

MESFET 채널 전류의 비선형 성분 모델링

°이재혁*, 김영식*, 양영구*, 남중진*, 김범만*
* 포항공과대학교 전자전기공학과 및 전자과특화연구센터

Modeling the nonlinear components of MESFET channel current

°Jaehyok Yi*, Youngsik Kim*, Youngoo Yang*, Joongjin Nam*, Bumman Kim*
* Dept. of Electronic & Electrical Engineering and Microwave Application Research Center
Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

The nonlinear components of MESFET channel current were modeled by extracting high order Taylor series coefficients. MESFET channel current can be expanded in a Taylor series including high order terms which represent nonlinearity. We used low frequency, about 60MHz, two tone signal as source signal to MESFET and measured harmonic components of output power. From this measurements, we extracted Taylor series coefficients up to 3rd order using Volterra analysis. Extracted coefficients of channel current model were compared with those of Pedro's channel current model showing small differences.

I. 서론

현대의 통신 시스템에서는 선형성이 우수한 증폭기를 요구하고 있다. 따라서 이러한 증폭기에 많이 사용되고 있는 소자들의 비선형성을 모델링하여 예측하는 것이 중요하다. 증폭기 소자로 많이 사용되는 MESFET은 비선형 성분들 중에서 채널 전류의 비선형 성분이 가장 크다. 채널 전류를 Taylor 급수로 전개하여 고차항의 계수들을 추출하면 채널 전류의 비선형성을 모델링할 수 있다. 본 논문에서는 Volterra 해석 방법을 이용해 MESFET의 채널 전류 모형을 만들고 저주파(약 60 MHz)에서 출력전력의 harmonic 성분들을 측정된 결과로부터 Taylor 급수의 계수를 3차항까지 추출하여 채널 전류의 비선형 성분을 모델링하였다.

II. 채널 전류 모델

MESFET의 등가 회로는 그림 1 과 같다. MESFET의 비선형 성분들은 그림 1에 나타낸 바와같이 gate-source capacitance C_{gs} 와 drain-source resistance R_{ds} , 그리고 채널 전류 세가지로 나눌 수 있다 [1]. 이들 중 채널 전류에 의한 비선형 성분이 가장 크다.

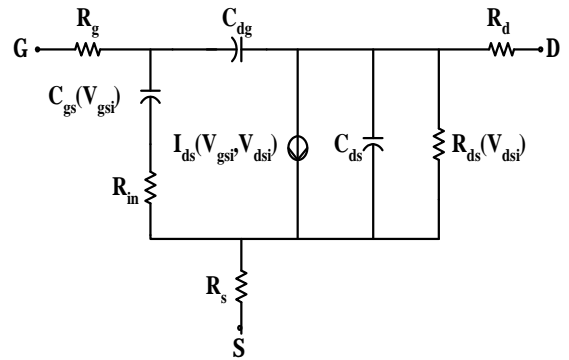


그림 1 MESFET 비선형 등가회로

채널 전류 I_{ds} 는 gate voltage와 drain voltage에 관련되고 다음과 같이 Taylor 급수 전개된다 [2].

$$\begin{aligned}
 I_{ds}(V_{gs}, V_{ds}) = & I_{DS} + \frac{\delta I_{ds}}{\delta V_{gs}} v_{gs} + \frac{\delta I_{ds}}{\delta V_{ds}} v_{ds} + \frac{1}{2} \frac{\delta^2 I_{ds}}{\delta V_{gs}^2} v_{gs}^2 \\
 & + \frac{\delta^2 I_{ds}}{\delta V_{gs} \delta V_{ds}} v_{gs} v_{ds} + \frac{1}{2} \frac{\delta^2 I_{ds}}{\delta V_{ds}^2} v_{ds}^2 \\
 & + \frac{1}{6} \frac{\delta^3 I_{ds}}{\delta V_{gs}^3} v_{gs}^3 + \frac{1}{2} \frac{\delta^3 I_{ds}}{\delta V_{gs}^2 \delta V_{ds}} v_{gs}^2 v_{ds}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{\delta^3 I_{ds}}{\delta V_{gs} \delta V_{ds}^2} v_{gs} v_{ds}^2 + \frac{1}{6} \frac{\delta^3 I_{ds}}{\delta V_{ds}^3} v_{ds}^3 + \dots$$

위 식을 incremental 전압과 전류에 대한 항으로 3차까지 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{ds}(v_{gs}, v_{ds}) &= G_m v_{gs} + G_d v_{ds} \\ &+ G_{m2} v_{gs}^2 + G_{md} v_{gs} v_{ds} + G_{d2} v_{ds}^2 \\ &+ G_{m3} v_{gs}^3 + G_{m2d} v_{gs}^2 v_{ds} \\ &+ G_{md2} v_{gs} v_{ds}^2 + G_{d3} v_{ds}^3 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 2차 이상의 고차항들이 비선형 성분을 발생시키므로 고차항의 계수를 찾으면 채널 전류의 비선형성을 모델링할 수 있다. 고차항의 계수를 찾기 위해 비선형 전류 Volterra 해석 방법을 이용했다 [3].

III. 계수 추출방법 및 저주파 harmonic 출력전력 측정

저주파수에서는 capacitance를 무시할 수 있으므로 MESFET 등가회로를 아래 그림 2와 같이 간략화 할 수 있다.

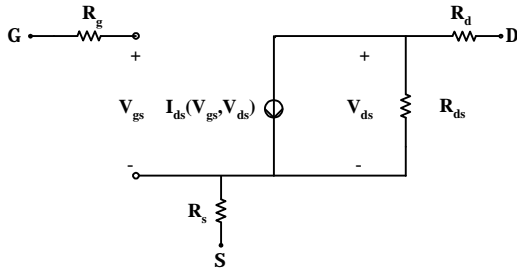


그림 2 저주파에서의 MESFET 등가 회로

채널 전류와 gate에 인가되는 입력 전압 V_s , 그리고 MESFET의 내부 전압 v_{gs} , v_{ds} 와의 관계는 아래 식과 같이 유도할 수 있다.

$$v_{gs} = \frac{[1 + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))] V_s(f)}{1 + G_m R_s + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))} - \frac{R_s I_n(f)}{1 + G_m R_s + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))} \quad (3)$$

$$v_{ds} = - \frac{(R_d + R_s + Z_L(f)) G_m V_s(f)}{1 + G_m R_s + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))} - \frac{(R_d + R_s + Z_L(f)) I_n(f)}{1 + G_m R_s + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))} \quad (4)$$

채널 전류의 2차 harmonic 성분들, 즉 $I_2(2f_1)$,

$I_2(2f_2)$, $I_2(f_1+f_2)$, $I_2(f_2-f_1)$ 들은 다음 식과 같다.

$$I_2(2f_1) = \frac{1}{2} G_{m2} [v_{gs}^2(f_1)] + \frac{1}{2} G_{d2} [v_{ds}^2(f_1)] + \frac{1}{2} G_{md} [v_{gs}(f_1) v_{ds}(f_1)] \quad (5)$$

$$I_2(2f_2) = \frac{1}{2} G_{m2} [v_{gs}^2(f_2)] + \frac{1}{2} G_{d2} [v_{ds}^2(f_2)] + \frac{1}{2} G_{md} [v_{gs}(f_2) v_{ds}(f_2)] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_2(f_1+f_2) &= G_{m2} [v_{gs}(f_1) v_{gs}(f_2)] \\ &+ G_{d2} [v_{ds}(f_1) v_{ds}(f_2)] \\ &+ \frac{1}{2} G_{md} [v_{gs}(f_1) v_{ds}(f_2) + v_{gs}(f_2) v_{ds}(f_1)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_2(f_2-f_1) &= G_{m2} [v_{gs}^*(f_1) v_{gs}(f_2)] \\ &+ G_{d2} [v_{ds}^*(f_1) v_{ds}(f_2)] \\ &+ \frac{1}{2} G_{md} [v_{gs}^*(f_1) v_{ds}(f_2) + v_{gs}(f_2) v_{ds}^*(f_1)] \end{aligned} \quad (8)$$

채널 전류의 3차 harmonic 성분들, 즉 $I_3(3f_1)$, $I_3(3f_2)$, $I_3(2f_1+f_2)$, $I_3(2f_2+f_1)$, $I_3(2f_1-f_2)$, $I_3(2f_2-f_1)$ 들도 이와 유사하게 전개된다.

$$\begin{aligned} I_3(3f_1) &= \frac{1}{4} G_{m3} [v_{gs}^3(f_1) + 3v_{gs}^2(2f_1) v_{gs}^*(f_1)] \\ &+ \frac{1}{4} G_{d3} [v_{ds}^3(f_1) + 3v_{ds}^2(2f_1) v_{ds}^*(f_1)] \\ &+ \frac{1}{4} G_{m2d} [v_{gs}^2(f_1) v_{ds}(f_1) + v_{gs}^2(2f_1) v_{ds}^*(f_1)] \\ &+ \frac{1}{4} G_{md2} [v_{gs}(f_1) v_{ds}^2(f_1) + v_{gs}^*(f_1) v_{ds}^2(2f_1)] \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5)-(9)를 살펴보면 채널 전류의 각 harmonic 성분은 낮은 차수의 성분들로 구성됨을 알 수 있다. 측정되는 harmonic 출력전력 성분과 채널전류 사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$P_{no}(f) = \frac{1}{2} \text{Re} \left[Z_L(f) \times \left| \frac{I_n(f)}{1 + G_m R_s + G_d(R_d + R_s + Z_L(f))} \right|^2 \right] \quad (10)$$

고차항의 계수들, G_{m2} , G_{md} , G_{d2} , G_{m3} , G_{m2d} , G_{md2} , G_{d3} 를 추출하는 방법은 식 (3)-(4)를 이용하여 v_{gs} , v_{ds} 를 구하고 식 (10)에서 측정된 출력전력의 harmonic 성분으로부터 채널 전류를 구하면 식 (5)-(9)를 이용하여 고차항의 계수들을 구할 수 있다. 1차항의 계수 G_m , G_d 는 소신호 S-parameter 측정이나 on-biased pulsed IV 측정으로 구할 수 있다 [4].

아래 그림 3은 harmonic 출력전력을 측정하

기 위한 setup이다. MESFET 입력에 저주파 two tone 신호를 인가하고 출력에서 spectrum analyzer로 입력 신호에 대한 harmonic 응답 전력 성분을 측정한다.

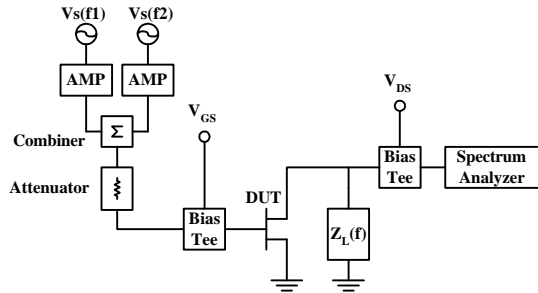
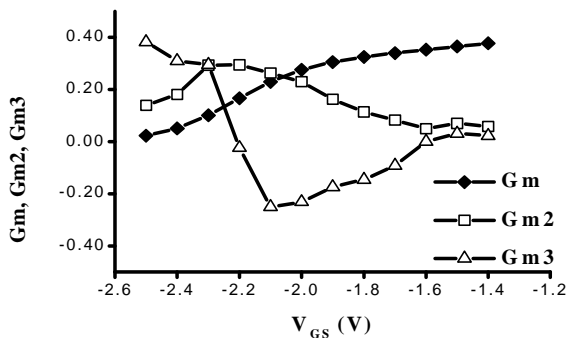


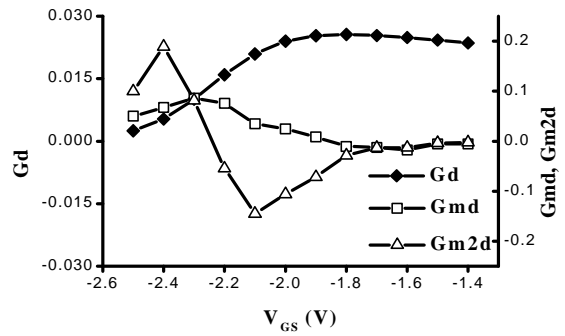
그림 3 harmonic 출력전력 측정 setup

계수들을 추출할 때 독립된 식을 유도하기 위해서 부하 저항 Z_L 은 측정 주파수 대역에서 크기와 위상이 주파수에 따라 변하도록 설계되었다. 이렇게 설계된 부하 저항은 채널 전류의 harmonic 성분들을 주파수에 따라 차이가 나도록 해 준다.

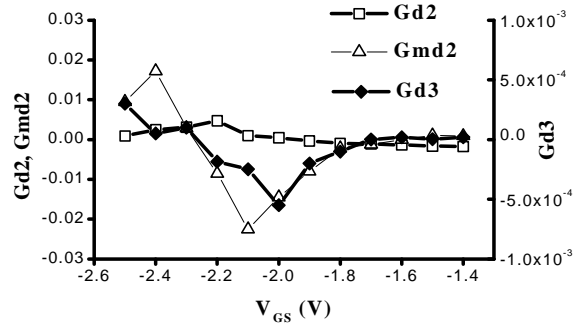
본 실험에서 사용된 입력 신호의 주파수는 $f_1=50\text{MHz}$, $f_2=80\text{MHz}$ 이고 전력은 spectrum analyzer에서 검출되는 출력전력의 harmonic 성분들이 잡음 수준 이상 되도록 인가하였다. 채널 전류 모형을 위해 사용된 MESFET 소자는 OKI KGF-1284이다. Drain bias는 3.5 V로 고정시키고 gate bias는 -2.5 V에서 -1.3 V 사이로 바꾸며 각 점에서 고차항의 계수들을 추출하였다. 추출된 결과는 아래 그림4와 같다.



(a) G_m , G_{m2} , G_{m3}



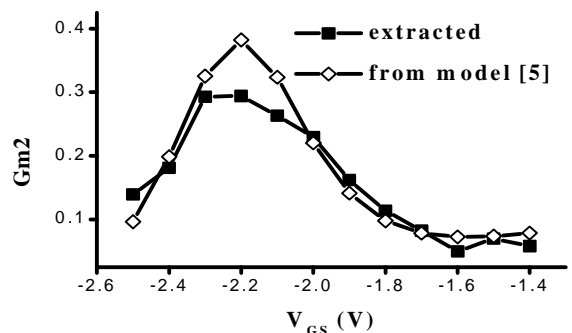
(b) G_d , G_{md} , G_{m2d}



(c) G_{d2} , G_{md2} , G_{d3}

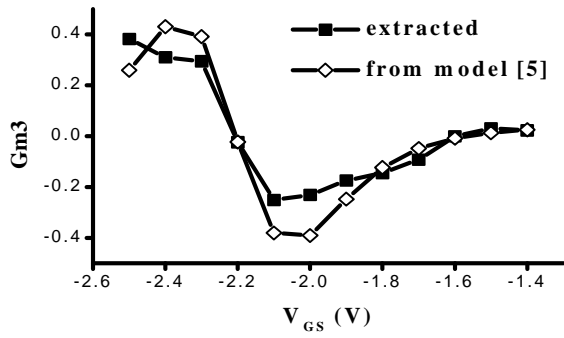
그림 4 추출된 채널 전류 고차항 계수

그림 5에서는 추출된 계수들을 기존의 MESFET 대신 신호 모형에서 사용되는 채널 전류 모형의 고차 미분항들과 비교하였다. 비교에 사용된 모형은 Pedro 모형 [5]으로 채널 전류의 고차 미분항 특성을 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다.

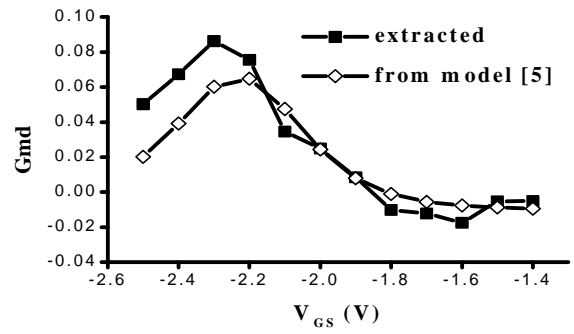


(a) G_{m2}

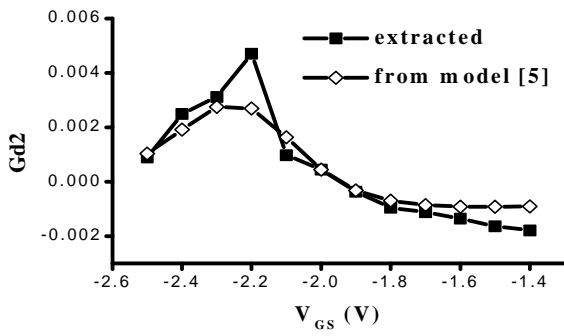
그림 5 추출된 계수와 채널 전류 모형 [5]의 고차 미분항 비교 (계속)



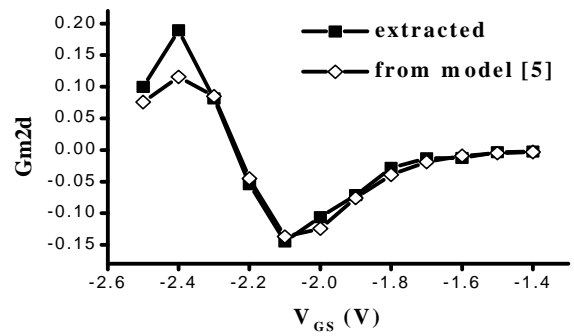
(b) G_{m3}



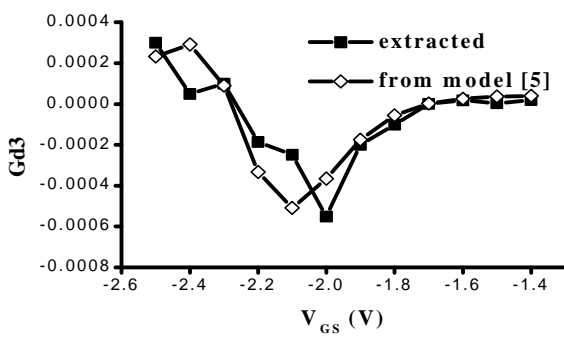
(e) G_{md}



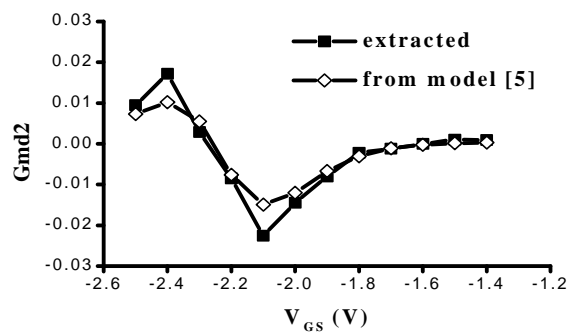
(c) G_{d2}



(f) G_{m2d}



(d) G_{d3}



(g) G_{md2}

그림 5 추출된 계수와 채널 전류 모형 [5]의 고차 미분항 비교

비교한 결과 비선형성이 큰 영역, 즉 gate bias가 낮은 부분에서 비교적 큰 차이를 보이고 선형적인 영역, 즉 gate bias가 높은 부분에서는 차이가 적음을 알 수 있다. Volterra 해석은 기본적으로 비선형성이 작은 경우를 가정하고 있으므로 비선형성이 큰 부분에서 이러한 오차가 생긴다.

IV. 결론

OKI KGF-1284 MESFET소자의 채널 전류의 비선형 성분을 모델링해 보았다. 약 60MHz의 저주파 two tone 신호를 사용하여 harmonic 출력 전력을 측정하고 Volterra 해석 방법을 이용해 채널 전류의 Taylor 급수 전개식에서 고차항의 계수를 3차까지 추출하였다. 추출된 결과를 기존의 Pedro 채널 전류 모형의 고차 미분항과 비교하였을 때 비선형성이 큰 부분을 제외한 영역에서 모델링한 비선형 채널 모형이 잘 맞음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Stephen A. Maas, and Andrea Crosmun, "Modeling the gate I/V characteristic of a GaAs MESFET for Volterra-Series analysis," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 37, No. 7, pp. 1134-1136, 1989.
- [2] Jose Carlos Pedro and Jorge Perez, "Accurate simulation of GaAs MESFET's intermodulation distortion using a new drain-source current model," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 1, pp. 25-33, 1994.
- [3] Stephen A. Maas, *Nonlinear microwave circuits*, Artech House, 1988.
- [4] 노태문, 김영식, 김영웅, 박위상, 김범만, "바이어스 효과를 포함하는 GaAs MESFET의 새로운 비선형 채널 전류 모형," *전자공학회논문지*, 제 34권, D편, 제4호, pp. 247-256, 1997.
- [5] Jose Carlos Pedro and Jorge Perez, "A novel non-linear GaAs FET model for intermodulation analysis in general purpose harmonic-balance simulators," *European Microwave Conference Digest*, pp. 714-717, 1993.