

논문 2009-46TC-11-7

정전용량 흡수 능력을 고려한 마이크로파 분포증폭기 설계

(Design of a Microwave Distributed Amplifier Considering Capacitance Absorption Capability)

김 남 태*

(Nam Tae Kim)

요 약

본 논문에서는 분포정수 회로합성을 이용하여 최적의 정전용량 흡수 능력을 갖는 분포증폭기를 설계한다. 증폭기를 구성하는 여파기의 전달함수는 저역통과 Chebyshev 근사로 합성하며, 이의 정전용량 흡수 능력은 최소 삽입손실(MIL)과 리플의 함수로 계산한다. 분포증폭기의 능동 소자는 S-파라미터를 이용하여 등가회로로 모델링하며, 이의 정전용량은 전달함수의 MIL과 리플을 적절히 조정함으로써 여파기 구조로 흡수한다.

이의 응용 예로써, 0.1~7.5GHz의 주파수 대역에서 약 12.5dB의 이득을 갖는 분포증폭기를 설계하며, 실험을 통하여 정전용량 흡수 능력을 고려한 분포정수 회로합성이 분포증폭기의 설계에 유용하게 이용될 수 있음을 입증한다.

Abstract

In this paper, a distributed amplifier is designed using distributed network synthesis that provides the optimum absorption capability of a capacitance. Transfer functions of filters, which consist of the amplifier, are synthesized by a low-pass Chebyshev approximation. Capacitances that a filter network can absorb are calculated as a function of its minimum insertion loss(MIL) and ripple. Active devices in a distributed amplifier are modeled as equivalent circuits by using their S-parameters, and their equivalent capacitances are absorbed into filter structures by properly adjusting the MIL and ripple of a transfer function.

As an application example, a distributed amplifier with the gain of about 12.5dB is designed that operates over the frequency range between 0.1 and 7.5GHz. Experimental results prove that distributed network synthesis, which considers capacitance absorption capability, is useful to the design of distributed amplifiers.

Keywords : distributed amplifier; traveling-wave amplifier; parasitic absorption; network synthesis

I. 서 론

멀티미디어 통신과 전자전의 필요성이 증대됨에 따라 넓은 주파수 대역에서 원하는 수준으로 신호를 증폭하는 초광대역 증폭기(ultra-broadband amplifier)의 수요가 증가하고 있다. Persival에 의하여 소개된 분포증폭기는 광대역 진공관 증폭기의 설계에 주로 사용되었으며^[1], 트랜지스트의 성능이 향상됨에 따라 이의 사용 영역은 마이크로파 및 밀리미터파 대역으로 확장되었다

[2~3]

분포증폭기는 전기적 특성이 동일한 입출력 여파기와 트랜지스터를 결합함으로써 구성되며, 여파기 구조는 광대역에서 임피던스 정합 문제를 근본적으로 해결할 수 있다는 장점이 있다^[4]. 따라서 분포증폭기의 설계는 트랜지스터가 주어진 경우, 게이트 및 드레인 여파기의 설계 문제로 귀착된다. 지금까지 멀티옥타브(multi-octave) 대역의 분포증폭기에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이들 연구는 대부분 여파기의 구성 소자로써 집중정수 소자를 이용하였다^[5~6]. 고주파의 경우, 집중정수 소자는 분포정수 소자로 변환하여야 하므로, 이러한 과정은 분포증폭기의 성능에 오차를 초래

* 정회원, 인제대학교 전자정보통신공학부
(School of Electronics and Telecommunication
Eng., Inje University)

접수일자: 2009년7월20일, 수정완료일: 2009년11월10일

함은 물론, 평면회로의 경우 이의 구현은 불가능할 수도 있다^[7]. 그러나 분포정수 회로합성은 전달함수의 파라미터(parameter)를 조정함으로써 구현이 용이한 전송선로로 여파기를 구성할 수 있으며, 이의 정전용량 흡수 능력도 변화시킬 수 있다. 따라서 분포정수 회로합성은 집중정수 회로합성에 비해 분포증폭기의 설계에 매우 유리하다.

또한, 분포증폭기는 주로 게이트 여파기에 의하여 그 성능이 결정되므로^[8], 이는 트랜지스터의 게이트 정전용량을 흡수하는 동시에 차단 주파수를 최대로 유지하며, 반사 특성을 요구 수준으로 유지할 수 있어야 한다. 이러한 조건 역시 여파기 파라미터의 조정을 수반하며, 이러한 조정에는 많은 시간과 노력이 소요된다. 따라서 여파기를 설계하기 전, 여파기가 흡수할 수 있는 정전용량과 이에 따른 반사 특성을 여파기 파라미터의 함수로 예측할 수 있다면, 게이트 및 드레인 여파기를 한층 더 효과적으로 설계할 수 있다.

본 논문에서는 분포증폭기의 구현에 용이한 분포정수 회로합성을 이용하여 여파기의 정전용량 흡수 능력을 예측하고, 이에 의하여 요구 성능을 만족하는 분포증폭기를 설계한다. 분포정수 여파기는 저역통과 Chebyshev 근사로 합성하며, 이의 정전용량 흡수 능력 및 이에 따른 반사 특성은 전달함수의 MIL과 리플의 함수로 계산한다.

이의 응용 예로써, 0.1~7.5GHz의 주파수 대역에서 동작하는 분포증폭기를 설계하며, 정전용량 흡수 능력을 고려한 분포정수 회로합성이 분포증폭기의 설계에 유용한 방법임을 실험을 통하여 입증한다.

II. 분포정수 저역통과 여파기

1. 전달함수 및 임피던스

분포증폭기의 설계에는 저역통과 또는 대역통과 여파기가 사용된다. 그러나 광대역 통신은 대부분 저주파 증폭 기능이 필요하므로, 이에 사용되는 분포증폭기는 저역통과 여파기를 이용하는 것이 보통이다^[4]. 따라서 본 논문에서는 분포증폭기의 여파기로서 저역통과 Chebyshev 여파기를 생각한다. Chebyshev 여파기는 MIL과 리플의 조정에 의하여 개방 스텝(open stub)의 등가 정전용량을 조절할 수 있으므로, Butterworth 여파기에 비해 분포증폭기의 설계에 유리하다.

분포정수 회로망이 임의의 전기적인 길이를 갖는 전송선로로 구성되어 있고, 동일한 크기의 리플을 갖는

저역통과 특성을 가질 때, 이의 전달함수는 다음과 같이 주어진다^[9].

$$|S_{21}(S)|^2 = \frac{K_M}{1 + \epsilon^2 K(S^2)} \tag{1}$$

여기서

$$K(S^2) = \left[T_m\left(\frac{S}{S_c}\right) T_n\left(\frac{S\sqrt{1-S_c^2}}{S_c\sqrt{1-S^2}}\right) - U_m\left(\frac{S}{S_c}\right) U_n\left(\frac{S\sqrt{1-S_c^2}}{S_c\sqrt{1-S^2}}\right) \right]^2 \tag{2}$$

이다. 식 (2)에서 m과 n은 각각 저역통과 소자 및 전송선 소자의 수이며, $T_n(x)$ 와 $U_n(x)$ 는 각각 비정규화된 n계 제 1 및 제 2종 Chebyshev 다항식이다. 또한, $S = j \tan \theta = j \tan \beta l$ 은 Recharts 변수로써 $S_c = j \tan \theta_c$ 이며, θ_c 는 차단 주파수에서 주어지는 전송선로의 전기적인 길이이다. 식 (1)에서 전달함수의 MIL과 리플은 각각 $10 \log K_M$ 과 $10 \log(1 + \epsilon^2)$ 으로 주어진다.

저역통과 여파기가 무손실 전송선로로 구성되어 있다고 가정하면, 이는 유니타리 조건(unitary condition)을 만족한다. 따라서 식 (1)로부터 유도되는 여파기의 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$z(S) = \frac{1 + S_{11}(S)}{1 - S_{11}(S)} \tag{3}$$

여기서 $z(S)$ 는 여파기의 정규화된 임피던스이며, $S_{11}(S)$ 는 이의 입력 반사계수이다.

2. 정전용량 흡수 능력

분포증폭기는 사용하는 트랜지스터의 수에 따라 주파수에 대한 이득의 기울기가 변화하며, 게이트 및 드레인 로딩(loading)을 고려했을 때, 평탄한 기울기를 위한 트랜지스터의 수는 4개가 적절한 것으로 알려져 있다^[10]. 따라서 평탄한 이득이 요구되는 분포증폭기는 7

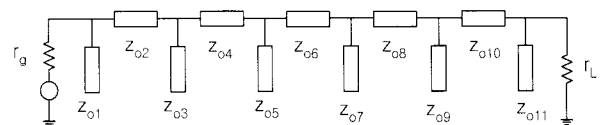


그림 1. m=6, n=5 및 $r_g=1$ 인 경우의 분포정수 저역통과 여파기
Fig. 1. Distributed low-pass filter for m=6, n=5, and $r_g=1$.

차 이상의 저역통과 여파기를 사용하여야 한다. 그러나 저역통과 여파기의 경우, 전원 및 부하 저항에 연결된 개방 스텝은 여파기를 구성하는 이외의 스텝에 비해 적은 등가 정전용량을 가지므로, 이를 이용하여 트랜지스터의 정전용량을 흡수하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 정전용량 흡수 능력을 증가시키기 위해서는 이보다 내부의 스텝을 이용하는 것이 유리하다. 이 경우, 저역통과 여파기 차수는 11차로 주어진다. $m=6$ 및 $n=5$ 의 경우, 식 (1)~(3)에 의하여 합성되는 11차 분포정수 저역통과 여파기는 그림 1과 같이 주어진다.

그림 1에서 트랜지스터의 정전용량을 특성 임피던스 ($z_{o3}, z_{o5}, z_{o7}, z_{o9}$)의 개방 스텝을 이용하여 흡수하는 경우, 이들의 등가 정전용량은 분포증폭기 전체의 성능을 좌우하게 된다. 개방 스텝의 등가 정전용량을 고찰하기 위하여 $m=6, n=5, \theta_c = 65^\circ$ 의 경우, 식 (1)~(3)을 이용하여 그림 1의 여파기를 합성한다. 이때 전달함수의 MIL과 리플에 대한 개방 스텝의 특성 임피던스 z_{o9} 및 이의 등가 정전용량 c_{o9} 는 그림 2와 같이 주어진다.

여기서 θ_c 는 분포정수 소자의 구현성과 등가 정전용량을 조정하기 위하여 적절한 값으로 선택할 수 있다. 본 논문에서는 그림 1의 여파기를 분포증폭기 설계에 이용하기 위하여 θ_c 를 65° 로 둔다.

그림 2에서 개방 스텝의 특성 임피던스는 다음의 식:

$$\omega_c C = Y \tan \theta_c \tag{4}$$

에 의하여 정전용량으로 변환된다^[11]. 여기서 C는 주파

수 ω_c 에서 계산되는 개방 스텝의 등가 정전용량이며, Y는 개방 스텝의 특성 어드미턴스이다. 그림 2의 정전용량은 $\omega_c = 1$ 로 정규화 된 경우이다.

그림 2에서 MIL이 0인 경우, 저역통과 여파기는 대칭적인 구조가 되며, z_{o3} 및 z_{o9} , z_{o5} 및 z_{o7} 은 동일한 값을 갖는다. 이 경우, z_{o9} 는 z_{o7} 보다 큰 값을 가지므로, 정전용량 흡수 능력은 z_{o9} 에 의하여 결정된다. MIL이 0이 아닌 경우, r_L 은 1미만의 값을 가지므로 여파기는 비대칭적인 구조가 되며, z_{o9} 는 z_{o3} 보다 큰 값을 갖는다. 이 경우, 정전용량 흡수 능력은 z_{o9} 에 의하여 결정되므로, 그림 2에는 z_{o9} 의 값만을 나타내었다.

그림 2로부터 전달함수의 MIL과 리플이 증가하면 개방 스텝의 특성 임피던스 z_{o9} 는 감소하며, MIL과 리플이 감소하면 z_{o9} 는 증가함을 알 수 있다. 따라서 MIL과 리플이 증가하면 개방 스텝 z_{o9} 의 등가 정전용량은 증가하며, MIL과 리플이 감소하면 z_{o9} 의 등가 정전용량은 감소함을 알 수 있다.

그림 1에서 소자들이 대칭적인 값을 갖고 전원 및 부하 저항을 동일한 값으로 유지하기 위해서는 MIL을 0dB로 두어야 하며, 개방 스텝의 등가 정전용량을 원하는 값으로 조정하기 위해서는 리플을 적절히 변화시켜야 한다. 그러나 리플을 증가시키는 경우, 여파기의 입출력 반사 특성은 악화되므로, 이의 리플은 트랜지스터의 정전용량을 흡수하는 범위 내에서 최소로 유지하여야 한다.

III. 분포증폭기

본 절에서는 정전용량 흡수 능력을 고려하여 분포정수 저역통과 여파기를 합성함으로써, 최적의 성능을 갖는 마이크로파 분포증폭기를 설계한다. 전절의 여파기 합성법을 증폭기 설계에 응용하기 위하여, 0.1~7.5GHz 대역에서 약 12.5dB의 이득과 10dB 이상의 입출력 반사 손실을 갖는 분포증폭기를 설계한다. 증폭기 설계에 사용되는 트랜지스터는 NEC사의 NE32484A이다.

1. 트랜지스터 모델링

증폭기 설계를 용이하게 하기 위하여 증폭기의 차단 주파수 7.5GHz에 10% 이상의 여유를 두어 8.4GHz의 주파수에서 트랜지스터를 모델링한다. 이때 이의 입출력 등가회로는 그림 3과 같이 주어진다.

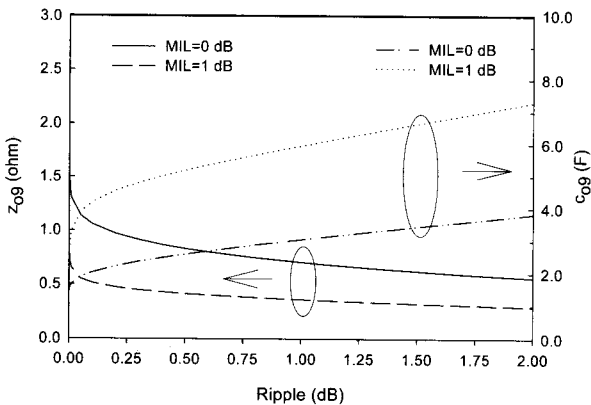


그림 2. 개방 스텝의 정규화된 특성 임피던스 및 등가 정전용량 ($m=6, n=5, \theta_c = 65^\circ$)

Fig. 2. Characteristic impedance of the open stub and its equivalent capacitance ($m=6, n=5, \theta_c = 65^\circ$).

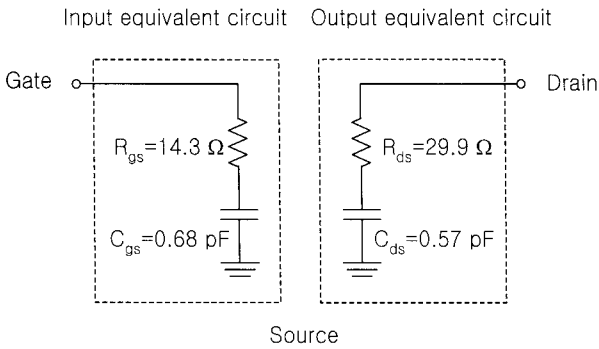


그림 3. NE32484A의 입출력 등가회로
Fig. 3. Input and output equivalent circuits of NE32484A.

그림 3에서 C_{gs} 는 C_{ds} 보다 크므로 게이트 여파기는 C_{gs} 를 완전히 흡수하도록 설계하여야 한다. 시스템 임피던스가 50Ω인 경우, 상기 트랜지스터로 구현할 수 있는 분포증폭기의 차단 주파수는 그림 3으로부터 약 9.3GHz로 계산된다^[8]. 따라서 7.5GHz의 차단 주파수를 갖는 분포증폭기는 NE32484A를 이용하여 구현이 가능하다.

한편, 4개의 NE32484A로 구성되는 분포증폭기의 구현 가능한 이득은 다음의 식^[12].

$$G \approx \frac{(ng_m Z_0)^2}{4} \quad (5)$$

에 의하여 15.6dB로 주어진다. 여기서 g_m 은 트랜지스터의 트랜스컨덕턴스이고, Z_0 는 여파기의 시스템 임피던스이다. 식 (5)는 게이트 및 드레인 여파기의 전기적 특성이 동일한 경우이므로, 실제의 경우 증폭기의 이득은 이로부터 여유를 두어 설정하여야 한다.

2. 여파기 합성

그림 1의 구조를 갖는 게이트 및 드레인 여파기를 합성할 때, 소자들이 대칭적인 값을 갖고 전원 및 부하 저항을 동일하게 유지하기 위하여 MIL을 0dB로 둔다. 또한, 개방 스텝 z_{o9} 의 등가 정전용량이 그림 3의 C_{gs} 이상 이 되도록 리플의 값을 조정할 필요가 있다. 그러나 과도한 리플은 여파기의 반사손실을 악화시키므로, 게이트 정전용량을 정확히 흡수하는 수준으로 리플을 최소화할 필요가 있다. 그림 2에 의하면 최적의 게이트 여파기는 그림 3의 C_{gs} 를 정확히 흡수하는 리플에 의하여 정의되는 여파기이다. 최적 게이트 여파기는 C_{gs} 를 흡수하는 범위 내에서 이의 반사손실을 최대한 개선하는 효과가 있으므로, 분포증폭기 역시 이에 의하여

표 1. $m=6, n=5$ 및 $\theta_c = 65^\circ$ 에 대한 분포정수 저역 통과 여파기의 소자값

Table 1. Element values of a distributed low-pass filter for $m=6, n=5$, and $\theta_c = 65^\circ$.

r_s	z_{o1}, z_{o11}	z_{o2}, z_{o10}	z_{o3}, z_{o9}	z_{o4}, z_{o8}	z_{o5}, z_{o7}	z_{o6}	r_L
1	2.114	1.285	1.153	1.360	1.066	1.374	1

반사 특성이 최대 개선된다.

그림 1의 여파기 구조에 대하여 $\theta_c = 65^\circ$ 의 경우, 8.4GHz의 주파수에서 C_{gs} 를 정확히 흡수하는 MIL과 리플의 값은 0dB 및 0.0425dB로 각각 계산된다. 이 경우, 식 (1)~(3)을 이용하여 그림 1의 여파기를 합성하면, 이의 정규화된 소자 값은 표 1과 같이 주어진다.

3. 분포증폭기 설계

게이트 및 드레인 여파기로 트랜지스터의 정전용량을 흡수하기 위해서는 먼저 개방 스텝의 등가 정전용량을 계산할 필요가 있다. 따라서 게이트 여파기는 표 1에 주어진 개방 스텝 ($z_{o3}, z_{o9}, z_{o5}, z_{o7}$)의 등가 정전용량을 식 (4)로 계산하고, 이로부터 C_{gs} 를 감한 다음, 나머지 정전용량을 특정한 전기적 길이의 전송선로로 변환함으로써 합성할 수 있다. 본 논문에서는 전송선의 구현을 용이하게 하기 위하여 이의 전기적인 길이를 35° 로 선택하였다. 드레인 여파기 또한 게이트 여파기와 같은 방법으로 합성할 수 있다.

시스템 임피던스가 50Ω인 경우, 게이트 및 드레인 여파기로 구성된 분포증폭기는 그림 4와 같이 주어진다. 그림 4에서 게이트 여파기 양단에 위치한 FET의 게이트에는 개방 스텝이 존재하지 않으므로, $\theta_c = 65^\circ$

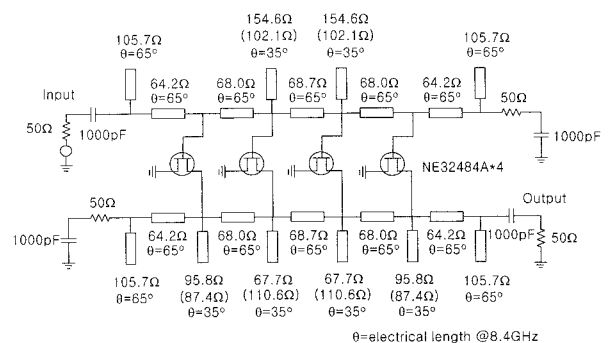


그림 4. 게이트 및 드레인 여파기의 결합에 의하여 구성되는 분포증폭기

Fig. 4. Distributed amplifier constructed by the combination of a gate and drain filter.

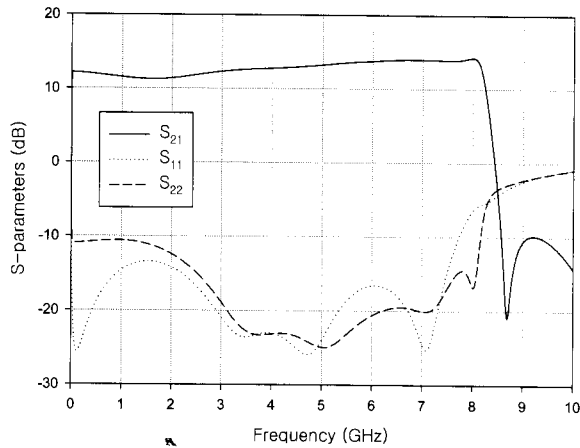


그림 5. 최적화된 분포증폭기의 주파수 특성
Fig. 5. Frequency characteristics of the optimized distributed amplifier.

인 경우 0dB의 MIL과 0.0425dB의 리플은 C_{gs} 의 정전용량을 정확히 흡수함을 알 수 있다. 그러나 C_{ds} 는 C_{gs} 보다 적은 값을 가지므로, 그림 4의 드레인 여파기에서 C_{ds} 를 흡수한 나머지의 정전용량은 개방 스텝의 형태로 존재한다. 이상의 결과를 토대로 분포증폭기의 성능을 최적화하였으며, 최적화된 소자 값은 괄호 내에 표시하였다.

최적화된 분포증폭기의 주파수 특성은 그림 5와 같이 주어진다. 그림 5에서 증폭기의 이득은 0.1~7.5GHz의 대역에서 12.6 ± 1.4 dB이며, 최소 입출력 반사 손실은 각각 13.4dB와 10.6dB이다.

4. 구현 및 실험

전절에서 설계된 분포증폭기는 두께 0.5mm, 비유전율 2.5인 Taconic사의 TLX-9 기판을 이용하여 마이크로스트립 전송선로로 구현하였다. 제작된 증폭기는 그림 6과 같다.

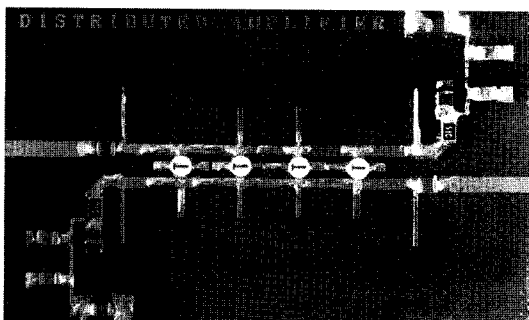


그림 6. 제작된 분포증폭기
Fig. 6. Fabricated distributed amplifier.

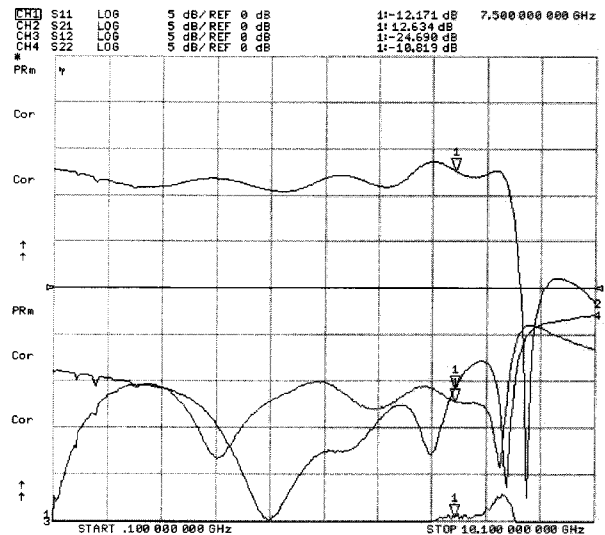


그림 7. 분포증폭기의 측정 성능
Fig. 7. Measured performance of the fabricated distributed amplifier.

구현된 증폭기의 성능은 그림 7과 같이 주어진다. 그림 7에서 증폭기의 이득은 0.1~7.5GHz의 주파수 대역에서 12.0 ± 1.6 dB이며, 최소 입출력 반사손실은 각각 10.1dB 및 9.0dB이다. 따라서 증폭기의 측정 성능을 설계 성능과 비교했을 때, 이득은 0.6dB만큼 적고 최소 입출력 반사손실은 각각 3.3dB 및 1.6dB만큼 적다. 이러한 오차는 회로 제작시 에칭(etching)으로 인한 선로 폭의 변화 및 여파기 종단 저항으로 구현된 칩저항(chip resistor)과 이상적인 부하와의 오차로 인한 것이라 사료된다. 분포증폭기의 측정 성능은 설계 성능에 근접하는 특성을 나타내므로, 정전용량 흡수 능력을 고려한 분포정수 회로합성은 분포증폭기의 설계에 효과적임을 알 수 있다.

IV. 결론

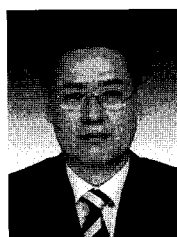
본 논문에서는 분포정수 회로합성을 이용하여 최적의 정전용량 흡수 능력을 갖는 광대역 분포증폭기를 설계하였다. 게이트 및 드레인 여파기의 전달함수는 저역 통과 Chebyshev 근사로 합성하였으며, 이들의 정전용량 흡수 능력은 여파기의 MIL과 리플의 함수로 계산하였다.

이의 응용 예로써, 0.1~7.5GHz의 주파수에서 동작하는 분포증폭기를 설계하였으며, 실험을 통하여 정전용량 흡수 능력을 고려한 분포정수 회로합성이 분포증폭기의 설계에 효과적임을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Percival, "Thermionic Valve Circuits," British Patent 460562, Jan. 1937.
- [2] S. Kimura and Y. Imai, "0-40GHz GaAs MESFET Distributed Baseband Amplifier IC's for High-Speed Optical Transmission," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-44, pp. 2076-2082, Nov. 1996.
- [3] B. J. Minnis, "A 2-18GHz Multistage Distributed Amplifier with 40dB Gain," in *IEEE Colloquium Multi-Octave Active and Passive Components and Antennas*, Digest no. 1987/35, pp. 3/1-3/4, Mar. 1987.
- [4] G. D. Vendelin, A. M. Pavio, and U. L. Rohde, *Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques*, John Wiley & Sons, pp. 288-301, 1990.
- [5] B. Y. Banyanmin and M. Berwick, "Analysis of the Performance of Four-Cascaded Single-Stage Distributed Amplifiers," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-48, pp. 2657-2663, Dec. 2000.
- [6] Aguirre, et al., "50-GHz SiGe HBT Distributed Amplifiers Employing Constant-k and m-Derived Filter Sections" *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-52, pp. 1573-1579, May 2004.
- [7] J. B. Beyer, S. N. Prasad, R. C. Becker, J. E. Nordman, and G. K. Hohenwarter, "MESFET Distributed Amplifier Design Guidelines," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-32, pp. 268-275, Mar. 1984.
- [8] A. Sweet, *MIC & MMIC Amplifier and Oscillator Circuit Design*, Artech House, pp. 120-128, 1990.
- [9] J. Helszajn, *Synthesis of Lumped Element, Distributed and Planar Filters*, McGraw-Hill Book Co, pp. 284-292, 1990.
- [10] Y. Ayasli, R. Mozzi, J. L. Vorhaus, L. D. Reynolds, and R. A. Pucel, "A Monolithic GaAs 1-13GHz Traveling-Wave Amplifier," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-30, pp. 976-981, July 1982.
- [11] R. Levy, "Synthesis of Mixed Lumped and Distributed Impedance-Transforming Filters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-20, pp. 223-233, March 1972
- [12] R. Soares, *GaAs MESFET Circuit Design*, Artech House, pp. 147-153, 1988.

— 저 자 소 개 —



김 남 태(정회원)

1986년 2월 한양대학교 공과대학
전자공학과 졸업(공학사)1988년 2월 한양대학교 대학원
전자공학과 졸업
(공학석사)1992년 2월 한양대학교 대학원
전자통신공학과 졸업
(공학박사)1992년 6월~1995년 9월 한국전자통신연구소
선임연구원2003년 8월~2005년 1월 University of
Maryland, visiting scholar1995년 10월~현재 인제대학교 전자정보통신
공학부 부교수

<주관심분야: 각종 도파계와 복사계의 전자계 해석, 광대역 무선부품 설계, 회로 설계를 위한 소자 모델링 등>