

확장된 시간영역 유한차분법을 이용한 고주파 증폭기 해석

°강희진, 노범석, 최재훈
한양대학교 전자통신전파공학과

The Analysis of Microwave Amplifier using an Extended FDTD Method

°Kang Heejin, Noh Bermseok, Choi Jaehoon

ABSTRACT

본 논문에서는 확장된 시간영역 유한차분법(Extended finite difference time domain method)을 이용하여 마이크로파 증폭기를 해석하였다. 회로에 포함되어 있는 능동 소자는 고주파 등가 회로를 이용하여 모델링 하였다. 고주파 등가 회로를 통하여 계산한 게이트와 드레인의 전류를 FDTD의 전계 계산식에 첨가함으로써 마이크로스트립 회로의 전자기파와 능동 소자와의 상호 작용을 특성 지었다. 해석 결과는 주파수 영역 회로 해석법(Frequency-domain circuit analysis)을 이용한 결과와의 비교를 통하여 정확성을 입증했다.

I. 서론

최근 무선 통신 기술이 급속하게 발달함에 따라 무선 통신 기기들의 소형화, 경량화를 구현하기 위한 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)기술이 핵심 분야로 부각되고 있다. MMIC는 다수의 불연속적인 마이크로스트립 형태의 수동 소자는 물론 능동 소자를 함께 포함하기 때문에 높은 주파수 범위에서 설계할 경우 접속 선로의 불연속에 의한 신호의 반사, 인접한 선로와 교차된 선로 사이의 누화(crosstalk), 전송 선로의 전파 지연과 분산 그리고 다른 회로 요소들 사이에서 발생하는 결합과 복사 문제에 직면하게 된다. 그러나 현재까지 많이 사용되고 있는 주파수 영역 해석법은 위의 전자기 현상을 무시하거나 근사화시켰다.

고주파의 전자기 현상을 고려하여 회로를 설계하기 위해서는 전파 해석법(Full wave analysis)을 이용하여 회로의 정확한 특성 분석이 이루어져야

한다. 현재까지 전자기 특성을 분석하기 위하여 많이 사용되는 전파 해석법은 모멘트법(moment method), 유한 요소법 (finite element method), 시간영역 유한차분법 등이 있다. 그러나 실질적인 마이크로파 회로의 경우 다수의 능·수동 소자가 집적되어 있을 뿐 아니라 능동 소자의 경우 수동 소자에 비해 물리적 크기가 매우 작기 때문에 모멘트법 혹은 유한 요소법을 사용하여 주파수 특성을 구하기는 매우 어려운 실정이다. 이러한 불연속 마이크로스트립을 비롯한 집중 소자와 능동 소자가 함께 구성되어 있는 회로의 주파수 특성을 분석하기 위하여 최근 확장된 시간영역 유한차분법(Extended FDTD method)을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Chien-Nan Kuo[1]의 경우 확장된 시간영역 유한차분법을 이용하여 저잡음 증폭기 특성을 분석하였다. 그러나 능동 소자의 등가 회로에 대한 상태방정식을 이산화시키기 위하여 비교적 오차가 큰 후심차분(backward difference)근사법을 이용하였

다. Vincent A. Thomas[2]는 집중회로를 SPICE를 이용하여 증폭기를 해석하였다.

본 논문에서는 JS-8851-AS linear microwave FET의 물리적인 특성과 드레인과 게이트의 전압 전류관계식을 이용하여 트랜지스터의 등가 모델을 구성하였다. 이 등가 모델을 이용하여 트랜지스터에 흐르는 전류를 계산하고 이를 확장된 FDTD 유한 차분식에 대입함으로써 원하는 증폭기의 주파수 특성을 계산하였다. 증폭기의 해석 결과는 V. S. Reddy[3]의 주파수 영역 해석 결과 및 유사한 방법의 시간영역 해석법을 응용한 결과와의 비교를 통하여 정확성을 입증하였다.

II. 본론

1. 능동 소자의 특성을 FDTD 알고리즘에 적용

증폭기는 능·수동소자가 혼합하여 구성되어 있음은 물론 능동 소자의 물리적 크기가 수동소자에 비해 매우 작기 때문에 일반적인 FDTD 알고리즘만을 이용하여 주파수 특성을 구하는 것은 비효율적일 뿐 아니라 매우 어렵다. 본 논문에서는 증폭기의 특성을 분석하기 위하여 FET의 능동 소자 부분을 등가 회로로 변화시킨 후 이들에 걸리는 전압과 전류를 맥스웰 방정식에 적용하여 전파의 특성을 분석하였다.

확장된 FDTD 알고리즘은 맥스웰 방정식을 이산화하여 유도할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1a)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1b)$$

\vec{J} 는 능동회로에 흐르는 전류를 FDTD식에 적용하기 위한 파라미터로써 소자의 커패시터, 인덕터, 저항, 그리고 비 선형소자(다이오드, 트랜지스터)의 함수이다. 따라서 능동소자를 포함하고 있는 확장된 유한차분식은 식(2)와 같다.

능동 회로를 FDTD기법으로 해석하기 위하여 게이트와 드레인 단자는 그림 1과 같이 각각 등가 전류원으로 대체된다.

$$E_y^{n+1}(i, j, k) = E_y^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [H_x^{n+1/2}(i, j, k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j, k-1/2)] - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_z^{n+1/2}(i+1/2, j, k) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j, k)] - \frac{\Delta t}{\epsilon} J_y^{n+1/2}(i, j, k) \quad (2)$$

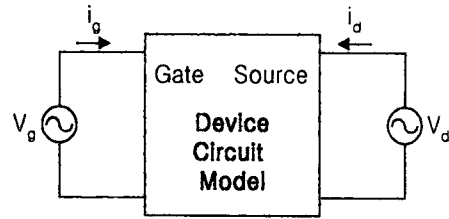


그림 1. Thevenin-equivalent 회로

트랜지스터를 포함하는 증폭기의 블록도는 그림 2에 도시하였다.

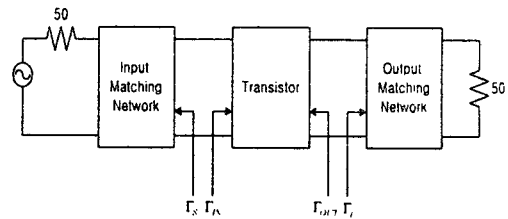


그림 2. 증폭기의 블록도

2. 트랜지스터의 S 파라미터 해석

JS-8851-AS linear microwave FET의 등가 모델은 그림 3과 같다. 각 단자에 걸리는 전압과 트랜지스터 자체의 물리적인 특성에 의하여 고주파 등가 회로의 각 소자의 값을 설정할 수 있다.

능동회로의 등가 전류를 구하기 위한 그림 3의 소신호 등가회로의 상태방정식(state equation)[4]은 다음과 같은 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$A(X) \cdot \frac{dX}{dt} = B(X) \cdot X + F(X) \quad (3)$$

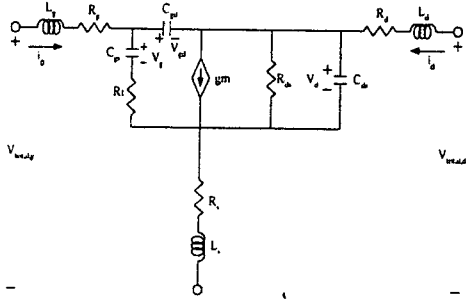


그림 3. JS-8851-AS linear microwave FET의 등가회로

벡터 X 는 상태 변수를 나타내고 행렬 A 와 B 는 회로의 각 소자들로부터 유도할 수 있다. 그리고 F 는 소스 즉 트랜지스터의 게이트와 드레인에 걸리는 전압 혹은 전류로 계산하면 된다. 그림 3의 트랜지스터 증폭 회로를 식(3)의 상태 방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{gs} \frac{dv_g}{dt} = \frac{-v_g + v_{gd} + v_d}{R_i} \quad (4a)$$

$$C_{gs} \frac{dv_g}{dt} + C_{gd} \frac{v_{gd}}{dt} = i_g \quad (4b)$$

$$C_{gd} \frac{dv_{gd}}{dt} - C_{ds} \frac{dv_d}{dt} - \frac{v_d}{R_{ds}} = -i_d + g_m v_g \quad (4c)$$

$$\begin{aligned} -v_{total,g} + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g + v_{gd} + v_d \\ + R_s(i_g + i_d) + L_s \frac{d(i_g + i_d)}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} -v_{total,d} + L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d + v_d \\ + R_s(i_g + i_d) + L_s \frac{d(i_g + i_d)}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (5b)$$

식 (4)와 (5)을 중앙차분 근사법을 이용하여 이산화시키면 식 (6), (7)과 같다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{gs}}{\Delta t} + \frac{1}{2R_i} \right) v_g^{n+1} - \left(\frac{1}{2R_i} \right) v_{gd}^{n+1} - \left(\frac{1}{2R_i} \right) v_d^{n+1} \\ & = \left(\frac{C_{gs}}{\Delta t} - \frac{1}{2R_i} \right) v_g^n + \left(\frac{1}{2R_i} \right) v_{gd}^n + \left(\frac{1}{2R_i} \right) v_d^n \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{C_{gs}}{\Delta t} v_g^{n+1} + \frac{C_{gd}}{\Delta t} v_{gd}^{n+1} \\ & = i_g^{n+1/2} + \frac{C_{gs}}{\Delta t} v_g^n + \frac{C_{gd}}{\Delta t} v_{gd}^n \end{aligned} \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{C_{gd}}{\Delta t} - \frac{g_m}{2} \right) v_{gd}^{n+1} - \left(\frac{C_{ds}}{\Delta t} + \frac{g_m}{2} + \frac{1}{2R_{ds}} \right) v_d^{n+1} \\ & = \left(\frac{C_{gd}}{\Delta t} + \frac{g_m}{2} \right) v_{gd}^n + \left(\frac{-C_{ds}}{\Delta t} + \frac{g_m}{2} + \frac{1}{2R_{ds}} \right) v_d^n \\ & - i_d^{n+1/2} \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{L_g}{\Delta t} + \frac{R_g}{2} + \frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_g^{n+1/2} \\ & + \left(\frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_d^{n+1/2} \\ & = \left(\frac{L_g}{\Delta t} - \frac{R_g}{2} - \frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_g^{n-1/2} \\ & + \left(\frac{-R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_d^{n-1/2} + v_{total,g}^n - v_{gd}^n - v_d^n \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{L_d}{\Delta t} + \frac{R_d}{2} + \frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_d^{n-1/2} \\ & + \left(\frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_g^{n-1/2} \\ & = \left(\frac{L_d}{\Delta t} - \frac{R_d}{2} - \frac{R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_d^{n-1/2} \\ & + \left(\frac{-R_s}{2} + \frac{L_s}{\Delta t} \right) i_g^{n-1/2} + v_{total,d}^n - v_d^n \end{aligned} \quad (7b)$$

최종적으로 증폭기의 주파수 특성을 구하는 절차를 기술하면 다음과 같다.

- ① $n = 0$ 일 때 $E^n = 0$ 로 한다.
- ② $n = 1/2$ 일 때 $H^{n+1/2}$ 를 구한다.
- ③ 식 (7)를 이용하여 i_g, i_d 를 계산한다.
- ④ $n = 1$ 일 때 식 (2)를 이용하여 E^{n+1} 를 구한다. 이때 능동 소자가 포함된 셀을 계산할 때는 ③과정에서 계산한 게이트와 드레인 단의 전류를 확장된 FDTD식에 적용시킨다.
- ⑤ v_g, v_{gd}, v_d 를 계산한다.
- ⑥ 위의 과정을 반복한다.

III. 해석 결과

그림 2 에 도시한 바와 같이 증폭기는 크게 트랜지스터 회로와 매칭회로의 두 부분으로 나눌 수 있다. 해석할 증폭기의 구조는 그림 4에 도시되어 있다. 50 Ω 매칭 회로를 구성하기 위하여 series와 shunt 마이크로스트립을 이용하였다.

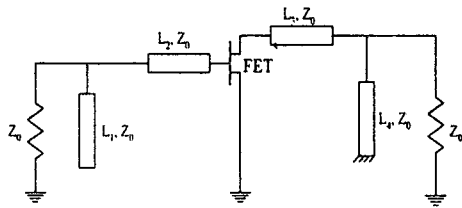


그림 4 . 해석할 증폭기의 구조

각 마이크로스트립 라인의 길이는 표 1에 기술하였다.

표 1 . 매칭 회로의 길이

L_1	L_2	L_3	L_4
17 Δx	10 Δz	22 Δz	14 Δx

JS-8851-AS linear microwave FET 등가 회로의 소자값은 표 2에 기술되어 있다.

표 2 . JS-8851-AS linear microwave FET 등가 회로의 소자값

L_g	0.37nH	R_g	1.39 Ω
L_d	0.23nH	R_d	1.3 Ω
L_s	0.02nH	R_s	0.76 Ω
C_{gd}	0.06pF	R_i	1.42 Ω
C_{ds}	0.26pF	R_{ds}	197 Ω
C_{gs}	0.69pF	g_m	65mS

마이크로스트립 라인의 폭은 특성 임피던스가 50 Ω이 되는 2.4mm이고 유전체의 두께는 0.795mm이다. 그리고 기판의 비유전율(dielectric constant)은 2.2이다. 셀 크기는 Δx 는 0.4mm, Δy 는 0.265mm, 그리고 Δz 는 0.4mm로 설정했다.

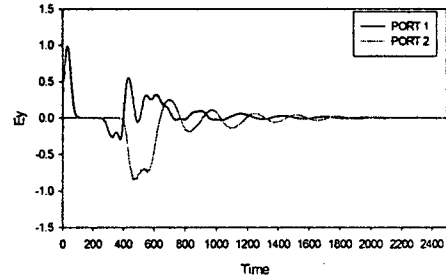


그림 5 .시간의 진행에 따른 포트1과 2에서의 전계 변화

그림 5는 가우시안 소스를 인가했을 때 포트 1과 2에서의 전계 변화를 도시한 것이다. 포트 2에서의 전계가 증폭됐음을 확인할 수 있다.

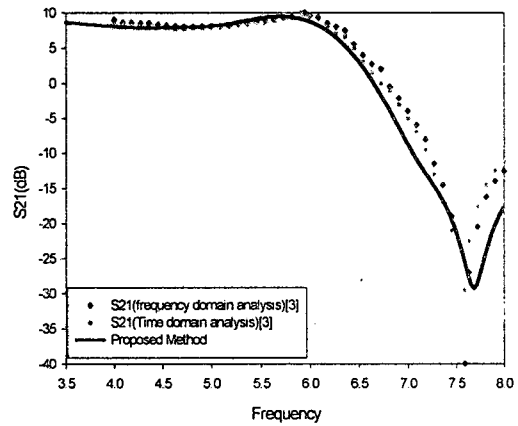


그림 6 . 증폭기의 S21

그림 6은 증폭기의 전송계수(forward transmission coefficient)를 도시한 것이다. 점으로 찍힌 그래프는 참고문헌 [3]의 계산 결과이고, 실선은 본 논문에서 제시한 방법의 결과이다. 새 방법의 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 7은 증폭기의 반사 계수(Input reflection coefficient)를 도시한 것이다. 약 5.95GHz에서 매칭이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

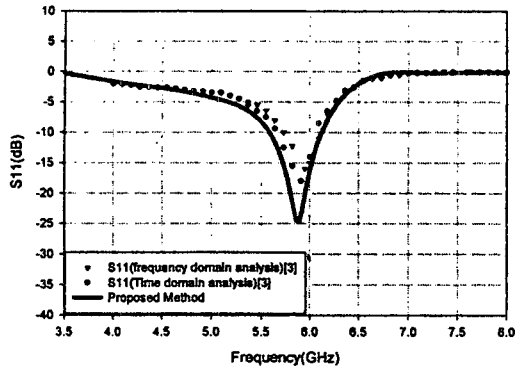


그림 7 . 증폭기의 S₁₁

IV. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 확장된 시간영역 유한차분법을 이용하여 마이크로파 증폭기를 해석하였다. 회로에 포함되어 있는 능동 소자는 고주파 등가 회로를 이용하여 모델링 하였다. 고주파 등가 회로를 통하여 계산한 게이트와 드레인의 전류를 FDTD의 전개 계산식에 첨가함으로써 마이크로스트립 회로의 전자기파와 능동 소자와의 상호 작용을 특성 지었다. 유사한 방법을 적용한 수치해석 결과와 비교함으로써 해석 결과를 입증하였다.

향후 본 논문의 이론은 선형적인 특성을 갖는 능동 회로 뿐 아니라 비선형적인 특성을 갖는 오실레이터 등의 해석에도 적용될 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제 지원에 의해 수행되었습니다.(98-0101-11-01-3)

V. 참고문헌

[1] Chien-Nan Kuo, "Full-Wave Analysis of Packaged Microwave Circuit with Active and Nonlinear Device", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, pp.819-826, May 1997.

[2] Vincent A. Thomas, "The Use of SPICE Lumped Circuits as Sub-grid Models for FDTD Analysis", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, pp. 141-143, May 1994.

[3] V. S. Reddy, "An Improved Extended FDTD Formulation for Active Microwave Circuits", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, pp. 1603-1608, September 1999.

[4] C.A.Desoer, *Basic Circuit Theory*, New Yor: McGraw-Hill, 1969.