DOI: 10.17117/nv.2015.04.103

Поступила (Received): 20.12.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.04.103.pdf>sfedu@sfedu.ru

Червяков Г.Г., Осадчий Е.Н.
Шумовые параметры и модели HEMT
в микроволновых смесителях

Cherviakov G.G., Osadchiy E.N.
Noise parameters and models HEMT
in microwave mixers

Рассмотрены шумовые параметры смесителей на HEMT, работающих в активной области, которые можно разделить на три типа в зависимости от того, какой из элементов эквивалентной схемы вносит наибольший вклад в нелинейность преобразования. При работе HEMT вблизи напряжения отсечки (gate mixer) и основными нелинейными элементами являются крутизна g_m и емкость затвор-исток СЗИ. В случае работы HEMT вблизи точки перегиба ВАХ (drain mixer), основными нелинейностями являются сопротивление канала R_{sc} и емкости СЗС. И третий случай, когда преобразование частоты реализуется на нелинейности стоковой характеристики. Представлены результаты моделирования шумов в смесителях СВЧ на транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT – High electron mobility transistor) при трех различных режимах работы: работе HEMT вблизи напряжения отсечки, в случае работы HEMT вблизи точки перегиба вольт-амперной характеристики (ВАХ) и когда преобразование частоты реализуется на нелинейности стоковой характеристики. Получены эквивалентные шумовые схемы для каждого из режимов. Проведен сопоставительный анализ трех возможных режимов работы смесителя СВЧ на HEMT

Ключевые слова: моделирование шумов, микроволновый смеситель

Considered noise parameters for HEMT mixer, operating in an active region, which can be divided into three types depending on which of the equivalent circuit elements contributes most to the nonlinearity of conversion. When the HEMT near cut-off voltage (gate mixer) and major non-linear elements are transconductance G_m and the gate-source capacitance C_{gs} . In the case of HEMT near the inflection point of the CVC (drain mixer), the main non-linearities are channel resistance R_{ds} and capacity of C_{gd} . And the third case, when frequency conversion is realized in the non-linearity of the drain characteristics. Results of modeling of noise in microwave mixer on transistors with high electrons mobility of electrons (HEMT – High electron mobility transistor) are pre-sented at three various operating modes: to work HEMT near to pressure of cut-off, in case of work HEMT near to a point of an excess VAC (volt ampere characteristic) and when frequency transformation is realized on nonlinearity drain characteristics. Equivalent noise schemes for each of modes are received. The comparative analysis of three possible operating modes of the microwave mixer on HEMT is carried out

Key words: modeling of noise, microwave mixer

Червяков Георгий Георгиевич
Доктор технических наук, профессор
Южный федеральный университет
г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Cherviakov Georgy Georgievich
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean
Southern Federal University
Taganrog, Shevchenko st., 2

Осадчий Евгений Николаевич

Кандидат технических наук, доцент
Южный федеральный университет
г. Таганрог, ул. Шевченко, 2

Osadchiy Evgeny Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, associate Professor
Southern Federal University
Taganrog, Shevchenko st., 2

Считается, что в НЕМТ транзисторах кроме источников теплового шума, создаваемых омическими сопротивлениями областей затвора, истока и стока, следует учитывать два источника шумового тока: в цепи затвора $\bar{i}_3^2$ и в цепи стока $\bar{i}_c^2$ [1]. Источник шума $\bar{i}_3^2$ обусловлен дробовыми шумами обратносмещенного перехода затвора НЕМТ транзистора. Источник $\bar{i}_c^2$ обусловлен тепловым шумом канала и зависит от проводимости канала и шум-фактора НЕМТ, учитывающего переменное сечение канала и частичную корреляцию шумов затвора и стока.

В смесителях на НЕМТ транзисторах обычно реализуются три принципиально разных режима работы [2]. Для анализа шумовых свойств НЕМТ транзистора используем физическую эквивалентную схему, изображенную на рис. 1 [2], где $C_{3и}$, $C_{3с}$, $C_{си}$ – электродинамические межэлектродные емкости транзисторной структуры; G_k – проводимость канала; $S\dot{U}_3$ – управляемый источник, моделирующий процесс переноса носителей тока от истока к стоку; r_c , r_u – сопротивления необедняемых частей канала со стороны стока и истока; r_3 – сопротивление металлизации затвора; L_3 , L_c , L_H – индуктивности выводов затвора, стока и истока.

Рис. 1. Физическая эквивалентная схема НЕМТ транзистора

Схема рис. 1 не учитывает емкостей корпуса НЕМТ. В последующих расчетах не будем учитывать также внутренние обратные связи в схеме транзистора через проходную емкость структуры $C_{3с}$ и через индуктивность общего вывода L_u . Будем также предполагать, что с помощью внешних подстроечных элементов во входной цепи созданы параллельные контуры, настроенные на частоты ω_1 и ω_2 , а в выходной цепи контур, настроенный на частоту ω_n .

Так как в первом режиме смеситель на НЕМТ эквивалентен каскадному включению диодного смесителя на барьере Шотки и усилительного каскада на полевом транзисторе, эквивалентная шумовая схема имеет вид, показанный на рис. 2.

Рис.2. Эквивалентная шумовая схема для первого режима работы НЕМТ транзистора

На рис. 2 обведенная пунктиром часть схемы, полностью соответствует случаю диодного смесителя дополнена элементами:

- g_n – резонансная проводимость контура в цепи затвора, настроенного на промежуточную частоту (ПЧ), обусловленная сопротивлениями r_3 и r_n эквивалентной схемы НЕМТ;
- g_{HT} – проводимость нагрузки в цепи стока;
- $\sqrt{i_{тн}^2}$ – источник теплового шума, создаваемого сопротивлениями r_3 и r_n ;
- U – суммарное напряжение шумов смесителя на затворе НЕМТ;
- SU – шумовой источник тока на выходе НЕМТ, моделирующий процесс усиления шумов в транзисторе;
- $\sqrt{i_c^2}$ – источник шума на выходе транзистора, отображающий тепловой шум канала;
- $\sqrt{i_n^2}$ – источник теплового шума, создаваемого нагрузкой g_{HT} на выходе НЕМТ.

Если шумы канала и нагрузки пересчитать к затвору транзистора эквивалентная шумовая схема рис.2 приобретает вид (рис. 3) где:

$\bar{i}_{пт}^2$ – тепловые шумы, создаваемые проводимостью канала, нагрузкой и сопротивлениями r_3 , r_n , пересчитанные к затвору транзистора.

Рис.3. Эквивалентная шумовая схема НЕМТ транзистора при пересчете шумов канала и нагрузки

Коэффициент шума при этом определяется выражением

$$F = 1 + n_1 \{ g_{CH} + (1 + m + g_{CH})^2 m^{-2} [1 - m^2 (1 + 2g_{CH}) (1 + g_{CH})^{-2} + g_0^{-1} (g_n + (F_s G_K + g_{HT}) M_u^{-2})], \quad (1)$$

которое отличается от случая диодных смесителей дополнительным членом $g_0^{-1}(g_n + (F_s G_k + g_{HT})M_u^{-2})$, характеризующим шумы сопротивлений потерь контуров ПЧ в цепях затвора и стока и шумы канала транзистора.

Анализируя (1) видно, что при учете потерь в выходном контуре смесителя и проводимости нагрузки коэффициент шума смесителя на НЕМТ будет меньше коэффициента шума диодного смесителя, использующего переход затвора, если выполняется условие $G_{нд} > (G_k + g_{HT}) / M_u^2$, где $g_{нд}$ – проводимость нагрузки диодного смесителя [3]. Последнее условие может выполняться в смесителе на НЕМТ даже при $g_{нд} \ll g_{HT}$. Из этого следует, что в смесителе на НЕМТ возможно некоторое увеличение отношения сигнал/шум (с/ш) за счет уменьшения влияния шумов нагрузки в цепи стока в общем фоне шумов.

В смесителе на НЕМТ с преобразованием частоты в канале транзистора (второй режим работы) процесс преобразования становится невзаимным. В этом режиме переход затвора работает в режиме прямого детектирования с выделением огибающей МП. При этом на затворе действует малое напряжение с частотой ω_1 и большое напряжение с частотой гетеродина ω_2 .

Эквивалентная шумовая схема смесителя с преобразованием частоты в канале имеет вид рис. 3 и коэффициент шума определяется формулой:

$$F = 1 + 2I_s / I_{01} + 2\varphi_T / I_{01} \left[g_c (F_s G_k + g_n + g_n)^3 / S_1^2 \right]. \quad (2)$$

Рис.3. Эквивалентная шумовая схема смесителя с преобразованием частоты в канале

Из (2) следует, что коэффициент шума уменьшается с ростом постоянной составляющей тока затвора I_{01} (за счет возрастания доли дробовых шумов генерации носителей тока в переходе затвора в общем шуме смесителя) и крутизны преобразования S_i . Для уменьшения коэффициента шума необходимо также уменьшать потери в контурах сигнала g_c и промежуточной частоты g_n .

Смеситель с преобразованием частоты на нелинейности стоковой характеристики НЕМТ (третий режим работы), когда напряжение гетеродина подается в цепь стока (в отличие от первых двух режимов, когда оно подавалось в цепь затвора), эквивалентен каскадному включению прямого детектора на транзисторе, выделяющего и усиливающего полезный сигнал и смесителя на двухполюсной нелинейной проводимости [4].

Специфика проводимости канала, при этом режиме, состоит в том, что при отсутствии постоянного напряжения на стоке ($U_0 = 0$) амплитуды всех нечетных гармоник равны нулю, т.е. преобразование частоты происходит на четных гармониках гетеродина.

Эквивалентная схема такого преобразователя для сигнала имеет вид рис. 4.

Рис. 4. Эквивалентная шумовая схема смесителя с преобразованием частоты на нелинейности стоковой характеристики НЕМТ

Эквивалентная шумовая схема смесителя при пересчете шумов из цепи затвора в цепь стока показана на рис. 5, где $i_{T2} = 4kTg_0\Delta f$ – тепловой шум проводимости канала, усредненный по периоду гетеродина [80].

Рис. 5. Эквивалентная шумовая схема смесителя при пересчете шумов из цепи затвора в цепь стока

Коэффициент шума смесителя при этом определяется выражением

$$F = \bar{i}_{шкз}^2 / \bar{i}_{шс}^2 = 1 + 2I_s / I_{01} + 2\varphi_m g_0 / I_{01} \left\{ g_{cu} + g_{cu} \left[g_{nn} + (1 + m_2)^2 (1 - m_2^2) / m_2^2 \right] / S_n^2 \right\}. \quad (3).$$

Из анализа формулы (3) следует, что для уменьшения коэффициента шума смесителя необходимо уменьшать потери в контурах g_{cu} и g_{nn} (включая уменьшение проводимости нагрузки по промежуточной частоте) и стремиться к выполнению условий $m_2 \rightarrow 1$ и $I_{01} \gg I_s$. Влияние шумов преобразователя и нагрузки в этом смесителе ослаблено за счет внутреннего усиления НЕМТ, возрастающего с ростом крутизны (S).

Список используемых источников:

1. Ван-дер-Зил А. Шум. Описание, источники, измерение. М., Связь, 1973.
2. Червяков Г.Г. Избирательный фотоприем. Элементы, параметры, характеристики. Монография. Таганрог: ТРТУ, 1999, 186 с.
3. Шварц Н.З. Усилители СВЧ на полевых транзисторах. М.: Радио и связь, 1987, 200 с.
4. Rattay B., Hubner M., Teyssier J.P., Quere P. Accurate HEMT modeling for non-linear simulation. Proc. 22 EuMC. 1992. P. 1201-1205.

References:

1. Van der Zyl A. *Noise. Description, sources of measurement*. M., Communication, 1973.
2. Chervyakov G.G. *Electoral photodetectors. Elements, parameters, characteristics*. Monograph. Taganrog, TRTU, 1999, 186 p.
3. Schwarz N.Z. *Microwave Amplifiers FET*. M.: Radio and Communications, 1987. 200 p.
4. Rattay B., Hubner M., Teyssier J.P., Quere P. *Accurate HEMT modeling for non-linear simulation*. Proc. 22 EuMC. 1992. P. 1201-1205.

© 2015, Червяков Г.Г., Осадчий Е.Н.
Шумовые параметры и модели HEMT в
микроволновых смесителях

© 2015, Cherviakov G.G., Osadchiy E.N.
Noise parameters and models HEMT in microwave
mixers