 개방 선로는 다이오드의 등가 특성에 대하여 위상 변화량 특성을 나타내는 허수 부분의 값을 상쇄시키기 위위한 것이다.

제안된 회로의 동작 특성을 살펴보기 위하여 Hewlett Packard사의 HSMP-4810 PIN 다이오드를 사용하여 2110~2140 MHz에서 동작하는 가변 감쇠기를 제작하였다. HSMP-4810 PIN 다이오드의 등가 회로에서 허수 부분의 변화량을 최소화시키는 개방 스테브의 전기적 길이는 73.1° 이었으며, Taconic사의 TLC-32 마이크로스트립 기판에서 기판을 초고주파 선로 특성을 이용하여 18.3 mm 길이의 선로로 구현하였다. 제작된 가변 감쇠기는 인가 전압의 범위 0~2.7 V에서 세기변화 4 dB, 위상변화 1.6° , 입력 반사 계수 -20 dB 이하, 출력 반사 계수 약 -10 dB 이하의 매우 우수한 특성을 가짐을 볼 수 있었다.

참고문헌

- [1] Stewart walker, "A low phase shift attenuator ", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol.42 no. 2, pp 182~185, Feb. 1994
- [2] Min Soo Kang, Won Tae Kang, Ik Soo Chang, "Design of reflection type Low Phase Shift Attenuator", KIEE, Vol. 34D 9, pp. 1-6, Sep. 1997
- [3] Van Valkenburg, REFERENCE DATA FOR ENGINEERS: RADIO, ELECTRONICS, COMPUTER & COMMUNICATIONS, EIGHT EDITION, SAMS Publishing, 1992
- [4] B. C. Deloach, "A New technique to characterize diodes and an 800-Gc cutoff frequency varactor at zero volt bias", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol.12, pp. 15~20, 1964
- [5] Inder Bahl, Prakash Bhartia, MICROWAVE SOLID STATE CIRCUIT DESIGN, Wiley-Interscience publication, pp. 373-422, 1988

저자소개



박웅희(Unghee Park)

2000년 서강대학교 전자공학과
공학박사

2000.3~2006.8 한국전자통신연구원
안테나기술팀 선임연구원

2006.8~현재 강원대학교 삼척캠퍼스 전자공학과
조교수

※관심분야: 마이크로파 및 안테나 설계



안길초(Gil Cho Ahn)

1996.2~2001.11 삼성전자
선임연구원

2005년 오레건주립대학
전자공학과 공학박사

2005.10~2008.2 Broadcom Corp. Senior Engineer

2008.3~현재 서강대학교 전자공학과 조교수

※관심분야: 부품 소자 설계, 집적 회로 설계