

S-대역 펄스 2 kW RF 리미터

Pulse 2 kW RF Limiter at S-band

정 명 득

Myung-Deuk Jeong

요 약

RF 리미터(limiter)는 원하지 않는 신호로부터 수신단을 보호하기 위해 사용되는 소자로서, 임계값 이상의 모든 입력신호에 대해 일정한 출력을 제공한다. 다이오드를 사용하는 RF 리미터는 작은 신호는 통과시키는 반면, 어떤 임계값 이상의 신호는 감쇄시켜서 전달한다. 현대의 레이더 시스템에서 수신기를 보호하기 위해 사용되는 RF 리미터는 새로운 간섭 위협이나 복잡한 전자파 환경의 도전으로부터 극복할 수 있는 절대 필요한 역할을 수행한다. 본 논문은 고출력 RF 리미터를 구현하기 위해 PIN 다이오드와 Limit 다이오드의 조합으로 구성된 회로를 제안한다. PIN 다이오드는 스위치의 격리도(isolation) 특성을 이용하는 것과 같이 다이오드의 격리도 특성을 이용하는 개념을 적용한다. S-대역에서 200 us 펄스폭을 갖는 2 kW RF 리미터를 개발하였다. 그 측정 결과는 예측한 값과 잘 일치함을 알 수 있다.

Abstract

A RF limiter is a component to protect the receiver front end from undesired signal. A RF limiter is a key component whose output is constant level for all inputs above a critical value. A RF limiter use a diode to pass signals of low power while attenuating those above some threshold. A RF limiter for receiver protection in modern radar systems is playing a vital role in order to meet challenges of new interference threats and complicated electromagnetic environments. This paper proposed a new circuit for high power RF limiter whose structure is the combination of the PIN diode and Limit diode. PIN diode take a use of its isolation characteristics which act as a switch does. A 2 kW RF limiter with 200 us pulse width at S-band was developed. It shows good agreements between estimated value and measured results.

Key words : High Power Limiter, PIN diode, Limit diode, Isolation, Flat Leakage

I. 서 론

리미터는 외부로부터 원하지 않는 큰 신호가 수신단으로 유입되거나 송신 신호의 일부가 수신단으로 되돌아오는 것로부터 수신단을 보호하기 목적으로 널리 사용되는 소자이다^[1]. 즉, RF 수신기로 들어오는 불필요한 신호로부터 수신단의 저잡음 증폭

기(low noise amplifier) 등을 보호하는 용도이다. 종래의 펄스형 RF 리미터는 주로 높은 첨두 전력으로부터 RF 수신기를 보호하거나, 낮은 듀티(duty)를 가지면서 높은 첨두 전력을 갖는 신호를 제한하는 목적에 적합하도록 개발되어져 왔다^{[2],[3]}. 즉, 내 평균 전력 특성이 상대적으로 낮은 편이므로 장펄스 신호에 대해서 RF 리미터가 번 아웃(burn-out)되는 현상

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 5, 2012 ; Revised May 8, 2012 ; Accepted May 22, 2012. (ID No. 20120405-037)

· Corresponding Author : Myung-Deuk Jeong (e-mail : jsjj522@empal.com)

이 발생하는 문제점이 발생할 수 있다.

최근 들어 민수 또는 군사용으로 듀티가 10 % 이상이면서 높은 평균 전력을 갖는 펄스 신호가 많이 사용되는 추세이다. 따라서 높은 첨두 전력뿐 아니라 높은 평균 전력에서도 동작하는 리미터가 많이 요구되고 있다^{[4],[5]}.

본 논문은 S-band에서 듀티 10 %이면서 높은 첨두 전력을 갖는 펄스 신호를 원하는 전력 수준으로 제한할 수 있는 리미터를 설계하고, 시험한 결과를 소개하고자 한다.

II. 본 론

2-1 개요

표 1은 리미터에 대한 요구 규격이다.

첨두 전력 2 kW(63 dBm), 펄스 폭 200 us, 듀티 10 %인 펄스 신호에 대해 약 45 dB 정도 낮은 신호 레벨로 제한하는 것이다. 본 논문은 특히 200 us 정도의 장[long] 펄스폭을 갖는 RF 신호를 리미팅하기 위해 스위치의 격리도(isolation) 특성을 활용하는 방안을 고안하였다. 스위치 격리도 특성을 적용한 PIN diode와 Limit diode가 조합된 구조를 반복적으로 적용하여 점진적으로 RF 신호를 원하는 전력 레벨로 제한시키는 회로를 제안한다. 또한, PIN 다이오드는 안정된 격리도 특성을 얻기 위해 RF 신호를 이용하여 바이어스를 제공하는 세미 바이어스 회로를 적용하고, Limit diode는 Carrier life time을 고려하여 자기 바이어스 회로를 적용하였다.

2-2 회로도

표 1. 요구 규격
Table 1. Required specification.

항 목	요 구 규 격	비 고
주파수 대역	S-band	
최대 펄스폭	200 us	
Power rating	Peak 2 kW	10 % Duty
Flat leakage	18 dBm 이하	
Recovery time	1 us 이하	
삽입 손실	1 dB 이하	
반사 손실	-15 dB 이하	

요구되는 리미터는 동적 범위가 최소 45 dB 이상 이므로 다이오드 특성을 고려하여 2단으로 전체 회로를 설계하였다. 펄스형 고전력 RF 리미터 회로는 그림 1과 같다. 회로의 구성은 i) 입력되는 펄스형 RF 신호를 커플링하는 커플러(coupler), ii) 이 커플링된 RF 신호로부터 DC 전압을 검출하는 검출기(detector), iii) 검출된 DC 전압으로부터 "on" 상태의 전압과 "off" 상태의 전압을 제공하는 바이어스(bias) 제어 회로, iv) 바이어스 제어 회로가 "on" 일 때, PIN diode에 최소의 전류가 흐르도록 저항값을 제공하는 바이어스 설정 회로, v) 바이어스 제어 회로가 "on" 상태일 때, 다이오드의 격리도(isolation) 특성 만큼 RF 신호를 감쇄되는 PIN diode, vi) 이 감쇄된 RF 신호를 평탄 누설 전력(flat leakage) 값으로 제한하는 Limit diode로 구성된다.

또한, 커플링 회로, 검출 회로, 바이어스 제어 회로, 바이어스 설정 회로들은 PIN diode에 바이어스를 제공하는 역할을 하며, 이는 입력되는 RF 신호를 분기하여 바이어스를 제공하는 개념이므로 세미 바이어스형(semi-bias type)이라 한다. 세미 바이어스형은 정해진 "on" 또는 "off" 상태의 전압을 제공함으로 PIN diode에 대해 일정한 격리도 특성을 얻을 수 있도록 한다. 한편, Limit diode는 외부 바이어스 회로가 없고 입력되는 RF 신호에 의해 "on" 또는 "off"되므로 자기 바이어스형(self-bias type)이라 한다. 자기 바이어스 회로는 바이어스를 제공하기 위한 별도의 회로가 필요 없으므로 지연(delay) 시간이 작아 RF 신호에 대한 응답 속도가 빠른 장점이 있다.

2-3 동작 원리

첫째, 커플링 회로는 입력되는 펄스형 RF 신호를 커플링하도록 구성되며, 커플링 비율은 목적에 따라 조절될 수 있다. 즉, 다음 단계에 위치한 검출기(detector)의 입력 전력 수준에 맞도록 소자를 선정해야 한다. 커플링 회로는 방향성 결합기가 사용된다.

둘째, 검출 회로는 상기 커플링 회로로부터 입력되는 RF 전력을 DC 전압으로 바꾸어 주는 역할을 한다. 커플링 회로로부터 입력되는 RF 신호가 미약하거나 없으면 검출기는 동작하지 않는다.

셋째, 바이어스 제어 회로 상기 검출기로부터 받

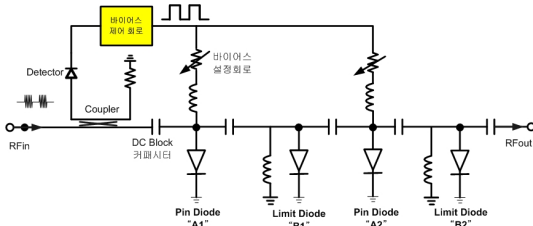


그림 1. 설계 회로도
Fig. 1. Circuit design.

은 DC 전압으로부터 리미팅하고자 하는 기준전압을 선정하고, 이 기준전압보다 높으면 "on" 상태의 DC 전압 5 V를 제공하며, 기준전압보다 낮으면 "off" 상태의 DC 전압 -70 V를 제공한다. 이때, "on" 상태의 전압과 "off" 상태의 전압은 PIN diode "A1" 및 PIN diode "A2"의 특성에 따라 달라질 수 있다. 즉, 바이어스 제어 회로가 "on" 상태일 때 DC 전압은 다이오드의 순방향 특성에 따라 달라질 수 있으며, "off" 상태일 때 DC 전압은 다이오드의 회복 시간(recovery time)과 관련이 있다.

넷째, 바이어스 설정 회로는 바이어스 제어 회로가 "on" 상태가 될 때, 각각 PIN diode에 흐르는 전류가 최소가 되도록 그 저항값을 설정한다. 이는 다이오드에 소모되는 전류를 최소가 되도록 하여 열 발생을 줄여 다이오드의 전력 수용 능력(power handling capability)을 극대화하도록 하기 위함이다. 여기서, 바이어스 설정 회로의 저항값은 사용된 다이오드 특성에 따라 달라질 수 있다. 바이어스 제어 회로로부터 "off" 상태가 되면, DC 전압이 -70 V이므로 PIN diode에는 전류가 흐르지 못한다.

다섯 번째, PIN diode "A1"과 PIN diode "A2"는 바이어스 제어 회로가 "on" 상태일 때(원하지 않는 큰 RF 신호가 있을 때), 세미 바이어스형 경로(커플링 회로 + 검출 회로 + 바이어스 제어 회로 + 바이어스 설정 회로)는 PIN diode를 도통시킨다. 즉, PIN diode의 격리도 특성에 해당하는 만큼 RF 신호가 리미팅되게 한다. 한편, 바이어스 제어 회로가 "off" 상태일 때(원하지 않는 큰 RF 신호가 없을 때), 세미 바이어스형 경로는 PIN diode를 차단시키므로 RF 신호는 리미팅 되지 않고 통과하게 된다.

PIN diode "A1"과 PIN diode "A2"는 동일한 동작 원리이나, PIN diode "A1"은 PIN diode "A2"보다 취

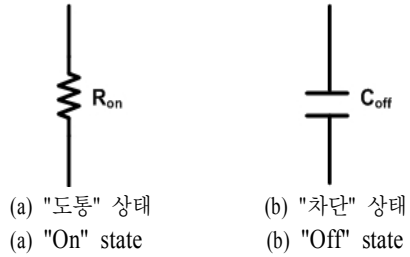


그림 2. PIN diode 모델링 회로
Fig. 2. Modeling circuit for PIN diode.

급전력이 더 크며, 평균 전력에 대한 내성이 뛰어나도록 선정하였다. 또한 PIN diode 대신 트랜지스터(transistor) 등이 사용될 수 있다.

PIN diode의 회로 모델링은 그림 2와 같다.

PIN diode가 "on"되면, RF 신호는 통해 R_{on} 에 해당하는 만큼 접지를 통해 다이오드의 격리도에 해당하는 만큼 손실이 생겨 전송된다. 한편, PIN diode가 "off" 되면, PIN diode를 통하여 흐르지 못하므로 RF 신호는 손실 없이 전송시킨다. R_{on} 은 수 오옴[Ω] 정도이고, C_{off} 는 수십 [fF] 정도이다. PIN diode의 특징은 다음과 같다.

- 삽입 손실이 작아야 한다.
- 다이오드 직렬 저항이 작아야 한다.
- Thermal resistance가 작아야 한다.
- Breakdown voltage가 높아야 한다.

여섯 번째, Limit diode "B1"과 Limit diode "B2"는 각각 PIN diode "A1"과 PIN diode "A2"에서 감소된 펄스형 RF 신호를 Limit diode의 평탄 누설 전력 특성 만큼 RF 신호를 리미팅한다. Limit diode는 각각의 소자 특성에 따라 다른 평탄 누설 전력 값이 주어진다. 일반적으로 Limit diode는 평탄 누설 전력은 특정한 값이 아니라 일정한 범위를 가지고 변하는 특성이 있다. Limit diode는 spike leakage 반응시간이 아주 짧아 첨두 전력에 대한 응답 특성이 좋다. 한편, PIN diode와 달리, Limit diode는 외부 바이어스 전압이 없고, RF 신호 크기에 따라 동작하므로 자기 바이어스형이다.

Limit diode "B1"과 Limit diode "B2"의 동작 원리는 동일하며 취급하는 전력 수준이 다르다. 즉, Limit diode "B1"은 Limit diode "B2"보다 평탄 누설 전력이

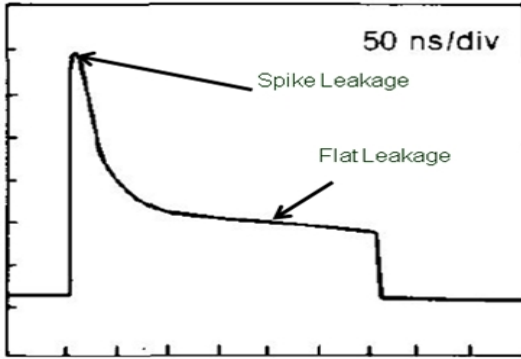


그림 3. Limit diode 특성(예)
Fig. 3. Limit diode characteristic(example).

더 높다. Limit diode는 PIN diode보다 상대적으로 짧은 회복 시간 특성으로 인해 신호의 첨두 전력을 리미팅하는 데 유리하다. 그림 3은 Limit diode의 일반적인 특성이다. Limit diode의 특징은 아래와 같다.

- 회복 시간이 짧다.
- 삽입 손실이 작아야 한다.
- 짧은 spike leakage를 가진다.
- Breakdown voltage가 높아야 한다.

마지막으로, DC Block 커패시터는 각 다이오드 간의 DC 전압을 격리시키고, RF 신호는 통과시키는 역할을 수행한다.

2-4 설계 버짓(Budget)

RF 신호 설계 버짓은 원하는 전력 수준을 정한 후 다이오드 특성을 고려하여 단(stage)을 결정한다. 소자의 선정은 power rating을 우선적으로 고려하여 선정해야 한다. 그 후 주어진 소자의 특성을 추출한 다음 다시 설계 예측값을 설정한다.

그림 4는 RF 신호 63 dBm 입력시 PIN diode와 Limit diode에 걸리는 RF 신호 전력에 대한 설계 버짓을 도식적으로 표현한 것이다.

그림의 PIN diode "A1"에서 다이오드가 "on" 될 경우, RF 신호는 다이오드의 격리도 특성에 해당하는 25 dB 정도 감쇄시켜 전달된다. 바이어스 회로의 지연시간(delay)과 회복 시간 특성에 따라 약 1 us 정도는 리미팅할 수 없게 된다. PIN diode "A1"은 높은 power rating 특성과 내 평균 전력특성이 우수한

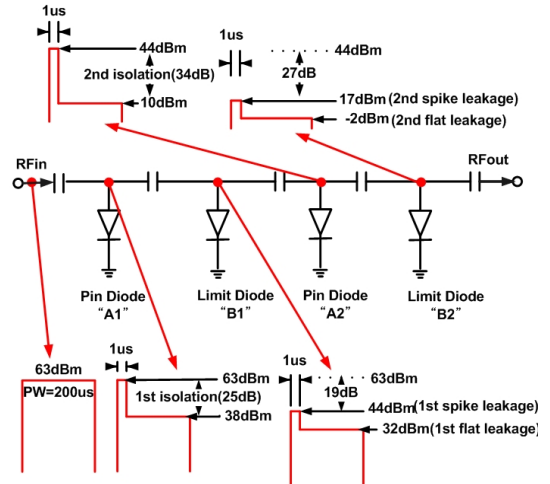


그림 4. 설계 버짓
Fig. 4. Design budget.

소자를 선정해야 한다. Limit diode "B1"에서는 PIN diode에 의해 1차 감쇄된 RF 신호를 상대적으로 빠른 응답 특성을 가지는 Limit diode에 의해 19 dB이 낮은 44 dBm에서 spike leakage가 발생하고, 약 6 dB(38 dBm → 32 dBm) 정도 더 낮은 32 dBm에 평탄 누설 전력이 형성된다. 그 다음, PIN diode "B"에서 PIN diode에서 격리도 특성 34 dB 만큼 낮은 10 dBm 이 된다. 마지막으로 Limit diode "B"에서 Limit diode에 의해 27 dB 낮은 17 dBm에서 Spike leakage가 발생되고, 약 12 dB(10 dBm → -2 dBm) 정도 더 낮은 -2 dBm에서 평탄 누설 전력이 형성된다.

2-5 제작 및 시험 결과

그림 5는 제작된 고풍력 RF 리미터 사진이며, 바

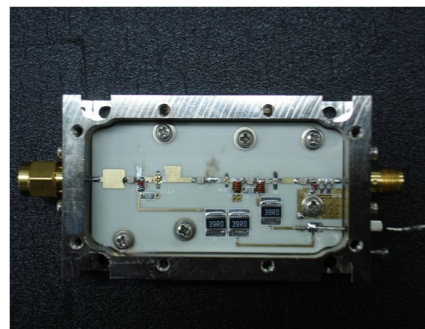


그림 5. RF 리미터 제작 사진
Fig. 5. Photo of RF limiter.

Spike leakage = 17dBm



(a) 펄스폭=1 us 이내의 출력
(a) Output power within pulse width=1 us

Spike leakage = 17dBm



Flat leakage = -2.5 dBm
(b) 출력 특성
(b) Output power

그림 6. 측정 결과
Fig. 6. Measured result.

이어스 회로 부분은 포함되어 있지 않다.

그림 6은 제작된 리미터의 측정 결과이다.

그림 6(a)는 1 us 구간을 확대한 것으로 반응시간이 20 ns(X축: 200 ns/Div.) 이하로 매우 빠른 응답 특성을 보이고 있으며, spike leakage가 약 17 dBm 정도임을 알 수 있다. 그림 6(b)는 1 us 이후 구간을 보여주고 있으며, X축이 50 us/Div.이므로 200 us의 펄스폭을 가짐을 알 수 있고, 평탄 누설 전력(flat leakage)이 약 -2.5 dBm이 됨을 보여주고 있다. 이는 설계

표 2. 리미터 특성 비교

Table 2. Comparison of the limiter characteristics.

구분	참고문헌 [4]	참고문헌 [5]	This paper
주파수 대역	S-band	S-band	S-band
Power rating [dBm]	55	64	63
최대 입력 펄스폭[usec]	10	1	200
삽입 손실[dB]	-	0.8	1.0
반사 손실[dB]	-	-18	-15
듀티 [%]	10	0.1	10

버짓 예측 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 측정주파수는 3 GHz이다. 표 5는 기존에 연구된 S-band 리미터들과의 특성을 비교한 것이다. 표에서 최대 입력 펄스폭에 대한 특성은 본 논문에서 제시한 값이 뛰어난 것을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문은 바이어스로 제어되는 PIN diode의 격리도 특성과 자기 바이어스로 동작하는 Limit diode의 평탄 누설 전력(flat leakage) 특성을 교번 적용하여 높은 첨두 전력을 가지면서 장 펄스 특성을 갖는 RF 신호를 원하는 전력 수준으로 리미팅하는 회로를 설계하였다. 그 결과, 3 GHz 주파수에서 출력 63 dBm, 펄스폭 200 us인 RF 신호에 대해서 원하는 전력 수준으로 리미팅 됨을 보였으며, 예측 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 듀티는 약 10 % 정도이다.

참 고 문 헌

[1] Robert J. Tan, Alford L. Ward, Robert V. Garver, and Henry Brisker, "PIN diode limiter spike leakage, recovery time, and damage", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 275-278, 1988.
 [2] Nikolai Drozdovski, Tadashi Takano, "Compute modeling of bistability effect in P-I-N diode limiter characteristic", *IEEE Microwave and Guide Wave Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 148-150, Apr. 2000.
 [3] 정명득, 강현일, "GaAs PIN diode를 이용한 MM-

IC 리미터 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 14(6), pp. 625-6296, 2003년 6월.

- [4] E. Gatard, R. Sommet, and P. Bouysse, "High power s band limiter simulation with a physics-based accurate nonlinear PIN diode model", *Proceedings of the 2nd European Microwave Integrated Circuits*

Conference, pp. 72-75, 2007.

- [5] Shigekazu Masahiro, Kuroda Hori, Kenji Kanema, and Susumu Okano, "High-power MIC diode limiter for S- and X-band radars", *Microwave Symposium Digest, IEEE MTTs International*, pp. 329-331, 1979.

정 명 득



1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2003년 2월: 충남대학교 마이크로파 및 광과 (공학박사)

1991년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계,

능동 위상배열시스템