

Ku-대역 위성중계기용 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기 및 온도보상회로 설계

Voltage-Controlled PIN Diode Attenuator and Temperature Compensation Circuit for Ku-band Satellite Payload

장 병 준 · 염 인 복 · 이 성 팔

Byung-Jun Jang · In-Bok Yom · Seong-Pal Lee

요 약

본 연구에서는 Ku-대역 위성통신 중계기에 사용되는 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기를 설계, 제작, 측정하고 이 감쇄기의 온도 특성 변화를 보상하기 위한 온도보상회로를 제안하였다. PIN 다이오드 감쇄기는 박막 하이브리드 기술을 이용하여 설계되었으며 PIN 다이오드 감쇄기를 전압제어형으로 사용할 경우 최대 선형 특성을 얻을 수 있는 부하 저항(R_L)의 값을 Simulation 및 실험에 의해 결정되었다. 최적의 부하 저항값은 사용한 PIN 다이오드의 특성에 의해 달라지며, 본 논문에서 사용한 APD-0805의 경우 150 Ω 의 부하저항으로 PIN 다이오드 한 개에 10 dB 까지 선형 감쇄범위를 얻을 수 있었다. 또한 부하 저항을 포함한 PIN 다이오드 감쇄기의 온도 특성을 측정하였고, 측정결과 관찰된 PIN 다이오드 감쇄기가 전압제어형으로 사용되어질 경우의 가장 큰 단점인 온도 특성의 심각한 변화를 보상할 수 있는 온도보상회로를 제안하였다. 제안된 온도보상회로를 갖는 PIN 다이오드 감쇄기는 동작온도에 대해 선형적인 특성을 보이며 동작온도 범위에 걸쳐 0.6 dB 이하의 오차만을 가짐을 확인하였다.

Key words : 감쇄기, 온도 보상, PIN 다이오드, 전압제어

Abstract

This paper presents the results of a study of voltage-controlled PIN diode attenuators for Ku-band satellite payload and suggests the temperature-compensation method of these attenuators. The PIN diode attenuators are designed using thin-film hybrid techniques. The load resistance for maximum linear characteristics is determined by simulation and measurements. In the case of APD0805, load resistance of 150 Ω gives attenuator up to 10 dB linear attenuation range per a PIN diode. Also, measurements over temperature of these PIN diode attenuators were performed. From these measurements, designed PIN diode attenuators shows the severe temperature dependency due to forward voltage variation. A temperature compensation method using thermistor is now suggested to compensate the temperature variation of these PIN diode attenuators. This circuit shows good linear characteristics over wide temperature range

I. 서 론

PIN 다이오드는 RF/Microwave 신호를 제어하는

다양한 회로에 사용되어지며 예를 들어 스위치, limiter, 위상변위기, 감쇄기 등에 광범위하게 사용되어지고 있다. 특히 PIN 다이오드 감쇄기는 이동

한국전자통신연구원 통신위성개발센터(ETRI Satellite Communication Department)

· 논문 번호 : 20020219-018

· 수정완료일자 : 2002년 4월 12일

통신 중계기 및 위성중계기의 자동 이득 제어회로 (AGC : Automatic gain control)나 출력제한 회로 등에 널리 사용되어 진다^[1].

스위치 회로나 위상변위기는 기본적으로 PIN 다이오드의 ON/OFF 특성을 이용하는 것이기 때문에 그 구성회로가 간단하며, 실제로 많은 연구가 이루어져 있다. AGC회로의 경우 감쇄기의 감쇄특성이 loop에 의해 조절되므로 감쇄기의 감쇄특성을 정밀하게 조절할 필요는 없어 설계가 비교적 간단하다. 하지만 감쇄기 회로가 이득 제어용으로 사용되어지거나 증폭기 모듈내에 삽입되어 온도보상회로로 사용되어질 경우에는 PIN 다이오드의 감쇄 특성 및 온도에 따른 변화 등을 정확히 예측하여야만 하므로 그 구성이 매우 복잡하여진다. 따라서 정밀한 감쇄 특성을 필요로 하는 분야, 예를 들어 위성통신용 중계기 등의 채널증폭기나 온도보상회로에 사용되는 감쇄기의 설계는 아직도 많은 연구가 필요하다. 본 논문에서는 Ku-대역 위성통신 중계기에 사용되는 채널증폭기의 이득 조절용 감쇄기와 중간주파수 증폭기의 온도보상용 감쇄기로 사용되어질 수 있는 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기에 대하여 기술한다.

일반적으로 PIN 다이오드 감쇄기는 입력전류에 의해 그 감쇄특성이 조절된다. 이는 기본적으로 PIN 다이오드가 전류제어 소자이며, 감쇄기의 특성을 결정하는 RF 저항이 입력전류에 반비례하여 지수함수적으로 변하기 때문이다^[2]. 하지만 회로적으로 전류원을 만들기가 어렵고 부가적인 전압-전류 변환기가 필요할 뿐만 아니라 입력전류를 지수적으로 가변시켜야 하기 때문에 전류구동형 PIN 다이오드 감쇄기의 구동회로는 매우 복잡하다. 보통 PIN 다이오드 감쇄기의 구동회로는 전류원, Log 증폭기, 전압-전류 변환기 등이 집적되어 매우 복잡하다. 따라서 만약 PIN 다이오드 감쇄기를 전압제어형으로 구성할 수 있다면 구동회로가 간단해질 수 있으며, PIN 다이오드 감쇄기도 다양한 분야에서 사용되어질 수 있을 것이다^[3].

전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기를 설계하기 위해서는, 감쇄특성이 입력전압에 대해 선형적으로 변화하여야만 하며, 온도에 따라서도 그 특성이 일정하여야만 한다. 특히 온도 변화는 보통 다이오드의

순방향 전압강하(forward voltage drop : V_F) 특성이 온도에 따라 크게 변하기 때문에 이를 보상하는 것이 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기를 설계하는데 있어 가장 중요하다^{[3],[4]}.

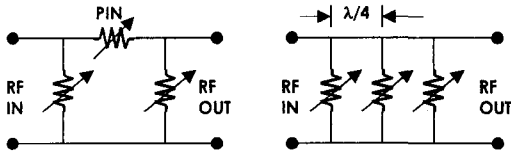
따라서 본 연구에서는 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기를 설계, 제작하고 이 감쇄기의 온도 특성을 보상하기 위한 온도보상회로를 제안하였다. 제안된 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기는 종래의 PIN 다이오드 감쇄기와 직렬 부하 저항으로 구성되어 있으며, PIN 다이오드 감쇄기를 전압제어형으로 사용할 경우 최대 선형 특성을 얻을 수 있는 부하 저항 (R_L)의 값은 Simulation 및 실험에 의해 결정되었다. 또한 PIN 다이오드 감쇄기가 전압제어형으로 사용되어질 경우의 가장 큰 단점인 온도 특성의 심각한 변화를 보상할 수 있는 온도보상회로를 제안하였다. 제안된 온도보상회로는 NTC(Negative Temperature Coefficient) 써미스터(Thermistor), PTC(Positive Temperature Coefficient) Thermistor와 주변 저항, 그리고 OP AMP로 구성되어 있으며, 동작온도에 대해 안정적인 특성을 보임을 확인하였다

II. Ku-대역 PIN 다이오드 감쇄기 설계

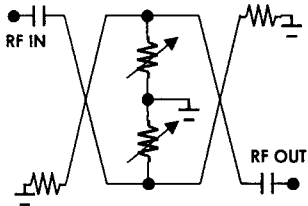
PIN 다이오드 감쇄기는 직렬 또는 병렬구조를 갖는 간단한 반사형 구조에서부터 입출력 정합특성을 높이기 위해 다양한 부가 회로를 첨가한 방식 등 여러가지 형태가 있다. 이러한 감쇄기의 종류가 다음 그림 1에 나타나 있다.

그림 1 (a)와 (b)는 원하지 않는 RF신호를 PIN 다이오드가 흡수함으로써 동작하게 된다. 그림 1 (a)의 회로는 간단하며, 특히 10 MHz에서 1 GHz 사이의 낮은 주파수 대역에서 많이 사용되어진다. 그림 1 (b)의 회로는 많은 수의 다이오드를 분산구조로 배열함으로써 입력 임피던스를 일정하게 유지한다. 이 구조는 낮은 주파수에서는 구성하기가 어려우나 높은 주파수에서 넓은 감쇄범위를 필요로 하는 경우에는 유용하다.

그림 1 (c)의 회로는 병렬구조의 반사형 감쇄기의 입출력에 Lange coupler를 추가함으로써 입출력 VSWR을 낮출 수 있는 장점이 있어 증폭기 사이에 별도의 Isolator없이 삽입할 수 있는 장점이 있다.



(a) Pi-Attenuator (b) Resistive Line Attenuator



(c) Double Hybrid Coupled Attenuator

그림 1. 일정한 임피던스를 갖는 PIN 다이오드 감쇄기^[2]

Fig. 1. Constant Impedance PIN Diode attenuators^[2].

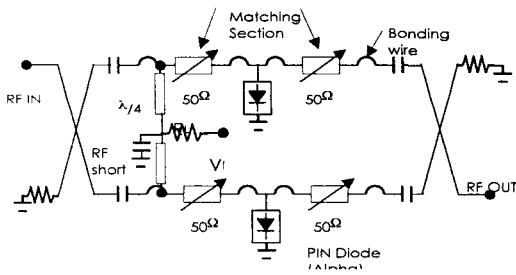


그림 2. ku-대역 PIN 다이오드 감쇄기 회로도

Fig. 2. ku-band PIN Diode attenuator circuit diagram.

본 논문에서 요구되는 Ku-대역 감쇄기는 위성중계기용 채널증폭기에 사용되는 감쇄기로서 요구되는 성능 규격은 다음과 같다.

동작 주파수 범위 : 12~13 GHz
 감쇄 특성 : -6~-14 dB 선형 동작(8 dB 동작 범위)
 평탄도 : 1GHz 범위에 대해 0.5 dB 이하
 출력전력 : < +1 dBm
 입출력 반사계수 : < -15 dB
 크기 : 8×7 mm (캐리어 크기에 의해 결정)
 제작 : PIN 다이오드 칩을 이용한 박막 하이브리드 회로

이러한 요구조건으로부터 평탄도 및 입출력 반사계수의 특성을 만족시킬 수 있는 그림 1 (c)의 구조가 선정되었다. 그림 2는 설계된 PIN 다이오드 감쇄기의 개념도를 나타낸다. 직렬 저항 R_L 은 감쇄기를 전압원 V_1 로 구동하기 위하여 삽입되었으며 이 값을 조절함으로써 입력전압에 대해 선형특성을 갖는 감쇄기를 구현하였다. 선정된 PIN 다이오드는 Alpha사의 APD-0805-000 칩으로 크기는 $13 \times 13 \text{ mil}^2$ 이며 $8 \mu\text{m}$ 의 I-영역 두께와 0.05 pF의 기생캐패시턴스를 갖는다.

정합회로는 PIN 다이오드를 연결하는 직렬 마이크로스트립 선로의 길이를 조절하여 bonding wire와 기생 캐패시턴스를 보상함으로써 평탄한 특성을 갖도록 구성하였다. 설계에 사용된 PIN 다이오드의 모델은 다음 그림 3 (a)와 같으며 시뮬레이션은 LibraTM의 Harmonic Balance 방법을 사용하였다.

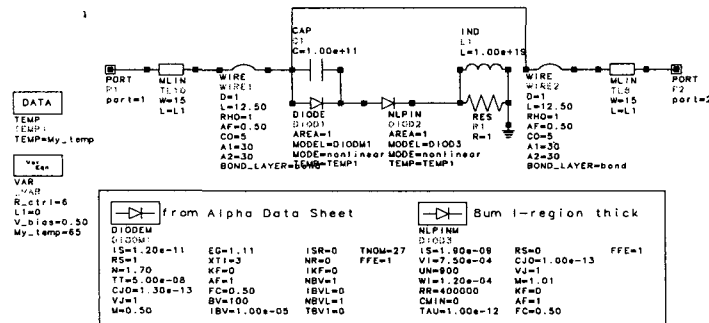
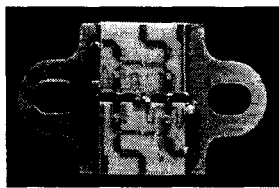


그림 3. PIN 다이오드의 등가 모델

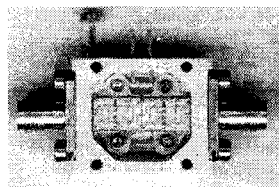
Fig. 3. PIN Diode model for Libra simulation.

모델은 DC특성을 해석하기 위한 PN 다이오드 모델 'DIODE'와 RF특성을 해석하기 위한 PIN 다이오드 모델 'NLPIN'을 직렬로 연결해 구성된다. PN 다이오드 모델은 입력전압에 따른 동작전류의 값을 결정하며, PIN 다이오드는 PN 다이오드에 의해 결정된 동작전류에 따라 가변되는 RF저항을 모델링한다. PN 다이오드 모델의 파라미터값들은 다이오드의 DC특성으로 추출 가능하며, 다이오드의 Data Sheet에 포함된다. RF특성 해석시 캐패시터 C_1 은 단락되고 인덕터 L_1 은 개방되어 PIN 다이오드에 직렬 저항 1Ω 이 연결된 형태로 해석된다. 직렬저항 1Ω 은 순방향 전류의 양이 많을 때 PIN다이오드가 나타내는 최소저항을 모델링하기 위하여 첨가되었다. DC특성은 이와 반대로 캐패시터 C_1 은 개방되고 인덕터 L_1 은 단락되어 PN 다이오드 모델인 'DIODE'에 의해 PIN 다이오드에 흐르는 전류와 전압 특성이 결정된다.

온도 특성을 시뮬레이션할 때 주의해야 할 점은 다이오드 파라미터 중에 T_{nom} 을 변화시키지 말고 schematic상에 온도 파라미터인 TEMP 변수를 바꾸어 주어야 한다는 것이다. 이 TEMP변수는 T_{nom} 과는 다른 값으로 이 값을 변화시켜야 Libra 시뮬레이터는 Eg, Is, Isr, Cjo 및 Vj 파라미터를 온도에 따라 scaling 하게 되어 온도변화에 따른 전압-전류 관계를 모델링 할 수 있게 된다.



(a) Carrier level



(b) Test module

그림 4. PIN 다이오드 감쇄기의 사진
Fig. 4. Photograph of the ku-band PIN Diode attenuator.

감쇄기는 15 mil 두께의 alumina(Al_2O_3) 기판을 이용하여 설계되었다^[5]. PIN 다이오드와 기판은 Eutectic 기법으로 Kovar로 제작된 캐리어에 직접 접착되어 있으며 바이어스는 기판상의 $\lambda/4$ 선로를 통해 인가된다. 바이패스 캐패시터는 DLI사의 68 pF의 SLC(single layer capacitor)를 Eutectic기법으로 접착한 후 0.7mil gold wire를 사용하여 연결하였으며 설계된 lange coupler의 중심 주파수는 12.5 GHz 이다.

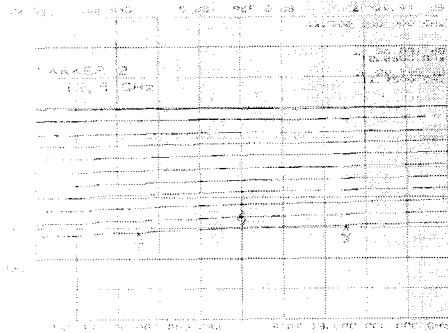
모든 회로설계 및 layout은 HP-EESOF의 LibraTM을 사용하였으며 박막기술을 이용하여 제작되었다. 그림 4 (a)는 제작된 감쇄기의 사진을 나타낸다.

III. PIN 다이오드 감쇄기 실험 결과

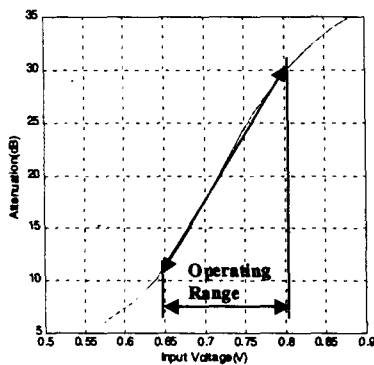
PIN 다이오드 감쇄기의 정확한 특성 측정을 위하여 그림 4(b)와 같은 시험 모듈이 설계되었다. 시험 모듈은 두개의 감쇄기가 직렬연결되어 있는 구조이며 16 dB 이상의 감쇄특성을 얻는 것이 목표이다. 시험 모듈에는 바이어스 인가를 위한 feed-thru와 GND 핀이 첨가되어 있으며 감쇄기는 feed-thru와 1 mil gold wire로 연결되어 있다. Feed-thru의 반대편은 직렬저항 R_L 을 통하여 전압원에 연결된다.

측정은 직렬저항 R_L 을 가변시키면서 입력 전압을 인가하였을 때 감쇄특성이 가장 선형적으로 변화하는 R_L 을 구하는 것이다. 여러 시험을 거쳐 APD-0805 PIN 다이오드 감쇄기의 경우 150 Ω 이 가장 선형적인 특성을 나타내었다. 다음 그림 5는 이 경우의 측정 결과를 보여준다. 그 감쇄 특성은 20 dB 정도의 선형영역을 가짐을 알 수 있었으며 주파수 특성 역시 원하는 특성을 만족하는 결과를 보여주었다. 주파수 특성은 lange coupler의 동작영역에 의해 결정되게 된다. 주파수 특성을 얻기 위하여 10 dB부터 30 dB까지 2 dB 간격으로 측정하였으며 30 dB 근방이 되면 PIN 다이오드의 기생캐패시턴스 효과 때문에 주파수 평탄도 특성이 깨지게 된다.

직렬저항의 값은 사용되는 PIN 다이오드에 따라 다르게 되는데 예를 들어 동일한 감쇄기에 PIN 다이오드만 APD-1510으로 2배의 I-영역 두께를 갖는 PIN 다이오드로 바꿀 경우 50 Ω 의 직렬저항값이 가장 선형적인 특성을 나타내게 된다.



(a) Frequency response



(b) Attenuation vs. DC bias voltage

그림 5. 설계된 감쇄기 시험 모듈의 상온 온도 시험 결과

Fig. 5. Measurement results of the designed attenuator test module at 25°C.

상온에서 PIN 다이오드 감쇄기의 특성을 구한 후 이 감쇄기의 온도 특성을 측정하였다. 온도 특성은 직렬저항을 포함한 감쇄기 시험 모듈을 온도 챔버 안에 놓고 온도를 -15°C 부터 65°C 까지 20°C 간격으로 측정하였다. 다음 그림 6은 여러 동작 온도에 따른 감쇄 특성의 변화를 나타낸다. 측정 데이터는 중심 주파수인 12.5 GHz에서 회로망분석기(VNA)를 이용하여 기록되었다. 측정결과에서 알 수 있듯이 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기의 온도 특성은 기울기는 온도가 올라감에 따라 미세하게 작아지며, offset전압은 온도가 올라감에 따라 감소하는 방향으로 크게 변화함을 알 수 있다. 예를 들어 입력전압을 0.7 V로 고정하고 온도에 따른 감쇄특성을 살펴볼 경우 상온(+25°C)에서는 18 dB이지만, 고온(+65°C)에서는 25 dB 그리고 저온(-15°C)에서는

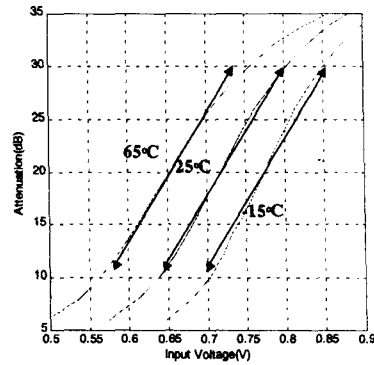


그림 6. 온도변화에 따른 DC 바이어스 전압 대 감쇄 특성

Fig. 6. Measured Attenuation vs. DC bias voltage (Vf) over temperature.

10 dB로 동작온도에 걸쳐 15 dB까지 변화됨을 알 수 있다.

이상의 시험 결과를 바탕으로 감쇄기의 구동회로를 온도에 따라 offset전압과 기울기가 변경될 수 있도록 설계한다면, 즉 온도에 따른 기울기와 offset의 변화와 반대로 변화하는 온도 보상회로를 구성한다면 온도에 따라 안정적으로 동작하는 감쇄기를 구현할 수 있음을 예상할 수 있다.

IV. Thermistor를 이용한 온도보상회로

이상의 시험 결과를 바탕으로 다음 그림 7과 같은 온도 보상회로를 제안하였다. 온도보상회로는 1개의 Quad-OPAMP와 Offset값을 보상하는 NTC thermistor(R_{TH}), 기울기를 보상하는 PTC thermistor (R_C) 및 주변 저항들로 구성된다. 사용된 thermistor는 NTC의 경우 YSI사의 311P18-01-A-7R6이며, PTC의 경우 TAMA사의 LP1/83k QJ502이며, 사용된 OPAMP는 AD사의 OP400AY를 사용하였다.

R_1 , R_2 와 R_{TH} 의 조합은 온도가 증가함에 따라 감소하는 offset 전압을 만든다. R_{TH} 는 온도에 따라 선형적으로 변화하지 않으며 지수함수적으로 감소한다. 따라서 병렬 저항 R_2 의 값을 이용하여 온도에 따라 V_{offset} 값이 선형적으로 변화할 수 있도록 조절하게 된다. R_1 의 값은 기준전압 V_{cc} (+5 V)를 전압 강하시켜 감쇄기에 적합한 전압레벨로 낮추어주는

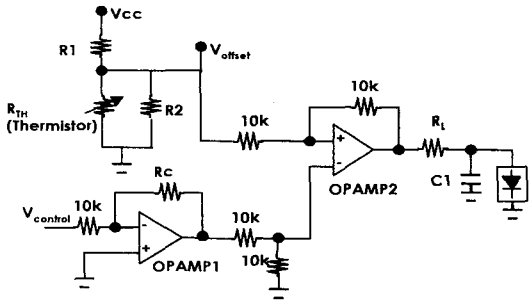


그림 7. 제안된 온도보상회로의 개념도
Fig. 7. Temperature compensation circuit schematic diagram.

역할을 하게 된다. 이렇게 구성된 회로는 온도가 올라가게 되면 R_{TH} 는 작아지게 되고 V_{offset} 값도 작아지게 된다. OPAMP 1은 반전증폭기로서 OPAMP 2와 함께 감쇄기의 제어전압에 온도에 따라 가변되는 offset 전압을 더해주는 역할을 한다. PTC저항 R_c 는 온도에 따라 선형적으로 증가하며 그 온도변화는 5.000 ppm이다. 따라서 입력제어전압은 온도가 증가함에 따라 기울기가 커지므로 감쇄기의 기울기 변화를 보상하는 역할을 한다.

이러한 온도보상회로를 감쇄기와 함께 연결함으로써 감쇄기의 온도변화를 보상하는 것이 가능하다. 온도보상회로의 설계는 pSpice를 이용하여 설계하였으며, 설계된 온도보상회로와 감쇄기 회로를 연결한 후 온도 특성을 측정하고, 측정결과를 바탕으로

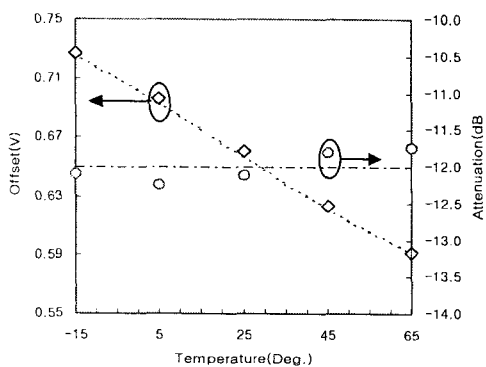


그림 8. 동작 온도에 따른 offset 전압 및 감쇄량의 변화(실선: 시뮬레이션)
Fig. 8. Measured offset voltage(V) and Attenuation(dB) over temperature range. Solid lines are for simulated characteristics.

주변 저항값들을 미소 조정하여 최종 온도보상회로를 설계할 수 있었다.

다음 그림 8은 감쇄기를 제어전압($V_{control}$)이 0 V일 때의 온도 변화에 따른 온도보상회로의 offset 변화와 감쇄량의 특성변화를 나타낸다. 측정결과로부터 온도 특성을 조절하기 위하여 R1과 R2값을 Tuning함으로써 동작온도 범위에 대하여 일정한 감쇄특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 회로망분석기(VNA)로 측정된 결과 감쇄량 값은 $+65^{\circ}\text{C}$ 에서 최대 -11.73 dB , -5°C 에서 최대 -12.24 dB 로 측정되어 온도 변화에 따라 0.5 dB 이내의 특성을 얻을 수 있었다. 특성이 일정하지 않은 이유는 NTC Thermistor가 지수함수적으로 변하므로 주변 저항으로 선형동작을 시키는데 한계가 있어 그 특성이 온도에 따라 미세하게 'S'자 형태가 나오기 때문이다.

다음 그림 9는 제어전압을 0 V부터 10 mV씩 선형적으로 증가시켰을 때, 즉 10 mV로 1 dB 간격을 조절하도록 하여 동작 온도 전체에 걸쳐 감쇄기의 입출력 특성을 나타낸 것이다. 제어전압의 간격은 R_c 값을 조정하여 그 크기를 조절하는 것이 가능하다. 실험결과 선형 동작범위인 -12 dB 에서 -28 dB 까지의 16 dB 동작범위에 대해서도 0.6 dB 이하의 오차 특성을 얻을 수 있었다.

실험결과 본 논문에서 예상한대로 전압제어형 감쇄기의 구동회로 및 온도보상회로를 OPAMP와 Thermistor만으로 간단히 구성하는 것이 가능함을

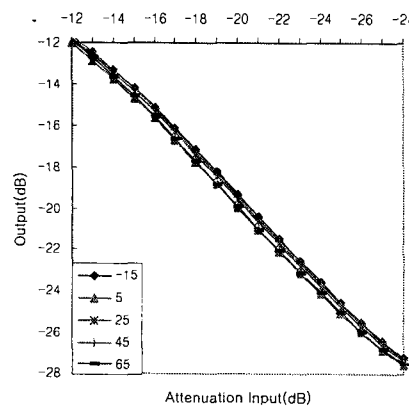


그림 9. 동작 온도에 따른 감쇄량의 변화
Fig. 9. Measured Attenuation variation(dB) over temperature range.

확인하였다. 실제 이 감쇄기회로는 ku-대역 위성중계기에 사용되는 채널증폭기에 사용되어 현재 시험 모델 (Engineering Model)이 완료된 상태이다.

제안된 회로는 감쇄기의 온도보상만을 기술하였지만, 이 감쇄기가 이득 증폭기의 온도 보상용으로 사용되어질 경우 온도보상회로의 주변 저항값만을 수정함으로써 증폭기의 온도보상회로로도 사용되어질 수 있다^[6]. 즉 증폭기의 경우 온도가 올라감에 따라 이득이 감소하며 온도가 내려감에 따라 이득은 증가한다. 이는 감쇄기의 특성과 비슷하게 선형적인 특성을 가진다. 따라서 증폭기가 포함될 경우 offset의 변화량은 증폭기의 변화만큼 더 커지게 되지만 감쇄기의 변화량이 훨씬 크므로 감쇄기의 온도보상회로안에 포함시킬 수 있다. 따라서 온도보상회로의 저항값을 일부 수정하게 되면 증폭기의 온도보상회로로 사용되는 것이 가능하다.

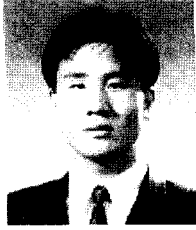
V. 결 론

본 연구에서는 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기를 설계, 제작, 측정하였고, 측정결과 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기의 문제점인 심각한 온도 변화를 보상하기 위한 온도보상회로를 제안하였다. PIN 다이오드 감쇄기는 박막 하이브리드 기술을 이용하여 설계되었으며 PIN 다이오드 감쇄기를 전압제어형으로 사용할 경우 최대 선형 특성을 얻을 수 있는 부하 저항(R_L)의 값을 Simulation 및 실험에 의해 결정되었다. 최적의 부하 저항값은 사용한 PIN 다이오드의 특성에 의해 달라지며 본 논문에서 사용한 APD0805의 경우 150 Ω 정도의 부하저항으로 10 dB 정도의 선형 동작범위를 얻을 수 있었다. 또한 PIN 다이오드 감쇄기가 전압제어형으로 사용되어질 경우의 가장 큰 단점인 온도 특성의 심각한 변화를 보상할 수 있는 온도보상회로를 Thermistor소자를 이용하여 설계하였다. 제안된 온도보상회로를 갖는 PIN 다이오드 감쇄기는 동작온도에 대해 선형적인 특성을 보이며, 동작범위에 걸쳐 0.6 dB 이하의 오차만을 가짐을 확인하였다. 설계된 전압제어형 PIN 다이오드 감쇄기는 위성중계기용 채널증폭기의 이득제어회로와 각종 증폭기의 온도보상회로에 이용되어질 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Iordanescu, G. Simion, C. Anton and A. Muller, "Broadband Microwave PIN diode Attenuators", *1998 International Semiconductor Conference*, pp. 601-604, 1998.
- [2] HP Application Note 922, *Application of PIN Diodes*.
- [3] J. F. White, "Microwave Semiconductor Engineering", *1995 Applied Microwave & Wireless*.
- [4] Robert H. Caverly and Gerald Hiller, "The Temperature Dependence of PIN diode Attenuators", *1993 IEEE MTT-S Digest*, pp. 553-556, 1993.
- [5] Byung-Jun Jang and Cha-Hong Min, "A ku-band balance amplifier design using thin-film hybrid technique", *Applied Microwave & Wireless*, pp. 72-78, Jan. 2002.
- [6] L. Raffaelli and R. Goldwasser, "Temperature Compensation for Microwave GaAs FET Amplifiers", *Microwave Journal*, pp. 315-321, May 1986.
- [7] Scott A. Wartenberg, "Designing Precision Attenuation in a Microwave PIN Diode Switch", *Applied Microwave & Wireless*, pp. 42-48, Nov. 1998.
- [8] J. K. Hunton and A. G. Ryals, "Microwave Variable Attenuators and Modulators using PIN Diodes", *IRE Trans. on Microwave theory and techniques*, pp. 262-273, 1962.
- [9] M. S. Navarro, S. N. Prasad, M. Anderson and D. Gardner, "Non-reflecting electronically variable attenuator", *1999 IEEE MTT-S IMOC'99 Proceedings*, pp. 541-545, 1999.
- [10] L. Klapproth and D. Neuf, "A 35GHz PIN Diode Variable Attenuator", *Microwave Journal*, pp. 124-126, April 1997.

장 병 준



1986년 3월~1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 3월~1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 3월~1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자

(주) 선임연구원
1999년 1월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로(MMIC, Hybrid) 설계, 무선통신시스템

이 성 팔

1978년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1986년: Polytechnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학석사)
1990년: Polytechnic Institute of New York 전기전자공학과 (공학박사)
1980년~현재: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 책임연구원
[주 관심분야] 위성통신시스템

엄 인 복

1990년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 위성RF부품연구팀장. 선임연구원
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사)
[주 관심분야] 위성통신중계기, MMIC 회로, 필터설계