

UHF대역 3-dB 커플러(Coupler)를 이용한 가변 감쇄기(Attenuator)에 대한 연구

Study on the UHF-band Variable Attenuator Using the 3-dB Coupler

박 경태

Kyung-Tae Park

요 약

UHF 대역에서 동작하는 3dB-커플러(Coupler)를 이용한 가변 감쇄기(Variable Attenuator)를 설계하고 제작한다. 가변 감쇄기를 구현하기 위하여 90°, 3dB-커플러를 사용한다. 커플러를 이용한 가변 감쇄기의 동작 원리를 소개하고, 이에 대한 수학적 해석(Mathematical Analysis)을 통하여 가변 감쇄기 제작에 사용할 3dB 커플러를 시뮬레이션(Simulation) 등을 통하여 설계한다. PIN 다이오드(Diode)를 이용한 가변저항(Variable Resistor)를 시뮬레이션을 통하여 설계하고, 직접 제작하여 네트워크 분석기(Network Analyzer)를 통하여 측정하여 비교 분석한 결과 최저 삽입손실(Insertion Loss) -10dB, 연속적인 가변 최대 감쇄(Attenuation) 10dB를 얻을 수 있다.

ABSTRACT

A design and implementation method for the UHF-band(800MHz) variable attenuator using the 3dB coupler is proposed. The 90 degree, 3-dB Coupler is used for the variable attenuator. The principal theory for the 3-dB coupler is introduced. The 3-dB Coupler is designed by the mathematical analysis and a computer simulation tool. A PIN diode is used for the variable resistor at UHF-band. The variable attenuator using the 3-dB coupler and the PIN diode is designed and implemented. The measured results for the variable attenuator by a network analyzer show that the insertion loss is below -10dB, and the continuous variable attenuation range is about 10dB.

Keywords : Variable Attenuator, 3-dB Coupler, PIN Diode

I. 서론

무선 가변 감쇄기 시스템은 현재 이동통신 분야를 비롯한 여러 응용분야에 활용되고 있으며, 이러한 무선 RF 시스템의 성능을 보다 향상시키기 위하여 정확한 신호레벨(Signal Strength Level)의 조정이 성능 향상에 필요하다. 현재 이동전화 시스템(CDMA)의 선형 전력증폭기 등에서 가변감쇄기를 사용하고 있으며, UHF 대역의 가변감쇄기에 대한 연구의 필요성이 증가되고 있다.

[2]

감쇄기는 용도에 따라 고정용(Fixed)과 가변용(Variable)으로 나눌수 있고, 입력 신호의 크기에 따라 고 전력용(High Power)과 저 전력용(Low Power)으로 나뉜다. 그 중 가변 감쇄기의 경우 보통 외부의 입력에 의해 그 가변 정도가 불연속적으로 결정되는 것과 연속적으로 결정되는 감쇄기로 나눌 수 있다.

일반적인 가변 감쇄기는 동작 주파수별로 감쇄 정도(Attenuation Level)에 따라 그 감쇄기의 삽입 손실(Insertion Loss)에 많은 변동이 발생한다. 이러한 문제

점을 해결하기 위하여 초고주파용 3dB-커플러를 채용하여 동작 주파수별 감쇄 정도에 따른 삽입 손실을 일정하게 하여야 정확한 신호 레벨의 측정이 가능하게 된다.

여기서는 800MHz 대역에서 동작하는 3dB-커플러를 이용한 가변 감쇄기(Variable Attenuator)를 구현하는 방법을 제안한다. 가변 감쇄기를 구현하기 위하여 90°, 3dB-커플러를 이용한다. 커플러를 이용한 가변 감쇄기의 동작원리를 소개하고, 이에 대한 수학적 해석(Mathematical Analysis)을 통하여 가변 감쇄기 제작에 사용할 3dB 커플러를 시뮬레이션 등을 통하여 설계한다. 다이오드(Diode)를 이용한 가변저항(Variable Resistor)를 시뮬레이션(Simulation)을 통하여 설계하고, 직접 제작하여 네트워크 분석기(Network Analyzer)를 통하여 측정하여 비교 분석하였다.[7]

II. 본론

가변 감쇄기를 구현하기 위하여 90°, 3dB-커플러를 이용한다. 커플러를 이용한 가변 감쇄기의 동작원리 및 수학적 해석을 통하여 3dB 커플러를 시뮬레이션 등을 통하여 설계한다. 다이오드를 가변저항 설계에 이용하여 제작 및 측정하였다.[3,4,5,6]

1. 가변 감쇄기의 동작 원리

가변 감쇄기는 90°, 3dB-커플러부와 가변 저항부로 구성되며, 그 동작 원리는 다음과 같다.

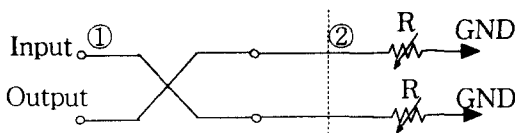


그림1 가변 감쇄기 구조

입력단(Input Port)에 "1"의 입력 신호를 가해주면 90도 3dB-커플러에 의하여 ②와 ③단자의 신호(Signal)는 각각 $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ$, $\frac{1}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ$ 가 되어 진폭과 위상이 각각 -3dB, 90도 변동되며, 가변 저항 R에 의해 반사된 ②와③ 단자의 신호에 의해 ①,④ 단자에 수신된 신호는 각각

$$\Gamma \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \angle 0^\circ + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \angle -180^\circ \right\} \text{와}$$

$$\Gamma \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \angle -90^\circ + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \angle -90^\circ \right\}$$

즉, ①번 단자에는 0, ④번 단자에는 $\Gamma \angle -90^\circ$ 이 됨을 알 수 있다.

결국 반사계수(Γ)는 가변저항 R에 의해 결정되어 $\Gamma = \frac{R-50}{R+50}$ 가 되며, 감쇄도(Attenuation Level)는 $20 \cdot \log |\Gamma|$ (dB)가 됨을 알 수 있다.

2. 가변 감쇄기의 수학적 해석

그림1의 90°, 3-dB 커플러의 S-파라미터 행렬(Parameter Matrix)는

$$(b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4)^T = S_{4 \times 4} (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4)^T$$

이 되며, 가변저항의 S-파라미터 행렬은 $(a_3 \ a_4)^T = S_{2 \times 2} (b_3 \ b_4)^T$ 이 된다.

여기서,

$$S_{4 \times 4} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -j \\ 0 & 0 & -j & 1 \\ 1 & -j & 0 & 0 \\ -j & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \Gamma_3 & 0 \\ 0 & \Gamma_4 \end{pmatrix}$$

위 수식을 풀어 S_{11} , S_{21} 을 구해보면,

$$S_{11} = \frac{1}{2} (\Gamma_4 - \Gamma_3)$$

$$S_{21} = -\frac{j}{2} (\Gamma_3 + \Gamma_4) \text{ 가 된다.}$$

여기서, $\Gamma_3 = \Gamma_4 = \Gamma$ 이므로

$$S_{11} = 0 \quad (\text{단, } \Gamma = \frac{R-50}{R+50})$$

$$S_{21} = -j \cdot \Gamma \text{ 이 된다.}$$

그러므로 감쇄도 A(dB)는 $A(\text{dB}) = 10 \cdot \log (|S_{21}|^2)$ 임을 알 수 있다.

3. 3-dB 커플러(Coupler)의 설계

일반적인 커플러의 구조 및 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

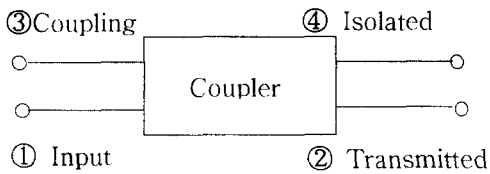


그림 3. 일반적인 커플러

일반적인 커플러는 다음의 특성(Characteristics)으로 정의된다.

- ▶ Coupling Ratio = $10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_3} \right)$
- ▶ Directivity Ratio = $10 \cdot \log \left(\frac{P_3}{P_4} \right)$
- ▶ Isolation Ratio = $10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_4} \right)$

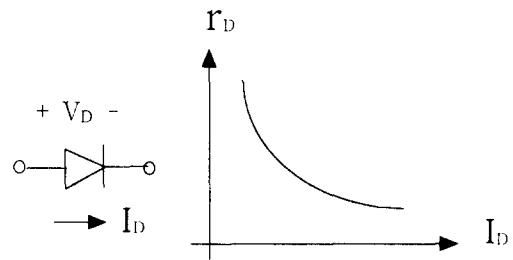
커플러의 커플링 요소(Coupling Factor) C가 주어지면, 전체적인 커플러의 특성 임피던스 Z_0 를 가정한 상태에서 Z_{oo} , Z_{oe} (Odd, Even) 임피던스의 커플러의 기하학적인 모델로부터 원하는 특성을 가지는 커플러의 구현이 가능하다.

여기서는 평행선 커플러(Parallel Line Coupler)를 시뮬레이션을 통해 설계 하였다.

4. 전기적 가변 저항(Electrically Variable Resistor)의 설계

일반적인 가변저항은 기계적인(Mechanical) 조작에 의해 조정 및 동작하지만, 전기적인 신호(Electrical Signal)에 의해 작동하는 가변 저항의 구현을 위해 PIN 다이오드(Diode)를 사용하였다.

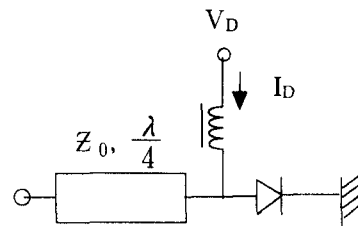
그림4-1에서와 같이 다이오드의 저항값(Resistance)이 다이오드에 흐르는 순방향 전류량(Forward Diode Current)에 의해 결정됨을 알 수 있다.



(a) Diode (b) 다이오드 저항

그림 4-1. 다이오드를 이용한 가변 저항

그리고 이러한 다이오드 가변 저항(Diode Variable Resistor)을 초크 인덕터(Choke Inductor)와 90도 위상 천이(Phase Shift) 마이크로스트립(Micro-strip) 라인을 사용하여 그림4-2와 같이 구현할 수 있다.



(a) 다이오드 가변 저항



(b) 동등 회로

그림 4-2. 다이오드 가변 저항의 구조

실제 사용되는 다이오드를 사용한 가변 저항 영역(Diode Variable Resistance Area)을 90도 스트립라인(Striplin) 임피던스(Impedance) 변환기(Transformer)를 이용하여 감쇄 영역(Attenuation Range)을 조정 및 결정 할 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

① 3-dB 커플러

3-dB 커플러의 시뮬레이션을 위하여 마이크로스트립 라인을 사용하였으며, 입체적인 마이크로스트립 라인은 그림5-1과 같은 구조를 선택하였고, 사용된 마이크로스트립 라인의 주요 파라미터 값은 다음과 같다.

$\epsilon_r = 2.2$ $f_0 = 880\text{MHz}$
 $L = \lambda/4 = 57.42$ $W = 1.18 \text{ mm}$
 $S = 0.25 \text{ mm}$ $B = 2.75 \text{ mm}$

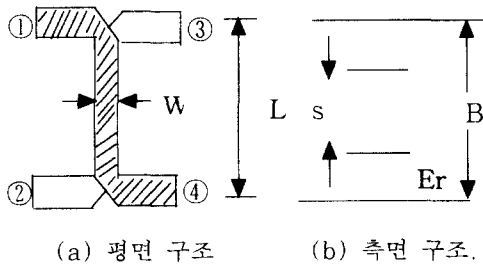


그림 5-1. 평행선 커플러(Parallel Line Coupler)

초고주파 대역의 시뮬레이션 전용 툴(Tool)인 멘토 그래픽사의 EESOF-Libra를 사용하였으며, 시뮬레이션 중심주파수는 800MHz를, 대역폭 700MHz 범위에서 커플러의 통과비(S41) 및 커플링비(S21)의 결과를 예측하였다. 그 결과가 그림 5-2에 나타나있다. 이 결과로부터 우리가 원하는 3-dB 커플러의 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

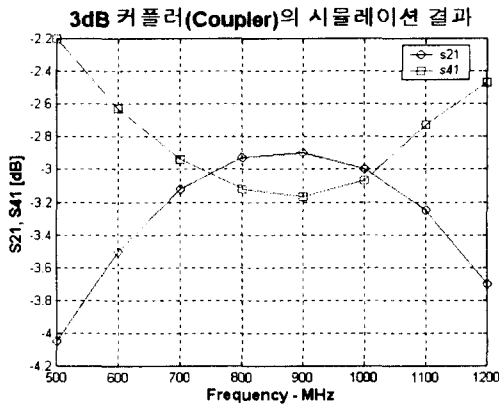


그림5-2. 3-dB 커플러(Coupler)의 시뮬레이션(Simulation) 결과

② 가변 감쇄기

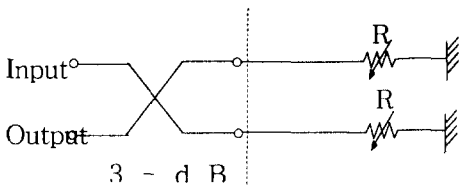


그림 5-3 가변 감쇄기 시뮬레이션 회로.

앞에서 설계한 3-dB 커플러 결과에 임의의 가상 가변 저항을 첨가한 회로를 그림5-3와 같이 설계하였다. 여기에 사용된 두 개의 가상 가변저항 값을 동시에 다음 표5와 같이 변화시키며 커플러의 삽입손실(Insertion Loss) S11과 커플링비(Coupling Ratio) S21에 대한 S-파라미터에 대하여 500 ~ 1200MHz 주파수 대역에서 시뮬레이션한 결과를 그림 5-4에 나타내었다. 이러한 결과로부터 동일한 크기의 두 개의 가변저항을 변화시키면 충분히 작은 삽입손실을 가지며, 일정한 가변 감쇄 특성을 가지는 감쇄기를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

▶ 반사계수 $\Gamma = \frac{R-50}{R+50}$

▶ 감쇄도(Attenuation) = $10 \cdot \log |\Gamma|^2$ (dB).

표5. 감쇄도(dB)와 가변저항 R(Ω)

Attenuation(dB)	R(Ω)
3	8.5
6	16.5
9	24.0

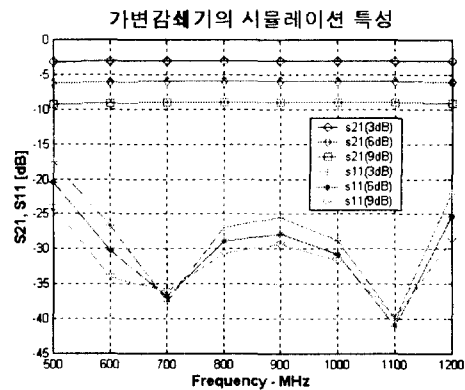


그림5-4. 가변 감쇄기(Variable Attenuator)의 특성

6. 실험 결과

실험을 통하여 제작한 것은 3-dB 커플러부, 가변저항부 및 전원공급회로를 포함한 가변감쇄기이다. 90° 위상 천이 3-dB 커플러는 마이크로스트립 라인의 일종인 평행선 커플러(Parallel Line Coupler)를 사용하여 구현하였으며, 가변 저항부는 핀 다이오드(Pin Diode) 와 전원(Bias) 공급회로를, 최종적으로 임피던스 변환기

(Impedance Transformer)를 사용하여 감쇄의 결과를 얻었다.

① 90°, 3-dB 평행선 커플러 구현

아래 그림6-1과 같이 90°, 3-dB 평행선 커플러를 구현 하였다. 여기에 사용된 마이크로스트립라인에 유전체(Dielectric Material)가 삽입된 원통형 커플러를 접합하여 제작하였다.

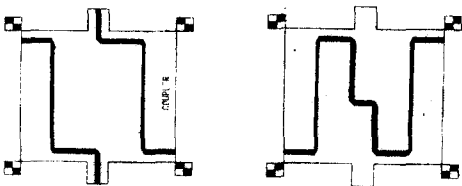


그림 6-1. 90도 3-dB 평행선 커플러(Parallel Line Coupler)

② 다이오드를 이용한 저항부의 구현

다이오드를 이용한 저항부는 그림6-2. 과 같이 같이 구현하였다.

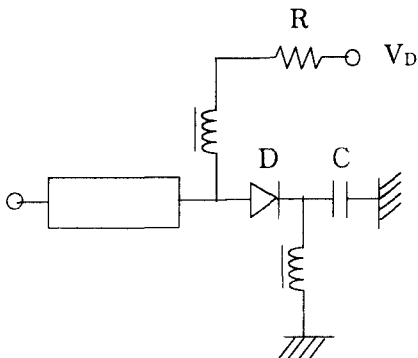


그림 6-2. 다이오드를 이용한 저항부.

여기서 사용된 전류 조절용 저항 R은 다이오드에 흐르는 전류 I_D 를 만들기 위해 사용하였고, 다이오드 커패시터 C는 다이오드 내부에 존재하는 인덕턴스(Inductance) 성분을 보상하기 위해 연결하였다. 실제 사용된 저항R과 커패시터C의 값은 아래와 같다.

- R = 10 K Ω
- C = 8.2 PF
- D : Pin Diode

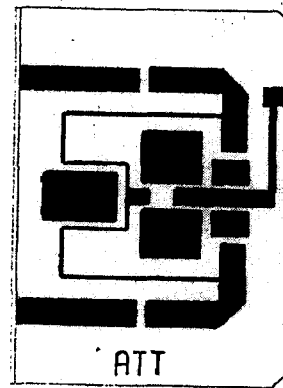


그림6-3. 다이오드(Diode) 저항부

③ 다이오드를 사용한 가변 감쇄기 회로도

앞에서 제작한 90° 3-dB 커플러와 다이오드를 이용한 저항부를 서로 대칭이 되게 연결하여 가변 감쇄가 일어나도록 그림6-4과 같이 구현하였다.

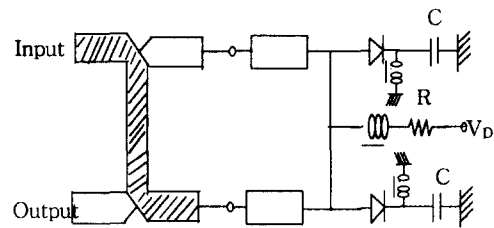


그림6-4 전체적인 가변 감쇄기 구조

④ 측정 결과

그림6-4와 같이 제작한 회로를 네트워크 분석기(Network Analyser)를 표2의 환경하에서 측정하였다. 그림6-5의 측정 결과를 표3에 정리하였다. 삽입손실 S11은 전체적으로 10dB 이하의 값을 가지므로 시뮬레이션 결과(그림5-3)에 비하여 성능이 양호한 편이 아니지만, 커플링비 S21은 측정주파수 대역에서 비교적 정확한 값을 가짐을 알 수 있다.

표3. 네트워크 분석기(Network Analyzer) 측정환경

파라미터(Parameter)	값(Value)
중심주파수(Center Frequency)	880MHz
대역폭(SPAN)	100MHz
S11 기준(Reference) 및 dB/DIV	0dB, 10 dB/DIV
S21 기준(Reference) 및 dB/DIV	0dB, 1 dB/DIV

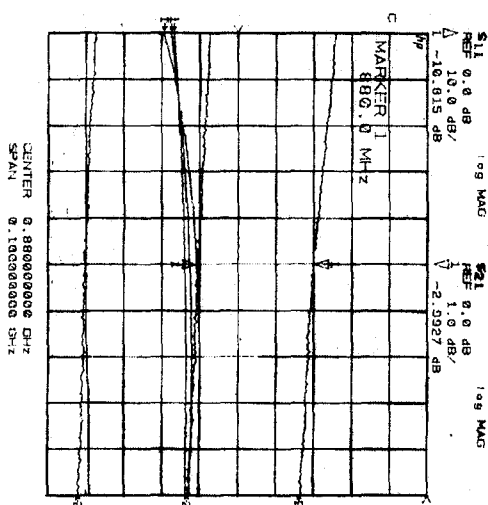


그림6-5. 3-dB 커플러(Coupler)를 사용한 가변 감쇄기의 측정 결과

III. 결론

800MHz 대역에서 동작하는 가변 감쇄기를 구현하기 위하여 3-dB 커플러부, 가변저항부 및 전류조절용 전원 공급회로 등을 설계하고 시뮬레이션하였으며, 3-dB 커플러와 고전력용 PIN 다이오드 저항부를 이용한 가변 감쇄기를 구현하였다. 설계 및 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 요약하면, 커플링비 S21은 10 dB 이내의 가변 감쇄를 측정할 수 있었으며, 삽입손실도 -10 dB 정도임을 알 수 있었다. 실험 결과 중에서 삽입손실이 시뮬레이션결과(-20dB)와 측정결과(-10dB) 사이에 차이가 발생하였으며 이러한 차이는 실험에 사용된 두 개의 PIN 다이오드를 이용한 저항부의 성능이 부품의 특성상 동일할 수 없으므로, 삽입손실이 차이가 발생함을 알 수 있다. 대칭에 사용된 부품 및 부품 자체의 특성에 의하여 가변 감쇄기의 감쇄도는 주파수에 따라 그 가변 정도가 변동되며, 제작 측정 결과가 시뮬레이션 결과에 비해 좋지 않음을 알 수 있다.

이러한 가변 감쇄기는 원하는 사용 주파수 영역의 3-dB 커플러 회로와 저항부의 가변 정도를 정함으로써 구현 할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 커플러를 이용한 가변 감쇄기는 삽입손실이 부하 저항(Load)의 변동에 대하여 최소로 할 수 있는 구조로 되어 있어 전력 반사(Power Reflection)로 인해 발생하는 여러 가지 문제를 줄일 수 있는 방법을 제시하고 있다.

향후 CDMA 이동통신을 비롯한 무선통신서비스의 주파수 대역이 점차 높아짐에 따라 3-dB 커플러의 크기가 줄어들어 이의 제작 및 구현이 용이할 것이다. CDMA대역이상의 높은 주파수에서의 정교한 가변 감쇄가 요구되는 각종 시스템에 3-dB 커플러 감쇄기를 적용할 수 있다. [1,2]

접수일자 : 2000. 12. 20 수정완료 : 2001. 3. 30

참고문헌

- [1] Dale D. Henkes, "Analysis of a Variable Attenuator Using a 3 dB Quadrature Coupler", *Applied Microwave & Wireless*, V.11 N.6, 1999 -06 -01
- [2] Sang-Gee Kang, Il-Kyoo Lee and Ki-Suk Yoo, "Analysis and Design of Feedforward Power Amplifier", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest - Volume 3, 1997*
- [3] George D. Vendelin, "Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques", John Wiley & Sons, 1990
- [4] Constantine A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989
- [5] Stephen A. Maas, "Nonlinear Microwave Circuits", Artech House, 1988
- [6] James Bao-yen Tsui, "Microwave Receivers and Related Components", Peninsula Publishing, 1985
- [7] Gonzalez, "Microwave Transistors Amplifiers Analysis and Design", Prentice Hall, 1984



박경태 (Kyung-tae Park)

正會員

1990년 한국과학기술원 과학기술대학
전기및전자과 공학사

1992년 한국과학기술원 전기및전자과
공학석사

1992년 ~ 1995년 삼성전자(주)
전임연구원

1996년~1998년 한진정보통신(주) 대리

1999년~현재 마산대학 전자정보계열 전임강사

관심분야: CDMA 이동통신공학, 초고주파공학
