ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА УРОВЕНЬ ШУМОВ РАДИОЧАСТОТНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАКТА

И.Е. Кащенко^{1,2}, А.П. Павлов^{1,2}, А.В. Ткачева²

¹*Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,
Омск, Российская Федерация*

²*Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация*

Представлена имитационная модель, позволяющая оценить влияние температуры окружающей среды на уровень шумов радиочастотного усилительного тракта. Модель основана на известных аналитических выражениях, что позволяет с высокой долей вероятности получать достоверные результаты в ходе моделирования. В результате моделирования определена зависимость влияния температуры окружающей среды на уровень шумов радиочастотного усилительного тракта. На основе полученной зависимости выполнен анализ шумов радиочастотного усилительного тракта.

Ключевые слова: имитационная модель, оценка шумов радиочастотного усилительного тракта, радиопередатчик, коэффициент шума, усилительный каскад, уровень шума.

IMPACT ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL TEMPERATURE AT NOISE LEVEL OF RADIO-FREQUENCY AMPLIFICATION PATH

I.E. Kashchenko^{1,2}, A.P. Pavlov^{1,2}, A.V. Tkacheva²

¹*Institute of Radiophysics and Physical Electronics OSC SB RAS, Omsk, Russian Federation*

²*Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Omsk, Russian Federation*

A simulation model that allows one to evaluate the effect of ambient temperature on the noise level of the radio frequency amplification path is presented. The model is based on well-known analytical expressions, which makes it possible to obtain reliable results with high probability. As a result of the simulation, the dependence of the influence of ambient temperature on the noise level of the radio frequency amplification path. Based on the obtained dependence, the noise analysis of the radio frequency amplification path is performed.

Keywords: simulating model, noise estimate of the radio frequency amplification path, radio transmitter, noise figure, amplifier stage, noise level.

Введение

Создание радиопередающих устройств для обеспечения связи в условиях крайнего севера является одной из приоритетных задач отечественной радиоэлектронной промышленности. Основные проблемы при создании таких радиопередающих устройств связаны с жёсткими условиями эксплуатации, а именно с крайне низкими температурами окружающей среды. Низкая температура окружающей среды влияет на физические и конструктивные свойства радиопередающих устройств, а при более детальном анализе и на спектральный состав излучаемого сигнала. Оценка влияния температуры окружающей среды на спектральный состав излучаемого радиопередающим устройством сигнала представляет наибольший интерес, так как от этого напрямую зависит качество канала связи. Одним из основных параметров, определяющих качество спектрального состава сигнала, является спектральная плотность шума. Спектральная плотность шума характеризует распределение шумов в спектре сигнала. Наибольшую температурную зависимость спектральная плотность шума имеет в активных устройствах, а именно усилительных каскадах. Это связано с физическими процессами, протекающими в полупроводниковых приборах. Как правило,

производители полупроводниковых приборов в документации указывают параметры, измеренные в нормальных условиях (например, при температуре окружающей среды $T = 25^\circ\text{C}$) [1]. Поэтому оценка параметров полупроводникового прибора и тем более усилительного каскада при отклонении от нормальных условий может быть осуществлена либо путём моделирования, либо с помощью натуральных экспериментов. Моделирование является наиболее предпочтительным вариантом, так как является менее затратным, чем проведение натуральных экспериментов.

Аналитические выражения для моделирования шумов радиочастотного усилительного тракта

Аналитическое описание шумов радиочастотного усилительного тракта можно представить с помощью аналитических выражений, осуществляющих последовательное преобразование сигнала. В качестве источника сигнала можно выбрать синусоидальный генератор с известной спектральной маской фазового шума:

$$y_n = x_n e^{j\varphi_n}, \quad (1)$$

где y_n – выходной сигнал, x_n – входной сигнал, φ_n – фазовый шум.

Требуемый фазовый шум формируется с помощью процедуры фильтрации Гауссова шума. Спектральная маска имеет известную характеристику $1/f$, проходящую в заданных точках [2]. Для фильтрации в дискретном виде удобнее воспользоваться БИХ-фильтром, у которого числитель может быть определён следующим выражением:

$$a = \sqrt{2\pi f_{\text{offset}} 10^{L/10}}, \quad (2)$$

где f_{offset} – частота отстройки, L – уровень фазового шума дБн/Гц.

Знаменатель БИХ-фильтра будет определяться рекурсивно в соответствии со следующим выражением:

$$b_i = (i - 2.5) \frac{b_{i-1}}{i - 1}, \quad (3)$$

где $b_i = 1$, $i = 1, 2, \dots, N_t$, N_t – количество коэффициентов фильтра (от 2^7 до 2^{19}). Количество коэффициентов фильтра увеличивается при уменьшении частоты отстройки.

Коэффициент шума в линейных единицах, или «шум-фактор» усилительного каскада, может быть представлен в виде рекомендованной стандартом IRE формулы [3]:

$$F = \frac{N_a + kT_0 BG}{kT_0 BG}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К), T_0 – температура источника шума, B – шумовая полоса усилительного каскада, G – коэффициент усиления каскада, N_a – уровень шума на входе усилительного каскада.

Для дальнейшей оценки результирующего шума целесообразно использовать параметр «эффективная температура входного шума»:

$$T_e = T_0(F - 1). \quad (5)$$

Отсюда можно вывести выражение, описывающие выходной шум усилительного тракта, при условии полного согласования цепей [4]:

$$N_{\text{out}} = 10 \log_{10}(k(T_s + T_e)G), \quad (6)$$

где T_s – температура внешнего по отношению к усилительному каскаду источника шума.

При каскадном включении нескольких усилителей суммарный коэффициент шума может быть представлен в следующем виде:

$$F_{\text{sys}} = F1 + \frac{F2 - 1}{G1}, \quad (7)$$

где $F1$ – коэффициент шума первого каскада, $F2$ – коэффициент шума второго каскада.

Отсюда видно, что при высоком усилении первого каскада шумовой вклад второго каскада становится незначительным [5].

Структура имитационной модели для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта при различных температурах окружающей среды

Структурную схему имитационной модели для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта удобнее представить в виде последовательного включения функциональных блоков, которые выполняют необходимые преобразования над сигналом.

На рис. 1 представлена структурная схема модели для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта, выполненного на одном усилительном каскаде.

Рис. 1. Структурная схема модели для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта, выполненного на одном усилительном каскаде

Представленная на рисунке модель позволяет провести оценку шума в выходном сигнале усилительного каскада как в нормальных условиях, так и при изменении температуры окружающей среды.

На основе выражения (7) была получена модель для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта, выполненного с помощью двух усилительных каскадов. Структурная схема такой модели представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структурная схема модели для анализа шумов радиочастотного усилительного тракта, выполненного на двух усилительных каскадах

Результаты моделирования шумов радиочастотного усилительного тракта при различных температурах окружающей среды

Разработанные модели позволяют оценить уровень шумов в выходном сигнале радиочастотного усилительного тракта при изменении температуры внешней среды. В качестве исходных данных для моделирования были выбраны следующие параметры:

1. Уровень мощности шума на входе усилительного тракта (при $T = 298$ К) – 174 дБм/Гц.
2. Логарифмический коэффициент шума усилительного тракта – от 3 до 7 дБ.
3. Диапазон изменения температуры окружающей среды – от 213 К (минус 60 °С) до 333 К (60 °С).

На основе представленных исходных данных была выполнена оценка уровня мощности шума на выходе радиочастотного усилительного тракта при различных значениях температуры окружающей среды.

На рис. 3 представлены результаты моделирования уровня мощности шума на выходе радиочастотного усилительного тракта при различных значениях температуры окружающей среды.

Рис. 3. Результаты моделирования уровня мощности шума на выходе радиочастотного усилительного тракта при различных значениях температуры окружающей среды

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, уровень шума на выходе радиочастотного усилительного тракта имеет ярко выраженную температурную зависимость. Данная зависимость не является линейной. При низких температурах уровень шума снижается почти на 1 дБ для логарифмического коэффициента шума усилительного тракта $NF = 3$ дБ. Чем выше коэффициент шума, тем меньше влияние температуры окружающей среды на уровень шума на выходе радиочастотного усилительного тракта.

Выводы

Полученная имитационная модель позволяет произвести оценку уровня шумов на выходе радиочастотного усилительного тракта при различных температурах окружающей среды. Стоит отметить снижение влияния температуры окружающей среды на результирующий уровень шумов при высоком собственном коэффициенте шума усилительного каскада. Кроме того, при низких температурах окружающей среды, уровень шума на выходе радиочастотного усилительного тракта может существенно снижаться. Например, при температуре окружающей среды $T = 213$ К (минус 60 °С) и коэффициенте шума $NF = 3$ дБ,

уровень шума на выходе радиочастотного усилительного тракта на 1 дБ меньше по сравнению с уровнем шума при $T = 333 \text{ К}$ (60°C). Использование представленных в работе результатов позволяет учитывать влияние низких температур при проектировании устройств радиосвязи, предусматривающих эксплуатацию в арктических условиях и условиях Крайнего Севера.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guillermo G.* Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design // Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984.
2. *Kasdin N.J.* Discrete Simulation of Colored Noise and Stochastic Processes and $1/f$ α Power Law Noise Generation // The Proceedings of the IEEE. Vol. 83, no. 5, May, 1995, pp. 802–827.
3. Description of the Noise Performance of Amplifiers and Receiving Systems, Sponsored by IRE subcommittee 7.9 on Noise // Proc. of the IEEE, March, 1963, pp. 436–442.
4. *Duncan B.* Calculate the Uncertainty of NF Measurements // Microwave and RF, October, 1999, p. 93.
5. *Pozar D.M.* Microwave Engineering // Hoboken NJ, John Wiley&Sons, 2005.