



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-75-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37; 004.457

АНАЛИЗ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОПРИЕМНЫХ ТРАКТОВ

Д.В. АРХИПЕНКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 22 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. При проектировании радиотехнических изделий на ранних стадиях одной из важнейших решаемых задач является определение эффективного варианта исполнения системы/устройства путем анализа всех возможных доступных исполнений. Поэтому разработка таких систем/устройств представляет собой сложный и трудоемкий процесс, который в себе подразумевает бесконечно большое количество итераций расчетов и моделирований различных вариантов в поисках оптимально-эффективного. В данной статье рассмотрены программы: AppCAD от компании Agilent и ADISimRF от компании Analog Devices. Данные программы имеют большой функционал, множество рассчитываемых системных характеристик тракта, но в каждой из них существуют недостатки, например, отсутствие редактируемой базы данных интегральных микросхем, отсутствие расчетов динамического диапазона по интермодуляции третьего порядка приемного тракта, невозможность оптимизации по нелинейным искажениям и т. д. Целью статьи является разработка оригинальной программы для расчета радиоприемных трактов, которая по функционалу не уступает зарубежным аналогам и обладает рядом полезных для расчетов уточнений. В статье представлены формулы для расчета коэффициента шума аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и произведен сравнительный анализ полученных результатов с реальным значением. Коэффициент шума радиоприемного тракта уточнен с помощью включения в формулу коэффициента обратных потерь и коэффициента шума АЦП. Программа, разработанная автором статьи, имеет редактируемую элементную базу, работа с которой упрощает и ускоряет расчет устройства. Описан алгоритм работы программы, разработанной автором, и приведен расчет системных характеристик тракта для сравнения с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: расчет радиоприемного тракта, АЦП, коэффициент шума АЦП, интермодуляция третьего порядка.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенков Д.В. Анализ программ для расчета системных характеристик сверхширокополосных радиоприемных трактов. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 75-80.

ANALYSIS OF PROGRAMS FOR CALCULATION OF THE SYSTEM CHARACTERISTICS OF ULTRA-WIDE RANGE RECEIVING PATHS

DMITRY V. ARKHIPENKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. When designing radio engineering products, at the early stages, one of the most important tasks to be solved is to determine the effective version of the system/device by analyzing all possible available versions. Therefore, the development of such systems / devices is a complex and time-consuming process, which involves an infinitely large number of iterations of calculations and simulations of various options in search of an optimal and efficient one. This article describes the programs: AppCAD from Agilent and ADISimRF from Analog Devices. These programs have a large functionality, a lot of calculated system characteristics of the path, but each of them has shortcomings, for example, the lack of an editable database of integrated circuits (IC), the lack of dynamic range calculations for third-order intermodulation of the receiving path, the inability to optimize for nonlinear distortions, etc. The purpose of the article is to develop an original program for calculating radio receiving paths, which is not inferior in functionality to foreign analogues and has a number of useful refinements for calculations. The article presents formulas for calculating the noise figure of an analog-to-digital converter (ADC) and makes a comparative analysis of the results obtained with the real value. The noise figure of the radio receiving path is refined by including the reverse loss coefficient and the ADC noise figure in the formula. The program developed by the author of the article has an editable element base, which simplifies and accelerates the calculation of the device. The algorithm of the program developed by the author is described, and the calculation of the system characteristics of the path for comparison with foreign analogues is given.

Keywords: calculation of the radio receiving path, ADC, ADC noise figure, third-order intermodulation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Arkhipenkov D.V. Analysis of programs for calculation of the system characteristics of ultra-wide range receiving paths. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 75-80.

Введение

На ранних стадиях проектирования изделий решается задача определения эффективного варианта реализации радиоприемной/радиопередающей системы путем анализа всех возможных вариантов. Поэтому разработка таких систем представляет собой сложный и трудоемкий процесс.

Большой ассортимент технических средств современной вычислительной техники, развитие программного обеспечения, автоматизация программирования, неограниченные ресурсы вычислительных систем, интеллектуальные интерфейсы и т. п. предоставляют возможность проектировщикам перенести на компьютер рутинные виды деятельности. Поэтому использование виртуальных средств моделирования и проектирования позволяет упростить и ускорить процесс проектирования и оптимизации, повысить точность и надежность разрабатываемых изделий. Такие компании, как Analog Devices, Agilent, Keysight и др., выпускают программы для проектирования систем со своими особенностями: методами расчета и моделирования, базой данных (БД), различным количеством рассчитываемых системных характеристик. С их помощью инженеры могут моделировать поведение сигнальных трактов, состоящих из ВЧ интегральных микросхем.

Таким образом, проектирование с помощью средств вычислительной техники позволяет сократить сроки разработки изделия при одновременном увеличении их сложности.

Анализ программ расчета приемного тракта

В настоящее время многие математические пакеты позволяют произвести расчет параметров радиоприемных устройств. Наряду с ними ведущие компании выпускают свои простые/узконаправленные программные обеспечения для выполнения данных функций. Поэтому произведем расчет структуры радиоприемного тракта (рис. 1) [1], например, в AppCAD (№ 1) и ADISimRF (№ 2) (результаты представлены на рис. 2, 3). Выбор данных программ обусловлен наличием их в свободном доступе. Для увеличения количества рассчитываемых системных характеристик расчеты проводятся в нескольких программах.

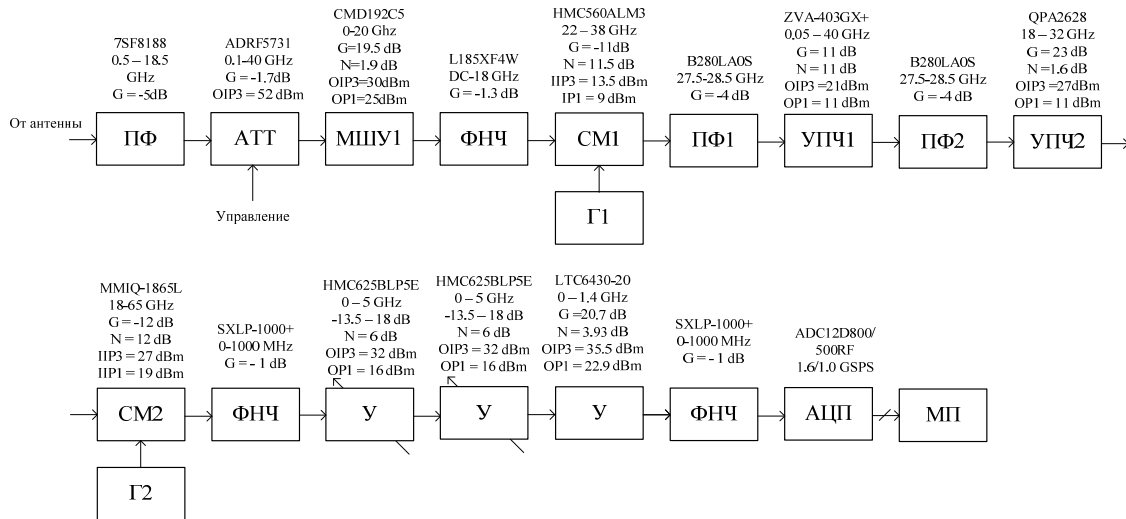


Рис. 1. Структура радиоприемного тракта
Fig. 1. The structure of the radio receiving device

Input Power	-82	dBm	Gain =	35,20	dB	Input IP3 =	-4,14	dBm
Analysis Temperature	25	°C	Noise Figure =	11,80	dB	Output IP3 =	31,06	dBm
Noise BW	10	MHz	Noise Temp =	4099,25	°K	Input IM level =	-237,72	dBm
Ref Temperature	25	°C	SNR =	10,18	dB	Input IM level =	-155,72	dBc
S/N (for sensitivity)	10	dB	MDS =	-92,18	dBm	Output IM level =	-202,52	dBm
Noise Source (Ref)	290	°K	Sensitivity =	-82,18	dBm	Output IM level =	-155,72	dBc
			Noise Floor =	-162,18	dBm/Hz	SFDR =	58,69	dB

Рис. 2. Результаты расчетов радиоприемного тракта в программе № 1
Fig. 2. The results of calculations of the radio receiving path in the program № 1

Input			Analysis		
Number of Stages	15		Output Power (rms)	-46,8	dBm
Input Power	-82	dBm	Output Voltage (rms)	1.02	mVrms
Analysis Bandwidth	10	MHz	Output Voltage (pp)	2.89	mVpp
PEP-to-RMS Ratio	0	dB	OP1dB	18,7	dBm
P1dB Backoff Warning	0	dB	IP1dB	-15,5	dBm
Peak Backoff Warning	0	dB	Power Gain	35,2	dB
Min S/N for Demod	10	dB	Voltage Gain	35,2	dB
			Noise Figure	11,8	dB
			Output NSD	-127	dBm/Hz
			Output NSD	99,9	nV/rtHz
			Output Noise Floor	-57	dBm
			SNR	10,2	dB
			Input Rx Sensitivity	-82,2	dBm
			OIP3	29,63	dBm
			IIP3	-5,6	dBm
			IMD3 ((Pin-3dB) per tone)	-158,9	dBc
			SFDR	57,6	dB
			ACLR (est.)	-10	dB
			Pwr Consumption	0	W

Рис. 3. Результаты расчетов радиоприемного тракта в программе № 2
Fig. 3. The results of calculations of the radio receiving path in the program № 2

Сравнивая результаты расчетов, можно заметить, что параметры OIP3, IIP3, SFDR, Noise Floor различаются. В связи с этим целью данной статьи является разработка оригинальной программы на основе методики, предложенной в [2], которая по функционалу не уступает зарубежным аналогам и обладает рядом полезных для расчетов уточнений.

Среди недостатков программы № 1, разработанной Agilent, можно выделить: отсутствие элементной базы; при отсутствии параметра IIP3 предлагается использовать значение 100 дБм. Программа № 2, разработанная Analog Devices, имеет такие же недостатки, как и программа № 1, за исключением того, что имеется БД собственных микросхем.

На рис. 4 приведены результаты расчетов радиоприемного тракта в программе, разработанной автором статьи. Отличительными особенностями программы являются:

коэффициент шума структуры радиоприемного тракта, уточненный обратными потерями (Return Loss) и коэффициентом шума АЦП; расчет динамического диапазона по IP3; редактируемая база микросхем на основе файла csv. Предусмотрены опции для подсветки каскада с наибольшим вкладом в общий коэффициент шума и IP3.

The screenshot shows a software interface with the following sections and parameters:

- Noise Figure (dB)/(pas):** 12.1863 / 16.5436
- Noise floor (dBm/Hz):** -103.977
- MDS (dBm):** -91.7909
- Power Gain (dB)/(pas):** 35.2 / 3311.31
- Sensitivity:** Sensitivity (dBm) = -81.7909, SNR (dB) = 10, Nois (dB) = 12.1863, EFBand (MHz) = 10
- Nois ADC:** Noise (dB) = 26.609, Vref (p-p) = 2.04, Fs (MHz) = 1800, Rin (ohm) = 200, SNRadc (dB) = 62
- Setup:**
 - Показать макс. вклад каскадов IP3
 - Максимальный вклад N
 - Учесть согласование цепей
 - Учесть шум ADC
 - DD IP3 до 1 mixer
 - DD IP3 до 2 mixer
 - DD IP3 до 3 mixer

Рис. 4. Результаты расчетов радиоприемного тракта в разработанной программе

Fig. 4. Results of calculations of the radio receiving path in the developed program

В связи с тем, что в разных литературных источниках, например, [3–5], по исследованию коэффициента шума АЦП представлены различные формулы (1)–(3), то целесообразно привести некоторые выкладки по расчету коэффициента шума и обосновать выбор формулы, которая и была реализована в разработанной программе.

$$NF_{ADC} = 20 \cdot \lg(V_{p-p} \cdot 10^6) + 59,25[\text{дБ}] - 6,02 \cdot N - 10 \cdot \lg(f_s), \quad (1)$$

где V_{p-p} – напряжение полной шкалы АЦП; N – количество разрядов АЦП; f_s – частота дискретизации АЦП.

$$NF_{ADC} = 10 \cdot \lg\left(\frac{V_{p-p}^2 [\text{В}]}{8 \cdot R_{IN} [\text{Ом}]} \cdot 1000\right) - \left(SNR_{ADC} [\text{дБ}] + 10 \cdot \lg\left(\frac{f_s [\text{Гц}]}{2}\right)\right) - kTB, \quad (2)$$

где R_{IN} – входное сопротивление АЦП; SNR_{ADC} – сигнал/шум АЦП; $kTB = -174 \text{ dBm/Hz}$.

$$NF_{ADC} = 10 \cdot \lg\left(1 + \frac{V_{p-p}^2 [\text{В}]}{2^{2 \cdot N} \cdot 6 \cdot f_s \cdot R_0 \cdot T \cdot \kappa}\right), \quad (3)$$

где R_0 – стандартное сопротивление 50 Ом; T – температура окружающей среды (293 К); $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Используя формулы (1)–(3) можно рассчитать коэффициент шума для АЦП и сравнить со значением, представленным в datasheet. Например, для ADS4149 фирмы Texas instr. коэффициент шума указан $NF_{ADC} = 25,1 \text{ дБ}$ при $V_{p-p} = 2 \text{ В}$, $R_{IN} = 200 \text{ Ом}$, $f_s = 250 \text{ MSPS}$, $SNR_{ADC} = 71,9 \text{ дБ}$, $N = 16 \text{ bit}$. Подставив данные значения в формулы (1)–(3), получим: $NF_{ADC1} = 4,974 \text{ дБ}$, $NF_{ADC2} = 25,1103 \text{ дБ}$ и $NF_{ADC3} = 6,1 \text{ дБ}$. Для АЦП AD9208 $NF_{ADC} = 24,5 \text{ дБ}$ по datasheet, при параметрах $V_{p-p} = 2,04 \text{ В}$, $R_{IN} = 200 \text{ Ом}$, $f_s = 3000 \text{ MSPS}$, $SNR_{ADC} = 61,8 \text{ дБ}$, $N = 14 \text{ bit}$. Подставив значения в формулы (1)–(3), получим: $NF_{ADC1} = 6,391 \text{ дБ}$, $NF_{ADC2} = 24,5905 \text{ дБ}$ и $NF_{ADC3} = 7,21 \text{ дБ}$. Как видно из вычислений, результат расчета по формуле (2) соответствует значению из datasheet, а вот остальные формулы вызывают сомнения в своей корректности.

В разработанной программе расчет IP3 производится по принципу суперпозиции, т. е. каскады, у которых не представлен данный параметр, объединяются с последующим каскадом/каскадами, для которых представлен данный параметр. Коэффициенты передач данных каскадов перемножаются по мощности (складываются в дБ) для данных блоков.

На рис. 5 представлен алгоритм разработанной программы для расчета системных характеристик радиоприемного тракта. При запуске программы у пользователя есть на выбор ввести данные либо выбор предложенных элементов из БД. После заполнения всех полей программа конвертирует данные и заполняет структуру. Из полученных данных производится анализ заполненных полей. Далее производится расчет коэффициента шума, IP3 и каскадов, вносящих максимальный вклад в общий коэффициент шума и IP3. При проверке структуры входных данных программа проверяет на заполнение поля «чувствительность», при ее отсутствии выдает предупреждение о «некорректном расчете и необходимости заполнить данное поле», иначе производит расчет ДД IP3. Программа также рассчитывает MDS, Noise floor, Output power/voltage, OP1/IP1 и общий коэффициент усиления тракта. Все полученные рассчитанные данные заполняются в выходной структуре, значения которой выводятся в приложении.

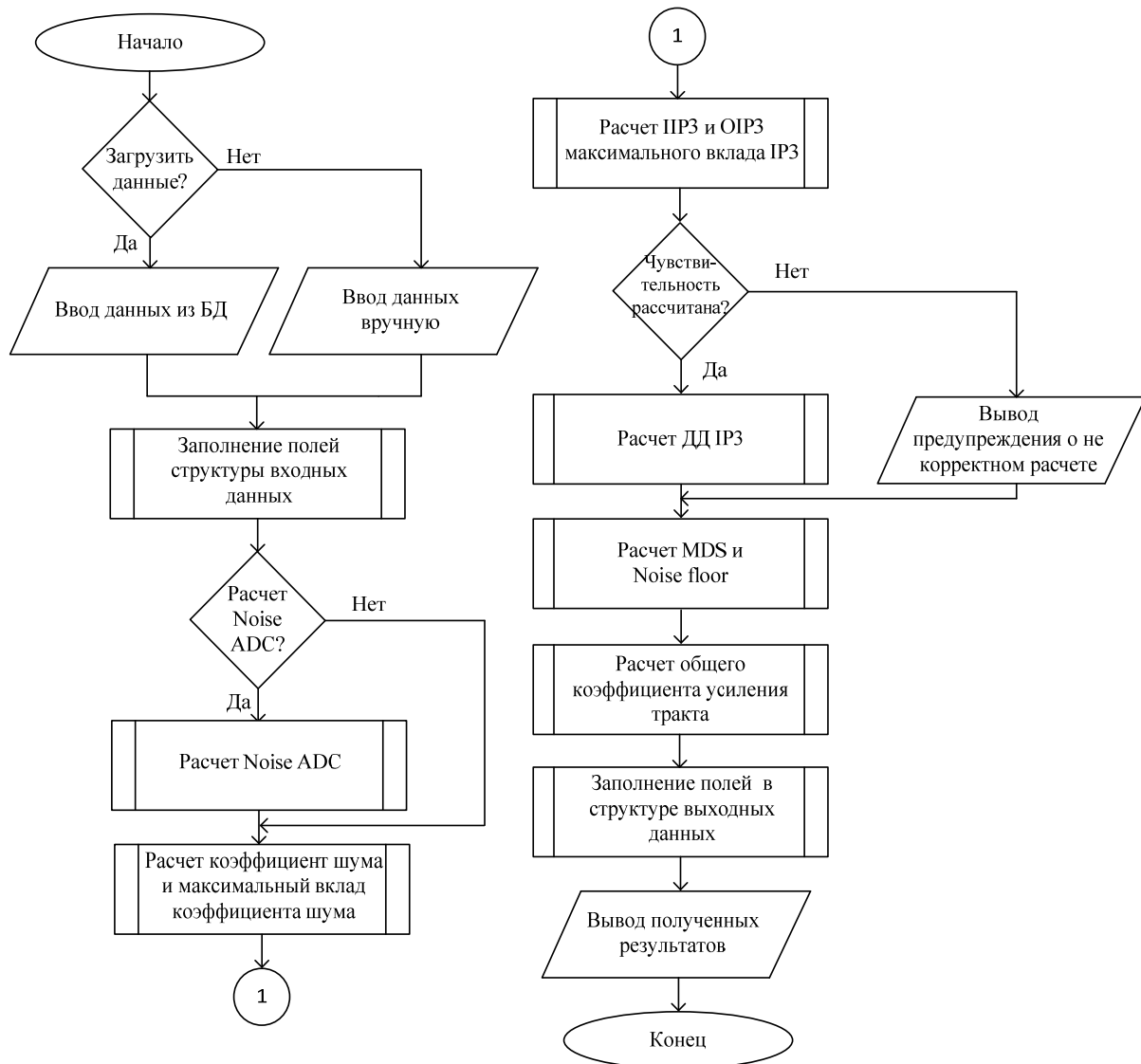


Рис. 5. Алгоритм разработанной программы для расчета системных характеристик радиоприемного тракта

Fig. 5. The algorithm of the developed program for calculating the system characteristics of the radio receiving path

Согласно представленному алгоритму был произведен расчет рассматриваемого в статье радиоприемного тракта.

Заключение

В статье представлен сравнительный анализ программ моделирования радиоприемных трактов на основе интегральных микросхем. По итогам моделирования и сравнения полученных результатов системных характеристик было принято решение о разработке оригинальной программы, которая может быть полезна разработчикам радиоприемных трактов как альтернативный аналог зарубежным. Данная программа обладает рядом особенностей: редактируемой БД; уточненным коэффициентом шума (с помощью коэффициента шума АЦП и обратных потерь); производит расчет динамического диапазона по интермодуляции третьего порядка. Данные особенности позволяют повысить точность расчетов и ускорить процесс вычисления системных характеристик радиоприемного тракта.

Список литературы

1. Архипенков Д.В., Забеньков И.И., Солонович С.С. Способы структурно-функциональной реализации сверхширокодиапазонных приемных трактов. *Доклады БГУИР*. 2020;18(7):23-30.
2. Клич С.М., Кривенко А.С., Носикова Г.Н. и др. *Проектирование радиоприемных устройств*. Под редакцией А.П. Сиверса. Москва: Советское радио; 1976.
3. Забеньков И.И., Исакович Н.Н., Жданов С.Л., Еньков Д.А., Забеньков А.И. Проектирование цифровых приемных устройств. *Доклады БГУИР*. 2006;1(13):44-54.
4. Воробьев О.В., Прасолов А.А. Сравнение методов повышения динамического диапазона АЦП цифровых радиоприемных устройств. *Труды учебных заведений связи*. 2018;4(2):61-68.
5. Neu T. Direct RF conversion: from vision to reality. *Texas Instruments*. 2015:1-8.

References

1. Arkhipenkov D.V., Zabenkov I.I., Salanovich S.S. [Methods of structural and functional implementation of ultra-wide range receiving paths]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020; 18(7):23-30. (In Russ.)
2. Klitsch S.M., Krivenko A.S., Novikova G.N. et al. [Design of radio receiving devices]. Edited by A.P. Sievers. Moscow: Sovetskoe Radio; 1976. (In Russ.)
3. Zabenkov I.I., Isakovich N.N., Zhdanov S.I., Yenkov D.A., Zabenkov A.I. [Digital receivers design]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2006;1(13):44-54. (In Russ.)
4. Vorobiev O.V., Prasolov A.A. [Comparison of methods for increasing the dynamic range of ADC in digital radio receivers]. *Trudi uchebnih zavedenii = Trudi uchebnih zavedenii*. 2018;4(2):61-68.
5. Neu T. Direct RF conversion: from vision to reality. *Texas Instruments*. 2015:1-8.

Сведения об авторах

Архипенков Д.В., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Arkhipenkov D.V., Postgraduate student at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.: +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel.: +375-29-260-74-76;
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich