

Нелинейная модель полевого транзистора на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей

С.А. Богданов

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей разработана нелинейная модель полевого транзистора, особенностью которой является возможность обучения нейронных сетей, используемых для аппроксимации вольтамперной характеристики и емкостей затвор-сток и затвор-исток нелинейной модели транзистора встроенными в популярные СВЧ САПР алгоритмами оптимизации. Это позволяет использовать известные преимущества нейронных сетей в задачах аппроксимации функций для повышения достоверности результатов нелинейного моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов.

Ключевые слова: нелинейная модель полевого транзистора, искусственные нейронные сети, радиальная базисная сеть, функция активации, «SoftPlus».

1. Введение

В настоящее время предъявляются повышенные требования к спектральной эффективности, электромагнитной совместимости, динамическому диапазону и линейности передаточных характеристик, разрабатываемых монолитных интегральных схем и СВЧ-устройств. При этом, особое внимание уделяют достоверности нелинейных моделей активных элементов в широком диапазоне рабочих частот, температур и питающих напряжений, поскольку результаты моделирования указанных характеристик проектируемых устройств во многом определяются адекватностью применяемых моделей.

В популярных САПР СВЧ-устройств широко распространены модели полевых транзисторов, реализованные в виде эквивалентных схем, в которых зависимости параметров нелинейных элементов от температуры и питающих напряжений аппроксимируются аналитическими функциями [1].

За рубежом активно разрабатываются нелинейные модели транзисторов на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей (ИНС) [2-6]. Такие модели представляют собой одну или совокупность из нескольких математических моделей ИНС моделирующих поведение транзистора. Количество нейронов в рассматриваемых моделях транзисторов на основе ИНС варьируется от десятков до сотен. Выбор архитектуры и процесс обучения ИНС требует применения специализированного программного обеспечения с высокопроизводительными алгоритмами, что существенно усложняет разработку модели транзистора. Кроме того, нетривиально решение задачи экспорта таких моделей в популярные САПР СВЧ-устройств. Разработанные модели транзисторов с использованием математического аппарата теории ИНС демонстрируют высокую точность прогнозирования характеристик транзистора, которая в ряде случаев достигает единиц процентов [4], также к достоинствам таких моделей относят универсальность, независимость методики получения модели от типа транзистора, высокое быстродействие и оперативность разработки [1].

В работе предпринята попытка объединить преимущества эмпирических нелинейных моделей полевых транзисторов, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Целью работы является разработка нелинейной модели полевого транзистора с использованием математического аппарата теории искусственных нейронных сетей для улучшения достоверности моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов.

2. Модель полевого транзистора

Одной из универсальных эмпирических моделей полевых транзисторов является модель Ангелова [7], в которой предложены следующие функциональные зависимости для аппроксимации емкостей затвор-исток C_{gs} , затвор-сток C_{gd} , а также тока стока I_d от напряжений затвор-исток V_{gs} и сток-исток V_{ds} :

$$C_{gs}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gs0}(1 + \tanh(\psi_1(V_{gs}))) (1 + \tanh(\psi_2(V_{ds}))) \quad (1)$$

$$C_{gd}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gd0}(1 + \tanh(\psi_3(V_{gs}))) (1 - \tanh(\psi_4(V_{ds}, V_{gs}))) \quad (2)$$

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))) \right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}) \quad (3)$$

где $\psi_1(V_{gs})$, $\psi_2(V_{ds})$, $\psi_3(V_{gs})$, $\psi_4(V_{ds}, V_{gs})$, $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ - полиномиальные функции, а C_{gs0} , C_{gd0} , I_{pk} , λ , α - параметры модели [7].

При всех известных достоинствах модели Ангелова [7], к одному из ее недостатков относят низкую достоверность при моделировании нелинейных искажений, обусловленную недостаточно хорошей аппроксимацией крутизны транзистора при описании ВАХ с помощью (3) [8-10]. Несмотря на потенциальную возможность повышения точности моделирования ВАХ (3) путем использования в $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ полиномов более высокого порядка, на практике это не всегда удается реализовать.

В то же время математический аппарат теории ИНС находит широкое применение для решения прикладных задач оптимизации, прогнозирования, управления, классификации, а также аппроксимации функций многих переменных с очень большой точностью [11, 12]. Таким образом, повысить достоверность моделирования ВАХ и крутизны транзистора можно путем замены в (3) полиномиальной функции $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ на функцию $R(V_{gs}, V_{ds})$, синтезируемую с помощью математической модели ИНС.

Анализ характеристик функций активации нейронов и различных архитектур ИНС позволяет предложить для синтеза функции $R(V_{gs}, V_{ds})$ радиальную базисную сеть (РБС). Разложение по радиальным базисным функциям может быть реализовано на двухслойной нейронной сети, первый слой которой состоит из радиальных базисных нейронов, а второй – из единственного нейрона с линейной характеристикой, на котором реализуется суммирование выходов нейронов первого слоя.

Вход функции активации РБС определяется как модуль разности вектора весов \mathbf{w} и вектора входа \mathbf{p} , умноженный на смещение \mathbf{b} . Функция активации РБС имеет вид:

$$f(n) = e^{-n^2},$$

где $n = \|\mathbf{x} - \mathbf{w}\| \cdot \mathbf{b}$, где \mathbf{x} вектор входных переменных, \mathbf{w} вектор-строка весов, \mathbf{b} вектор-столбец смещений, а результатом операции $\|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|$ является вектор из элементов $S_i = |x_i - w_i|$, которые определяются расстояниями между i -м вектором входа \mathbf{x} и i -й вектор-строкой весов.

В случае двух входных переменных V_{gs} и V_{ds} ($i=2$) выход отдельного j -го нейрона первого слоя имеет вид:

$$F_j(V_{gs}, V_{ds}) = \exp\left(-b_{i-1,j}^2 (V_{gs} - w_{i-1,j})^2 - b_{i,j}^2 (V_{ds} - w_{i,j})^2\right)$$

а на выходе РБС из m нейронов в скрытом слое имеем

$$R(V_{gs}, V_{ds}) = c + \sum_{j=1}^m a_j F_j(V_{gs}, V_{ds}).$$

Таким образом ВАХ нелинейной модели полевого транзистора с применением математического аппарата теории ИНС может быть представлена в виде:

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(R(V_{gs}, V_{ds}))\right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}) \quad (4)$$

Выражения (1) и (2) с точностью 5-10 % [7] описывают нелинейные зависимости емкостей затвор-исток C_{gs} и затвор-сток C_{gd} от приложенных напряжений даже при использовании линейных зависимостей в функциях ψ_1, ψ_2, ψ_3 и ψ_4 . Во многих случаях этого достаточно.

Для аппроксимации нелинейных зависимостей зарядов Q_{gs} и Q_{gd} в качестве альтернативы (1) и (2) может быть предложена архитектура двухслойной ИНС [12], с линейной функцией активации в выходном слое и с так называемой «SoftPlus» [13] функцией активации нейронов в скрытом слое:

$$f_1(a_m) = \ln(1 + e^{a_m}) \quad (5)$$

Функция активации «SoftPlus» (5) имеет следующие особенности – она монотонная, а ее производная представляет собой сигмоидальную функцию:

$$\frac{\partial f(a_m)}{\partial a_m} = \frac{1}{1 + e^{-a_m}} \quad (6)$$

Таким образом, выражения для зарядов Q_{gd} и Q_{gs} как результат аппроксимации двухслойной нейронной сетью на основе функции «SoftPlus» будут иметь вид:

$$Q(V_{gs}, V_{ds}) = \sum_{j=1}^m a_j \ln\left[1 + \exp(w_{i-1,j} V_{gs} + w_{i,j} V_{ds} + b_j)\right] \quad (7)$$

В отличие от известных выражений для зарядов Q_{gs} и Q_{gd} , полученных из физических соображений в [14] для барьерной емкости контакта Шоттки в случае однородно легированного полупроводника, функция (7) не имеет разрывов.

3. Оценка достоверности модели

Для апробации разработанной модели было проведено экспериментальное исследование ВАХ и S-параметров GaAs НЕМТ транзистора производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» в диапазоне частот 0,5 – 18 ГГц для следующих значений величин питающих напряжений и их приращений: $-2,5 \text{ В} \leq V_{gs} \leq 0,5 \text{ В}$, $\Delta V_{gs} = 0,1 \text{ В}$ и $0 \text{ В} \leq V_{ds} \leq 5 \text{ В}$, $\Delta V_{ds} = 0,2 \text{ В}$. Используя известные методики экстракции параметров паразитных элементов эквивалентной схемы транзистора [15], а также с помощью оптимизации по Y- и Z-параметрам при всех значениях питающих напряжений в указанном диапазоне частот строились две нелинейные модели – модель Ангелова [7] с C_{gs} , C_{gd} и I_d определяемыми выражениями (1) - (3) соответственно и нелинейная

модель, разработанная на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей, где зависимости Q_{gd} , Q_{gs} и I_d заданы выражениями (7) и (4). Количество нейронов скрытого слоя в РБС для описания ВАХ и в скрытом слое нейронной сети для описания зарядовой модели – пять. В модели Ангелова при описании ВАХ (3) функция $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ была представлена полиномом 5-го порядка.

Для оценки достоверности моделирования S-параметров транзистора в зависимости от частоты и напряжения затвор-исток в области насыщения для моделей Ангелова и модели на основе математического аппарата теории ИНС (модель на основе ИНС) определялись величины максимального отклонения результатов моделирования и эксперимента по каждому из S-параметров $\max \Delta S = \max(|S_{\text{мод}} - S_{\text{эксн}}|)$, среднее арифметическое отклонение $\sum \Delta S / N$, а также среднее арифметическое величины относительного отклонения теоретической и экспериментальной поверхностей S-параметров $\sum \delta S / N = \frac{100\%}{N} \sum \left| \frac{S_{\text{мод}} - S_{\text{эксн}}}{S_{\text{эксн}}} \right|$, где N – количество анализируемых точек. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Оценка достоверности моделей

S-параметр	Критерии оценки достоверности	Модель Ангелова	Модель на основе ИНС
S11	$\max \Delta S11$	0,3773	0,1075
	$\sum \Delta S11 / N$	0,1028	0,0226
	$\sum \delta S11 / N, \%$	11,6	2,6
S12	$\max \Delta S12$	0,04898	0,022
	$\sum \Delta S12 / N$	0,0176	0,0071
	$\sum \delta S12 / N, \%$	31,6	11,6
S21	$\max \Delta S21$	1,712	1,608
	$\sum \Delta S21 / N$	0,1623	0,078
	$\sum \delta S21 / N, \%$	21,0	10,1
S22	$\max \Delta S22$	0,539	0,129
	$\sum \Delta S22 / N$	0,217	0,0483
	$\sum \delta S22 / N, \%$	28,4	6,5

Как видно из таблицы 1, модель полевого транзистора, разработанная на основе математического аппарата теории ИНС по рассматриваемым критериям, превосходит по достоверности моделирования S-параметров классическую модель Ангелова [7], что позволяет надеяться на ее потенциально более высокую точность и при моделировании нелинейных искажений.

4. Заключение

Анализ результатов моделирования, позволяет предположить, что разработанная нелинейная модель полевого транзистора на основе математического аппарата теории ИНС позволит повысить достоверность моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов. В разработанной модели удалось объединить рассмотренные преимущества эмпирических нелинейных моделей полевых транзисторов, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Продемонстрированный в работе подход по применению математического

аппарата теории ИНС при разработке нелинейной модели полевого транзистора позволяет производить разработку и использование нелинейных моделей активных элементов СВЧ электроники на основе нейронных сетей непосредственно в схемотехнических САПР, используя возможности их методов оптимизации. Указанный подход расширяет возможности поиска новых технических решений по улучшению параметров и характеристик радиоэлектронной аппаратуры.

Список литературы

1. Коколов А. А., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И. Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов // Доклады ТУСУР. 2010. № 2-1 (22). с. 118-126.
2. Qi-Jun Zhang, K. C. Gupta and V. K. Devabhaktuni, "Artificial neural networks for RF and microwave design - from theory to practice," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, vol. 51, no. 4, pp. 1339-1350, doi: 10.1109/TMTT.2003.809179.
3. J. Gao, L. Zhang, J. Xu and Q. -J. Zhang, "Nonlinear HEMT Modeling Using Artificial Neural Network Technique," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005, pp. 469-472, doi: 10.1109/MWSYM.2005.1516631.
4. M. S. Alam, O. Farooq, Izharuddin and G. A. Armstrong, "Artificial Neural Network Based Modeling of GaAs HBT and Power Amplifier Design for Wireless Communication System," 2006 International Conference on Microelectronics, 2006, pp. 103-106, doi: 10.1109/ICM.2006.373277.
5. W. Liu, W. Na, L. Zhu, J. Ma and Q. -J. Zhang, "A Wiener-Type Dynamic Neural Network Approach to the Modeling of Nonlinear Microwave Devices," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 6, pp. 2043-2062, June 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2657501.
6. W. Hu, H. Luo, X. Yan and Y. -X. Guo, "An Accurate Neural Network-Based Consistent Gate Charge Model for GaN HEMTs by Refining Intrinsic Capacitances," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, vol. 69, no. 7, pp. 3208-3218, doi: 10.1109/TMTT.2021.3076064.
7. I. Angelov, H. Zirath and N. Rorsman, "A new empirical nonlinear model for HEMT-devices," 1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest, 1992, pp. 1583-1586 vol.3, doi: 10.1109/MWSYM.1992.188320.
8. Angelov, K. Andersson, D. Schreurs, D. Xiao, N. Rorsman, V. Desmaris, M. Sudow, and H. Zirath, "Large-signal modelling and comparison of AlGaIn/GaN HEMTs and SiC MESFETs," in Asia-Pacific Microw. Conf., 2006, pp. 279-282.
9. A. Sayed and G. Boeck, "An empirical large signal model for silicon carbide MESFETs," in Gallium Arsenide and Other Semicond. Appl. Symp., 2005, pp. 313-316.
10. K. S. Yuk and G. R. Branner, "An empirical large-Signal model for SiC MESFETs with self-heating thermal model," IEEE Trans. MTT., 2008, vol.56, no. 11, pp. 2671-2680,
11. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012.
12. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001.
13. P. M. Baggenstoss, "A Neural Network Based on First Principles," ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020, pp. 4002-4006, doi: 10.1109/ICASSP40776.2020.9054549.
14. H. Statz, P. Newman, I. W. Smith, R. A. Pucel and H. A. Haus, "GaAs FET device and circuit simulation in SPICE," in IEEE Transactions on Electron Devices, 1987, vol. 34, no. 2, pp. 160-169, doi: 10.1109/T-ED.1987.22902.
15. Matthias Rudolph, Christian Fager, David E. Root. Nonlinear transistor model parameter extraction techniques /Cambridge Academ, 2011, 366 pages, ISBN: 9780521762106