

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА СВЧ-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАЛОСИГНАЛЬНОЙ ШУМОВОЙ МОДЕЛИ

Д. В. Билевич, младший научный сотрудник лаборатории «50ohm Lab» ТУСУР, Томск, Россия;
orcid.org/0000-0001-7421-7403, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru

А. А. Попов, младший научный сотрудник лаборатории «50ohm Lab» ТУСУР, Томск, Россия;
orcid.org/0000-0001-6010-4459, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru

И. М. Добуш, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории «50ohm Lab» ТУСУР, Томск, Россия;
orcid.org/0000-0002-3626-1419, e-mail: igadobush@gmail.com

А. Е. Горяинов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории «50ohm Lab» ТУСУР, Томск, Россия;
orcid.org/0000-0003-3363-407X, e-mail: goryainov.alex@gmail.com

Ю. А. Новичкова, бакалавр ТУСУР, Томск, Россия;
orcid.org/0000-0002-7987-7192, e-mail: yulya.novichkova21@gmail.com

Рассматривается задача предварительной обработки результатов измерений СВЧ-транзистора при построении малосигнальной шумовой модели с последующим её применением в процессе проектирования. Целью работы является проверка применимости методов устранения шума из измеренных данных в процессе построения малосигнальных шумовых моделей транзистора. Предварительно проведена проверка четырёх методов сглаживания на искусственно зашумлённых модельных данных. Было установлено, что ошибка устранения шума методом Савицкого-Голея на искусственно зашумлённых данных не превышает 2,5 %. Применимость метода экспериментально проверялась при построении малосигнальной шумовой модели СВЧ-транзистора. С использованием построенной модели проведено проектирование и последующее изготовление тестовой монолитной интегральной схемы (МИС) двухкаскадного малошумящего усилителя. Отклонение результатов измерения от результатов моделирования составило менее 10 % как для коэффициента усиления, так и для коэффициента шума. Это позволяет говорить о возможности применять процедуру сглаживания к измерениям коэффициента шума методом Савицкого-Голея в процессе построения малосигнальной шумовой модели.

Ключевые слова: малосигнальная модель транзистора, шумовая модель транзистора, коэффициент шума, методы сглаживания, малошумящий усилитель.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-34-44

Введение

При проектировании малошумящих усилителей используют малосигнальные шумовые модели транзисторов. Точность проектирования напрямую зависит от точности применяемых моделей. Важно, чтобы используемые модели точно воспроизводили не только параметры рассеяния, но и шумовые параметры. Построение модели осуществляется с использованием измеренных характеристик. Каждое измерение представляет собой сумму полезного сигнала, случайных шумов и систематических погрешностей измерений. При использовании специализированного оборудования для измерений качество измерений зависит от таких факторов, как: выбранный метод калибровки измерительных установок перед проведением измерений, качество калибровочных мер, квалификация инженера, проводящего измерения. Процедуры калибровки позволяют выявить и уменьшить систематические составляющие погрешности. После проведении процедуры калибровки, полученные измерения имеют две составляющие: полезный сигнал и случайный шум. Шум подразделяют на три категории: белый шум, небелый шум, импульсный и точечный шум [1].

Устранение шума из результатов измерений является важной задачей при построении моделей элементов и компонентов СВЧ МИС. При этом есть величины, которые измеряются на границе чувствительности прибора, и при их измерении принципиально невозможно уменьшить большой разброс в получаемых данных. К таким величинам относятся, в том числе, рассматриваемые в данной работе шумовые параметры транзистора. При построении модели это затрудняет сравнение результатов моделирования с измерениями. Поэтому перед разработчиком моделей зачастую стоит задача снизить уровень зашумлённости исходных данных.

Методы сглаживания результатов измерений довольно часто применяются в радиотехнике при решении различных задач, связанных с большими шумами в результатах измерений. В работе [2] предложена новая сегментированная полиномиальная модель для описания интермодуляционных эффектов высших порядков в пассивных элементах, при этом сглаживание методом Савицкого-Голея использовано для предварительной обработки результатов измерения, используемых для построения такой модели. В работе [3] представлено применение метода скользящего среднего для обработки данных, полученных с антенны радара непрерывного излучения с частотной модуляцией, установленного в автомобильных радарах бокового обзора. Использование этого метода позволило снизить колебания в полученных данных и повысить точность обнаружения автомобилей. Применяются такие методы также и в оптических измерениях. Например, в [4] показано, что применение сглаживания с помощью вейвлет-преобразования позволяет повысить соотношение сигнал-шум в задаче измерения температуры с помощью когерентной оптической рефлектометрии.

В области обработки результатов измерений существует ряд алгоритмов для сглаживания данных: медианное сглаживание, метод скользящего среднего, метод Савицкого-Голея, фильтр Калмана, фильтрация с использованием преобразования Фурье и фильтрация, основанная на вейвлет-преобразовании. Медианное сглаживание очень точно обнаруживает и фильтрует точечные шумы (выбросы), однако, теряет точность определения сигнала на краях временной области [1]. В свою очередь фильтрация с использованием преобразования Фурье достаточно точно исключает шум из измерений, состоящих из периодических колебаний [5]. Если положение базовой линии и ожидаемая ширина пика заранее известны, то вместо фильтрации преобразованием Фурье можно воспользоваться фильтрацией на основе вейвлет-преобразования [6, 7].

Постановка задачи

В рамках данной статьи будет рассмотрен процесс обработки измерений коэффициента шума в тракте 50 Ом СВЧ транзистора, изготовленного по технологии 0,15 мкм GaAs pHEMT, с общей шириной затвора 4x40 мкм. Измерения данной характеристики всегда имеют большой уровень шумов. Это связано с тем, что транзистор не согласован с генератором шума, который используется в измерениях. Эффект от этого рассогласования проявляется в виде пульсаций [8], наблюдаемых в результатах измерений (рисунок 1).

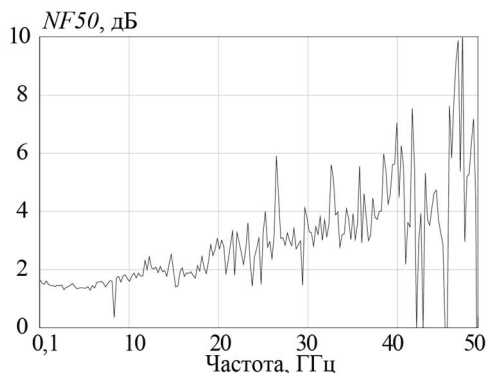


Рисунок 1 – Измеренный коэффициент шума в тракте 50 Ом исследуемого транзистора

Figure 1 – Measured 50 Ohm noise figure of transistor under test

Как видно из рисунка 1, в измерениях коэффициента шума наблюдается большой разброс измеренных значений. В результатах моделирования разброс рассчитанных значений будет отсутствовать, однако для разработчика модели неочевидно, к какой именно характеристике должна стремиться модель. Это затрудняет оценку точности модели и вносит субъективность. Предварительное сглаживание результатов позволяет предоставить разработчику модели характеристику в том виде, в котором модель должна её воспроизводить. Такой подход значительно упрощает работу инженера по построению моделей и позволяет сравнить две модели между собой, определить частотную область, в которой модель дает неверный результат, и оценить другие критерии качества модели.

Целью данной работы является исследование разных методов сглаживания результатов измерения коэффициента шума транзистора и дальнейшее применение сглаженных результатов для построения малосигнальной шумовой модели.

Исследование алгоритмов сглаживания

Для сравнения алгоритмов сглаживания был поставлен численный эксперимент с заранее известной полезной составляющей. В качестве полезной составляющей был использован коэффициент шума в тракте 50 Ом уже готовой шумовой модели транзистора, с идентичной периферией в диапазоне частот от 0,1 до 50 ГГц. Для имитации шума полезная составляющая сигнала в каждой точке отсчета умножалась на случайную величину, распределенную по нормальному закону со средним значением 1 и среднеквадратичным отклонением $3\sigma=0,5$ (рисунок 2).

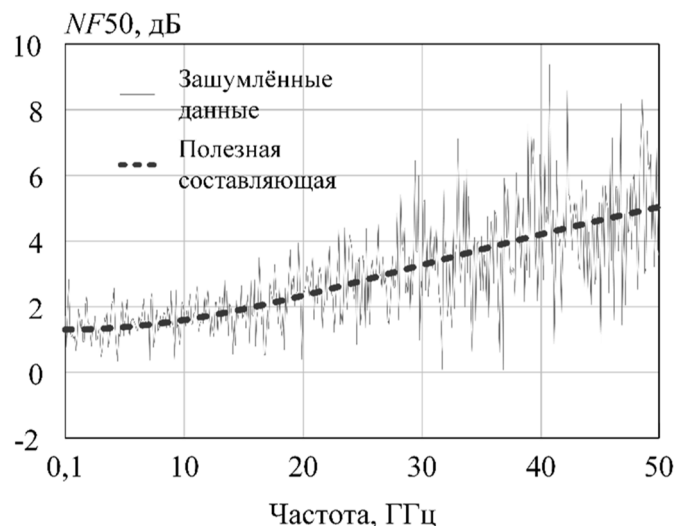


Рисунок 2 – Модельные данные зашумлённых измерений

Figure 2 – Model data of noisy measurements

Для нахождения полезной составляющей измерений были исследованы четыре алгоритма сглаживания данных: фильтрация с конечной импульсной характеристикой (КИХ), фильтрация с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), медианная фильтрация и фильтрация методом Савицкого-Голея.

Принцип работы КИХ и БИХ фильтров основан на переводе сигнала в частотную область и последующем подавлении той части спектра, которая соответствует шумам. Алгоритм работы КИХ фильтра в общем случае описывается разностным уравнением:

$$y(n) = \sum_{v=0}^{N-1} c_v x(n-v),$$

где N – количество отсчетов, c_v – постоянные коэффициенты, $x(n)$ – исходные данные.

Отличие БИХ фильтров заключается в наличии положительной обратной связи, которая выражается через дополнительные коэффициенты в уравнении:

$$y(n) = \sum_{\mu=0}^M b_{M-\mu} x(n-\mu) - \sum_{v=1}^N a_{N-v} y(n-v),$$

где $b_{M-\mu}, a_{N-v}$ – постоянные коэффициенты.

Медианная фильтрация является методом нелинейной обработки сигналов [1], который используется для подавления шумов. Основные преимущества медианной фильтрации заключаются в том, что при применении данного типа фильтра сохраняются резкие перепады и эффективно сглаживаются импульсные шумы. Медианный фильтр последовательности длиной $n\{x_i, i \in Z\}$ для нечетных n определяется как:

$$y_i = \text{медиана}(x_i) \triangleq \text{медиана}(x_{i-v}, \dots, x_i, \dots, x_{i+v}), i \in Z,$$

где $v = (n-1)/2$. Таким образом, медианная фильтрация точки x_i соответствует расчету медианы по n ближайшим точкам из набора данных, которые можно назвать окном сглаживания.

Фильтрация методом Савицкого-Голея широко применяется в областях обработки экспериментальных данных и фильтрации цифровых сигналов [9]. Основными преимуществами данного метода являются использование аппроксимирующего полинома n -й степени по методу наименьших квадратов и простота реализации. При известных коэффициентах фильтра результат вычисляется через операцию свертки. Сами коэффициенты табулированы и могут быть вычислены по явным формулам или, в общем случае, по основному алгоритму метода. Данный метод является результатом развития метода скользящего среднего. Значение функции $f(x)$ при заданном x заменяется сглаженным значением $sf(x)$, рассчитанным по формуле:

$$sf(x_i) = a_0 + a_1 f(x_i) + a_2 f(x_{i+1}) + \dots + a_n f(x_{i+n-1}).$$

В расчетах используется усредняющий интервал или окно сглаживания, включающее в себя $m = \frac{(n-1)}{2}$ точек слева и справа от текущего значения аргумента функции. Коэффициенты такого полинома определяются только порядком аппроксимации и размером окна сглаживания. Задача фильтрации в итоге сводится к расчету вектора коэффициентов $a = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$ с использованием критерия минимальной среднеквадратичной оценки:

$$(\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \cdot \mathbf{a} = -\mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{s}x,$$

где $\mathbf{s}x$ – вектор измерений, $\mathbf{Z}$ – матрица Вандермонда, имеющая размерность $n(n+1)$.

Коэффициент $a_i (i = 0 \dots n)$ из данного матричного уравнения вычисляется как результат умножения i -й строки матрицы $-(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$ на вектор измерений. Сглаженное значение функции определяется в виде свёртки:

$$sg^{(i)} = t! \sum_{i=-m}^m a_i f(x_i).$$

Каждый из описанных выше фильтров был применён к искусственно зашумлённым данным. Сравнение результатов сглаживания при использовании описанных фильтров, показало, что метод на основе фильтрации с конечной импульсной характеристикой (КИХ) не способен описать искомую зависимость и имеет относительную ошибку выше 8 %, в то время как фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) хорошо повторяет полезную составляющую измерений внутри частотного диапазона, однако по краям наблюдается увеличение ошибки сглаживания. Подобный характер сглаживания наблюдается при использовании медианного усреднения. Наиболее точный результат сглаживания наблюдается при использовании фильтра Савицкого-Голея [10]. Результат работы этого фильтра на всём исследуемом частотном диапазоне имеет минимальное отклонение от заданной полезной составляющей сигнала. На рисунке 3 представлены графики относительной ошибки сглажива-

ния для использованных методов. Результаты, полученные при КИХ фильтрации не приведены как нецелесообразные – ошибка велика и составляет более 10 %.

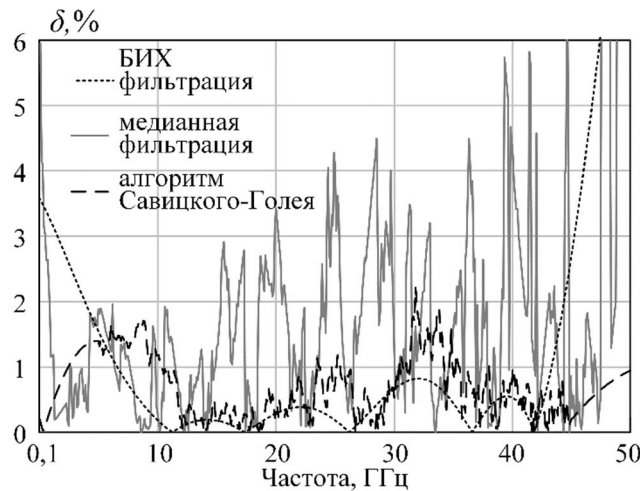


Рисунок 3 – Относительная ошибка между исходными и сглаженными данными
Figure 3 – Relative error between original and smoothed data

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что применение сглаживания методом Савицкого-Голея позволяет корректно выделить полезную составляющую на краях системы отсчёта. При этом значение ошибки распределено равномерно вдоль всей системы отсчёта. Среднее значение ошибки для данного метода составляет 1,5 %, а максимальное значение – 2,5 %, что является приемлемым результатом для построения моделей элементов СВЧ МИС.

Экспериментальная проверка сглаживания

Численный эксперимент на искусственно зашумлённых данных показал, что сглаживание методом Савицкого-Голея может быть использовано в области построения шумовых моделей. В связи с этим была проведена экспериментальная проверка данного метода с использованием результатов измерений реального устройства. Проверка алгоритма выполнялась как часть процедуры построения малосигнальных шумовых моделей СВЧ-транзисторов. При построении модели было выполнено сглаживание коэффициента усиления в тракте 50 Ом, что позволило упростить процедуру построения моделей. Разработанные модели СВЧ-транзисторов были использованы при проектировании двухкаскадного малошумящего усилителя (МШУ). Согласно предъявленным требованиям, усилитель должен обеспечивать коэффициент усиления более 12 дБ и коэффициент шума менее 3 дБ в диапазоне частот 17-24 ГГц.

Стоит отметить, что шумовая модель не является самостоятельной моделью, а представляет собой дополнение к малосигнальной модели. В связи с этим процесс построения малосигнальной шумовой модели начинается с построения именно малосигнальной модели, с последующим добавлением в модель параметров, отвечающих за моделирование шумовых характеристик.

Построение малосигнальной модели проводилось по ранее разработанной методике [11]. Методика основана на экстракции элементов эквивалентной схемы (ЭС), которая описывает работу транзистора в условиях малого сигнала (рисунок 4).

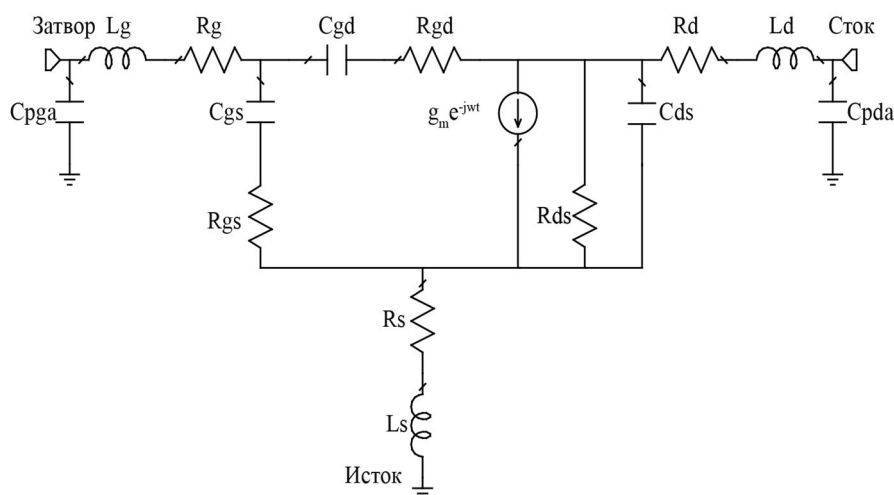


Рисунок 4 – Эквивалентная схема малосигнальной модели

Figure 4 – Equivalent circuit of the small-signal model

Элементы ЭС разделены на две группы: внешние и внутренние. Внешние элементы (C_{pg} , C_{pd} , L_g , L_s , L_d , R_g , R_s и R_d), значения которых не зависят от напряжения смещения, и внутренние элементы (C_{gs} , C_{gd} , C_{ds} , R_{gs} , R_{gd} , R_{ds} , g_m и τ), которые напрямую зависят от величины напряжения смещения. Для экстракции внешних элементов ЭС используются параметры рассеяния транзистора в так называемых «холодных режимах», когда напряжение стока равно нулю ($U_{си} = 0$ В). Внутренние элементы ЭС рассчитываются из малосигнальных Y-параметров в конкретной рабочей точке. Перед выполнением данного этапа из Y-параметров вычитается влияние определённых ранее внешних элементов. Более подробное описание методики экстракции описано в работе [11].

Описанные выше операции были проделаны для получения малосигнальных моделей GaAs pHEMT транзисторов с общей шириной затвора 4×40 мкм. Построение моделей проводилось для транзистора в девяти рабочих точках (на сетке $U_{си} = 2,5$ В; 3 В; 4 В; $I_c = 10$ мА; 15 мА; 20 мА). Параметры модели для рабочей точки $U_{си} = 3$ В, $I_c = 10$ мА представлены в таблице.

Таблица – Параметры построенной малосигнальной модели

Table – Parameters of obtained small-signal model

Параметр модели	Значение параметра	Параметр модели	Значение параметра
R_g , Ом	0,32	C_{ds} , фФ	35,7
R_d , Ом	2,86	C_{gs} , фФ	113,3
R_s , Ом	4,63	C_{gd} , фФ	44
L_s , нГн	8,5	R_{ds} , Ом	137,9
L_g , нГн	3,4	R_{gs} , Ом	1,99
L_d , нГн	3,4	R_{gd} , Ом	14,5
C_{pd} , фФ	18,2	g_m , см	0,082
C_{pg} , фФ	41,6	τ , пс	1,05

Ошибка рассчитанных с помощью построенных моделей параметров рассеяния не превышает 0,5 дБ по модулю и 7° по фазе в диапазоне частот 0,1-50 ГГц. На рисунке 5 приведено сравнение результатов измерения и моделирования параметров рассеяния в одной рабочей точке. Для более наглядной интерпретации результатов все параметры рассеяния представлены на диаграмме Вольперта-Смитта. Характеристики модели получены путём проведения линейного анализа в частотной области ЭС, представленной на рисунке 4.

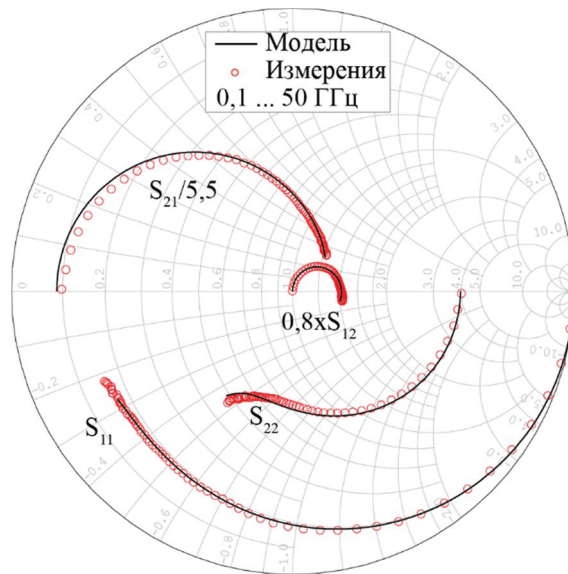


Рисунок 5 – Сравнение результатов измерения и моделирования параметров рассеяния в рабочей точке $U_{CH} = 3$ В, $I_C = 10$ мА

Figure 5 – Comparison of measured and modeled scattering parameters at bias point $V_{DS} = 3$ V, $I_{DS} = 10$ mA

Как видно из рисунка, модель с достаточной точностью воспроизводит параметры рассеяния СВЧ-транзистора, поэтому далее может быть осуществлён этап построения шумовой модели. После экстракции всех элементов малосигнальной ЭС проводится построение шумовой модели транзистора.

Существуют две часто используемые модели для описания шумовых характеристик транзистора: модель Пуселя [12] и модель Поспешальского [13]. В рамках данного исследования использовалась шумовая модель Поспешальского. Моделирование шумовых характеристик в данной модели осуществляется за счёт определения эквивалентной шумовой температуры для сопротивлений, находящихся в цепи стока (T_d) и цепи затвора (T_g) (рисунок 6).

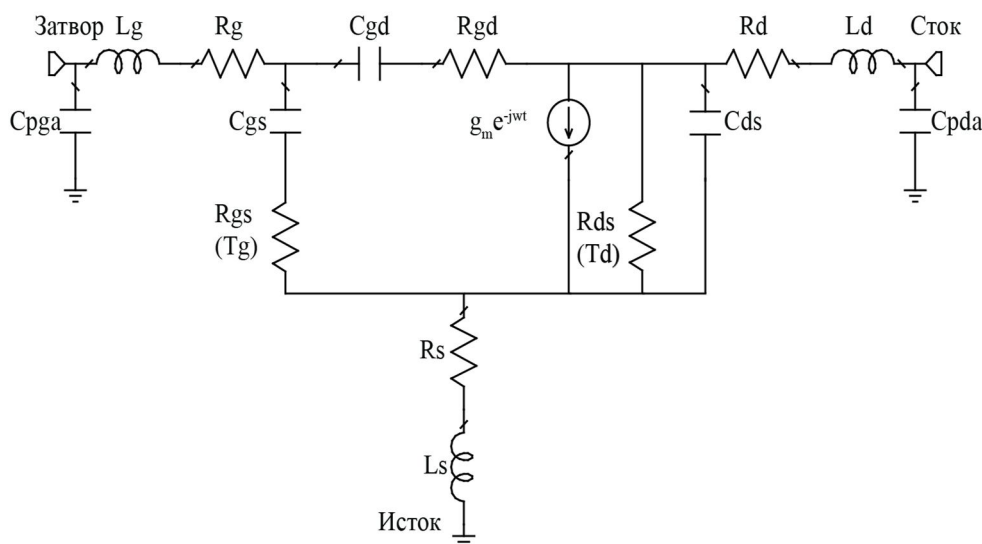


Рисунок 6 – Эквивалентная схема малосигнальной шумовой модели

Figure 6 – Equivalent circuit of the small signal noise model

Задача построения шумовой модели сводится к поиску значений двух эквивалентных температур.

Перед тем как приступить к построению шумовой модели транзистора, к измерениям коэффициента шума в тракте 50 Ом была применена процедура сглаживания. На рисунке 7 показаны результаты сглаживания измерения коэффициента шума в одной рабочей точке.

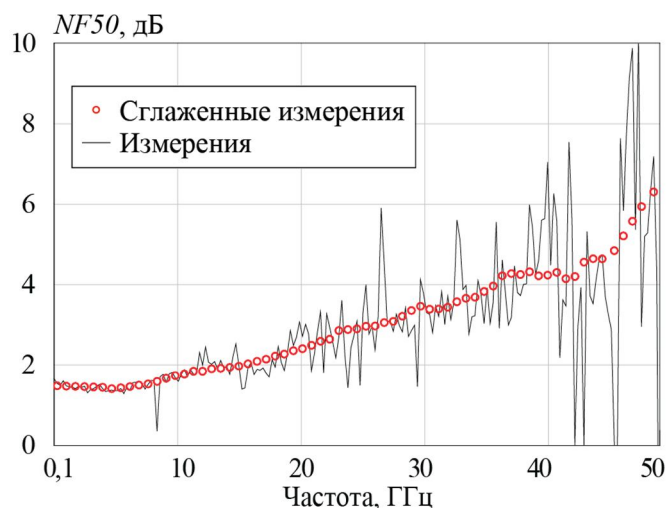


Рисунок 7 – Результаты сглаживания измерений коэффициента шума в рабочей точке $U_{СН} = 3$ В, $I_C = 10$ мА

Figure 7 – Results of smoothing noise figure measurements at bias point $V_{DS} = 3$ V, $I_{DS} = 10$ mA

На основе сглаженных данных проводилось построение шумовой модели путём оптимизации в САПР коэффициента шума, в качестве начальных значений эквивалентных шумовых температур бралась температура, при которой проводились измерения. В результате оптимизации были получены следующие значения эквивалентных шумовых температур: $T_g = 227^\circ\text{C}$ и $T_d = 1965^\circ\text{C}$. Сравнение результатов моделирования и сглаженного коэффициента шума в одной рабочей точке представлено на рисунке 8.

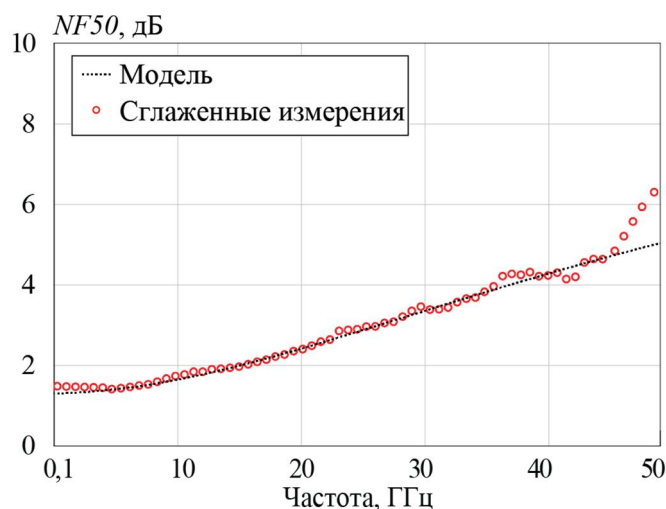


Рисунок 8 – Результаты моделирования и сглаживания измерений коэффициент шума в рабочей точке $U_{СН} = 3$ В, $I_C = 10$ мА

Figure 8 – Results of modeling and smoothing noise figure measurements at bias point $V_{DS} = 3$ V, $I_{DS} = 10$ mA

Из рисунка 8 видно, что в диапазоне до 35 ГГц модель с достаточной точностью воспроизводит измеренные значения коэффициента шума, в то время как на более высоких частотах наблюдаются отклонения от измеренных данных. Отклонение смоделированного и измеренного коэффициента шума на частотах выше 35 ГГц объясняется тем, что на этих частотах исследуемый транзистор имеет низкий коэффициент усиления в тракте 50 Ом. Другими словами, в этих условиях измерительный стенд работает на пределе чувствительности и даёт большую погрешность.

На основе полученных малосигнальных шумовых моделей был спроектирован двухкаскадный МШУ с требуемыми характеристиками. Далее было проведено изготовление усили-

теля и измерение его параметров. Сравнение измеренных СВЧ-характеристик полученной тестовой МИС с результатами моделирования показано на рисунке 9.

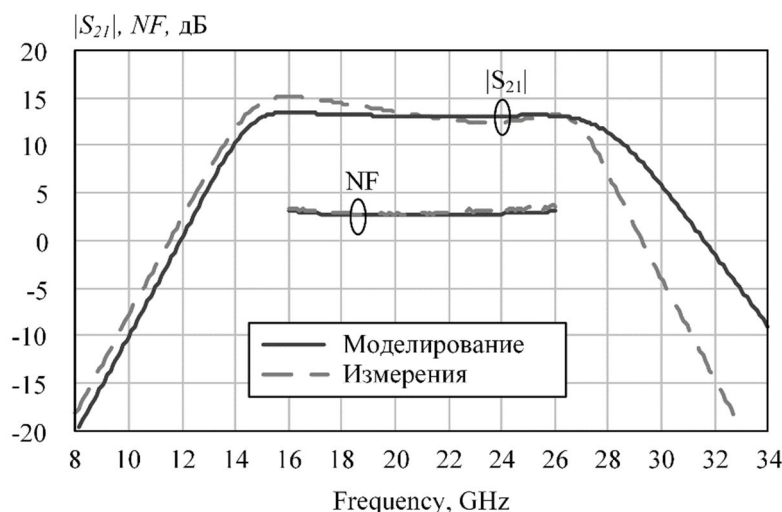


Рисунок 9 – Результаты моделирования и измерений СВЧ-характеристик МШУ диапазона частот 17-24 ГГц

Figure 9 – Results of modeling and measuring RF-characteristics LNA in frequency range 17-24 GHz

Из рисунка 9 видно, что коэффициенты усиления и шума достаточно хорошо совпадают в заданной полосе частот. Коэффициент усиления $|S_{21}|$ составил $13,8 \pm 1,2$ дБ, коэффициент шума менее 3,2 дБ, что отличается от результатов моделирования на 0,3 дБ. Представленные результаты соответствуют заданным требованиям и свидетельствуют о применимости разработанной модели для проектирования малошумящих усилителей, что подтверждает адекватность выполнения сглаживания измерений и возможность применения данного метода для построения малосигнальной шумовой модели транзистора.

Заключение

Проведён сравнительный анализ точности восстановления полезного сигнала из искусственно зашумлённых данных. Результаты анализа методов сглаживания измерений показали, что наибольшая точность восстановления полезной составляющей сигнала достигается при применении метода Савицкого-Голея. Главным преимуществом данного метода является более точное восстановление полезной составляющей на краях системы отсчета по сравнению с остальными методами. Среднее значение ошибки восстановления полезной составляющей в каждой точке отсчета составляет 1,5 %, а максимальное значение ошибки не превышает 2,5%. Данный метод был использован для сглаживания коэффициента шума в тракте 50 Ом. Построенные с использованием сглаживания измерений модели в разработке тестовой МИС двухкаскадного МШУ диапазона частот 17-24 ГГц. Измерения разработанной тестовой МИС двухкаскадного МШУ отличаются от результатов проектирования не более чем на 10 %. Полученные результаты подтверждают возможность использования малосигнальных шумовых моделей, разработанных с использованием выбранного алгоритма сглаживания, в процессе проектирования МШУ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

Библиографический список

1. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры / под ред. Т.С. Хуанга: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1984. 224 с.
2. Zhang L., Wang H., He S., Wei H., Li Y., Liu C. A Segmented Polynomial Model to Evaluate Passive Intermodulation Products From Low-Order PIM Measurements // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2018. vol. 29. no. 1, pp. 14-16.

3. Hsiao T.W., Chang T.P., Chou H.T., Tuan S.C. A novel moving average method of vehicle detection in the FMCW radar using antennas with different beamwidths at K-band // IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE). 2015, pp. 136-139.
4. Muping S., Yan L., Cong Y., Weiji Z., Qiaolan X. A direct-detecting COTDR based on wavelet smoothing DSP technique // IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). 2017, pp. 732-736.
5. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. М.: Мир, 1982. 592 с.
6. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996. Т.166. № 11. С. 1145-1170.
7. Бакулева М. А., Бакулев А. В. Применение вейвлет-преобразования для анализа данных хранения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 57-60.
8. Высокоточные измерения коэффициента шума с использованием анализаторов цепей серии PNA X. Рекомендации по применению // Agilent technologies. 60 с.
9. Ляхов А. А., Шкурикин В. В. Применение фильтров Савицкого-Голая для обработки вольт-амперных характеристик зондов Ленгмюра // Вестник Омского университета. 2012. № 4. С. 72-76.
10. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry. 1964. vol. 36, pp. 1627-1639.
11. Калентьев А. А., Сальников А. С., Попов А. А., Билевич Д. В., Добуш И. М., Горяинов А. Е. Алгоритм автоматического построения малосигнальной модели GaAs pHEMT-транзистора и его реализация в САПР // Международный форум «Микроэлектроника». 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»: сб. тезисов (Алушта, 30 сентября-05 октября 2019 г.). Москва: Техносфера, 2019. С. 342-345.
12. Pucel R.A. and Haus H.A. Advances in Electronics and Electron Physics // Academic. 1975, vol. 38, 195 p.
13. Pospieszalski M.W. Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequency and temperature dependence // IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique. 1989. vol. 37. № 9, pp. 1340-1350.

UDC 631.382

STUDY OF MICROWAVE TRANSISTOR MEASUREMENT SMOOTHING ALGORITHMS FOR SMALL-SIGNAL NOISE MODELING

D. V. Bilevich, Junior Researcher at «50ohm Lab», Tomsk, Russia;
 orcid.org/0000-0001-7421-7403, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru

A. A. Popov, Junior Researcher at «50ohm Lab», Tomsk, Russia;
 Or cid.org/0000-0001-6010-4459, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru

I. M. Dobush, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher at «50ohm Lab», TUSUR, Томск, Россия;
 orcid.org/0000-0002-3626-1419

A. E. Goryainov, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher at «50ohm Lab», TUSUR, Tomsk, Russia;
 orcid.org/0000-0003-3363-407X, e-mail: goryainov.alex@gmail.com

Y. A. Novichkova, bachelor at TUSUR, Tomsk, Russia;
 orcid.org/0000-0002-7987-7192, e-mail: yulya.novichkova21@gmail.com

The problem of preliminary processing of measurement results of a microwave transistor in terms of building a small-signal noise model with subsequent application of these models in design process is studied. The aim is to verify the applicability of methods for removing noise from measured data in the process of building small-signal noise models of a transistor. A preliminary check of four smoothing methods on artificially noisy model data was carried out. It was found that the error in removing noise by the Savitsky-Golay method on artificially noisy data does not exceed 2.5 %. The applicability of the method was experimentally verified by constructing a small-signal noise model of microwave transistor. Using the constructed model, the design and the subsequent manufacture of test monolithic integrated circuit (MIC) of a two-stage low noise amplifier was carried out. The deviation of measurement results from simulation results was less than

10 % for both gain and noise figures. This suggests that it is possible to apply smoothing procedure to measurements of noise figure by the Savitsky-Golay method in the process of building a small-signal noise model.

Key words: small-signal model of transistor, noise model of transistor, noise figure, smoothing technique, low noise amplifier.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-34-44

References

1. *Bystrye algoritmy v cifrovoj obrabotke izobrazhenij. Preobrazovaniya i mediannye filtry* (Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transform and Median Filters) pod red. **T.S. Huang**. Moscow. Radio i svyaz'. 1984, 224 p. (in Russian).
2. **Zhang L., Wang H., He S., Wei H., Li Y., Liu C.** A Segmented Polynomial Model to Evaluate Passive Intermodulation Products From Low-Order PIM Measurements. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2018, vol. 29, no. 1, pp. 14-16.
3. **Hsiao T. W., Chang T. P., Chou H. T., Tuan S. C.** A novel moving average method of vehicle detection in the FMCW radar using antennas with different beamwidths at K-band. *IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)*. 2015, pp. 136-139.
4. **Muping S., Yan L., Cong Y., Weiji Z., Qiaolan X.** A direct-detecting COTDR based on wavelet smoothing DSP technique. *IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, 2017, pp. 732-736.
5. **Lem G.** *Analogovye i cifrovye filtry* (Analog and Digital Filters). Moscow. Mir, 1982, 592 p. (in Russian).
6. **Astafeva N. M.** Vejvlet-analiz: Osnovy teorii i primery primeneniya. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145-1170. (in Russian).
7. **Bakuleva M. A., Bakulev A. V.** Primenenie vejvlet-preobrazovaniya dlya analiza dannyh hrani-lishcha. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 21, pp. 57-60. (in Russian).
8. Vysokotochnye izmereniya koefficienta shuma s ispolzovaniem analizatorov cepej serii PNA X. Rek-omendacii po primeneniyu. *Agilent technologies*. 60 p. (in Russian).
9. **Lyahov A. A., SHkurikin V. V.** Primenenie fil'trov Savickogo-Goleya dlya obrabotki voltam-pernyh harakteristik zondov Lengmyura. *Vestnik Omskogo universiteta*. 2012, no. 4, pp. 72-76. (in Russian).
10. **Savitzky A., Golay M.J.E.** Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Pro-cedures. *Analytical Chemistry*. 1964, vol. 36, pp. 1627-1639.
11. **Kalentev A. A., Salnikov A. S., Popov A. A., Bilevich D. V., Dobush I. M., Goryainov A. E.** Al-goritm avtomaticheskogo postroeniya malosignalnoj modeli GaAs pHEMT-tranzistora i ego realizaciya v SAPR. *Mezhdunarodnyj forum «Mikroelektronika». 5-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «El-ektronnaya komponentnaya baza i mikroelektronnye moduli»: Sbornik tezisov* (Alushta, 30 sentyabrya-05 oktyabrya 2019 g.). Moscow: Tekhnosfera. 2019, pp. 342-345. (in Russian).
12. **Pucel R.A. and Haus H.A.** Advances in Electronics and Electron Physics. *Academic*. 1975, vol. 38, 195 p.
13. **Pospieszalski M.W.** Modeling of noise parameters of MESFETs and MODFETs and their frequen-cy and temperature dependence. *IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique*. 1989, vol. 37, no. 9, pp. 1340-1350