

УДК 621.396

Разработка математической модели шумовых характеристик гетеродина современных анализаторов спектра

Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Петров А.Е.

Уровень фазовых шумов – это одна из важнейших характеристик выходного сигнала любого синтезатора частот. Для теоретического анализа используются математические модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов, представленные в виде степенных полиномов. В данной статье была разработана математическая модель СПМ фазовых шумов малошумящего гетеродина анализатора спектра СК4-Белан 240. Гетеродин является гибридным синтезатором частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза, он обеспечивает широкую полосу выходных частот одновременно с хорошими шумовыми и спектральными характеристиками. Проведённый с помощью разработанной математической модели анализ шумовых характеристик позволил определить звенья синтезатора, вносящие наибольший вклад в результирующий уровень фазовых шумов.

Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, ЦВС, ФАПЧ, фазовый шум, гетеродин, анализатор спектра.

В настоящее время ужесточаются требования к характеристикам и параметрам гетеродинов контрольно-измерительной аппаратуры. Гетеродины должны формировать широкий диапазон частот, маленький шаг перестройки, а также обеспечивать низкий уровень фазовый шумов и малое количество дискретных побочных составляющих спектра выходного сигнала. Для достижения данных параметров гетеродина, как правило, реализуются на основе гибридного метода синтеза частот. Гибридные синтезаторы частот (ГСЧ) сочетают прямой аналоговый, косвенный и прямой цифровой методы синтеза, за счёт этого недостатки, присущие синтезаторам, построенным на основе одного метода синтеза, компенсируются достоинствами синтезаторов на основе другого метода [1–3].

Одним из крупнейших отечественных производителей анализаторов спектра является фирма «Элвира». Анализаторы спектра семейства СК4-Белан, производства данной фирмы, за счёт применения гетеродина [4], построенного на гибридном методе синтеза, имеют низкий уровень собственных фазовых шумов, а, следовательно, высокую чувствительность, что позволяет их использовать для измерения шумовых характеристик формирователей прецизионных сигналов.

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов – важнейший критерий оценки любого источника гармоническо-

го сигнала. Она является качественным показателем того, насколько точно данный генератор может воспроизводить одну и ту же частоту. Для теоретического анализа шумовых характеристик синтезаторов частот применяются математические модели СПМ фазовых шумов [5–14].

Целью данной работы является разработка математической модели СПМ фазовых шумов малошумящего гетеродина анализатора спектра СК4-Белан-240, реализованного на основе косвенного и прямого цифрового методов синтеза.

Структурная схема гетеродина анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240 представлена на рис. 1. Гетеродин является гибридным синтезатором частот, состоящим из двух синтезаторов прямого цифрового метода синтеза – цифровых вычислительных синтезаторов ЦВС1 и ЦВС2, которые тактируются генератором опорной частоты ГОЧ, и двухкольцевой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). ЦВС1 формирует опорный сигнал первого кольца ФАПЧ, сигнал подаётся на фазовый детектор ФД1. В структуру первого кольца ФАПЧ входит также ФНЧ1 и перестраиваемый генератор с резонатором на железо-иттриевом гранате – ЖИГ-генератор. Выходной сигнал ЖИГ-генератора с частотой $f_{ВЫХ}$ является выходным сигналом всего устройства, а также подаётся через цепь обратной связи на смеситель (СМ1). Полосовой

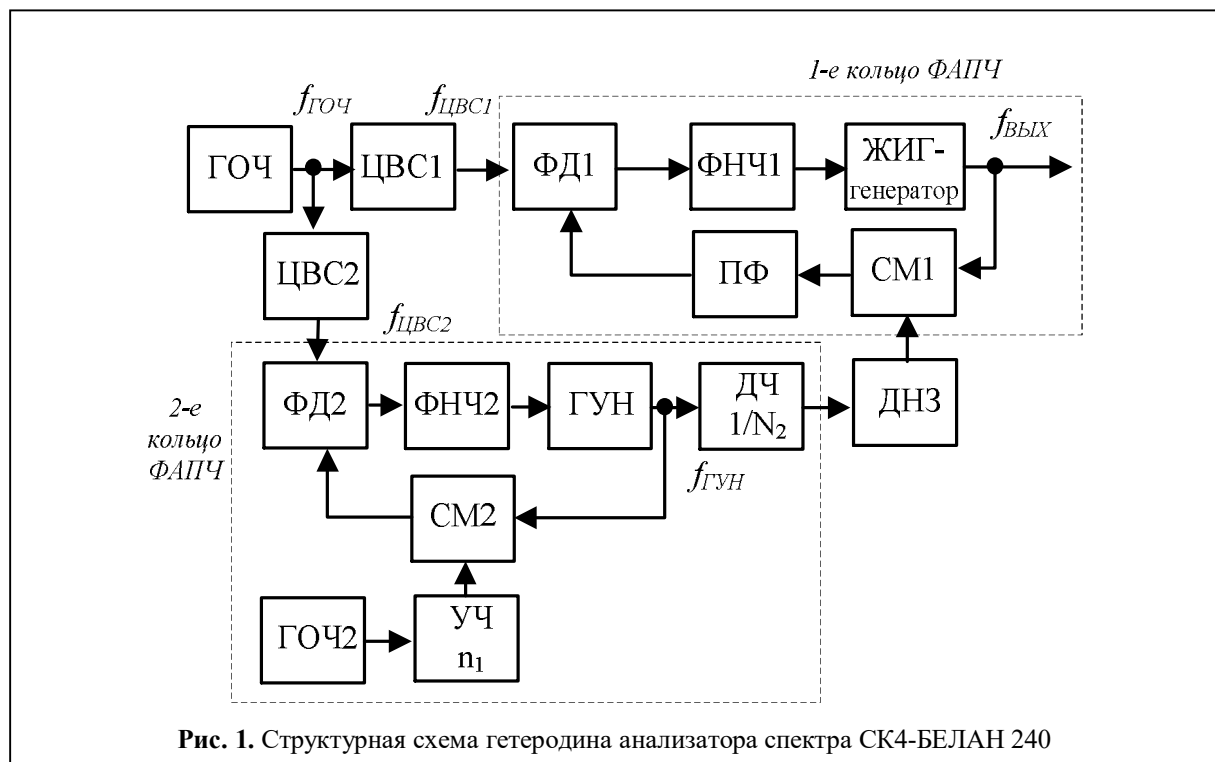


Рис. 1. Структурная схема гетеродина анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240

фильтр (ПФ) выделяет сигнал с разностной частотой, который затем подаётся на второй вход ФД1. Цифровой вычислительный синтезатор ЦВС2 формирует опорный сигнал для второго кольца ФАПЧ. В состав второго кольца входят фазовый детектор ФД2, петлевой фильтр ФНЧ2 и генератор, управляемый напряжением (ГУН). В цепь обратной связи второго кольца ФАПЧ установлен смеситель СМ2, на который подаётся сигнал подставки с дополнительного ГОЧ2, выходной сигнал которого умножается в умножителе УЧ в n_1 -

частоты $f_{ГУН}$ и является подставкой на второй вход смесителя СМ1.

Гетеродин формирует сигнал с частотами от 4421,4 МГц до 7621,4 МГц. Мелкий шаг перестройки частоты обеспечивается цифровыми вычислительными синтезаторами, крупный шаг перестройки осуществляется за счёт переключения на соседнюю гармонику ДНЗ. Экспериментально полученные значения СПМ фазовых шумов гетеродина анализатора спектра СК-4 БЕЛАН 240 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментально полученные значения СПМ фазовых шумов гетеродина анализатора спектра СК-4 БЕЛАН 240

	Значения СПМ фазовых шумов, дБн/Гц					
	Отстройка от несущей					
	10 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц
Гетеродин анализатора СК-4 БЕЛАН 240 (при $f_{ВЫХ} = 4021,4$ МГц)	-61	-99	-119	-129	-126	-149

раз. Выходной сигнал ГУН делится в делителе ДЧ в N_2 -раз и затем подаётся на диод с накоплением заряда (ДНЗ). Диод, по сути, является генератором гармоник выходной

Математическая модель СПМ фазовых шумов гетеродина основана на математической модели СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора, построенного на ЦВС и двухкольцевой ФАПЧ [2, 7], и имеет вид

$$S_{Б240}(F) = [S_{ГОЧ}(F) \cdot K_{ЦВС1}^2 + S_{ЦВС1}(F) + S_{ФД1}(F) + S_{ФНЧ1}(F) + S_{ПФ}(F) + S_{СМ}(F) + S_{ПОДСТ2}(F)] \cdot |H_{311}(j2\pi F)|^2 + S_{ЖИГ}(F) \cdot |H_{321}(j2\pi F)|^2, \quad (1)$$

где $S_{ГОЧ}(F)$, $S_{ЦВС1}(F)$, $S_{ФД1}(F)$, $S_{ФНЧ1}(F)$, $S_{ПФ}(F)$, $S_{СМ}(F)$, $S_{ДЧ}(F)$, $S_{ДНЗ}(F)$, $S_{ЖИГ}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты, цифрового вычислительного синтезатора ЦВС1 с коэффициентом передачи $K_{ЦВС1}$, фазового детектора ФД1, петлевого ФНЧ1, полосового фильтра ПФ, смесителя, делителя ДЧ, диода с накоплением заряда ДНЗ, ЖИГ-генератора, соответственно;

$H_{311}(j2\pi F) = H_{11}(j2\pi F)/(1 + H_{11}(j2\pi F))$ – передаточная функция первого кольца ФАПЧ по внешним шумам, $H_{321}(j2\pi F) = 1/(1 + H_{11}(j2\pi F))$ – передаточная функция первого кольца ФАПЧ по внутренним шумам,

$H_{11}(j2\pi F) = \left(\frac{F_{ФНЧ1}(j2\pi F) \cdot s_{ФД1} \cdot s_{ЖИГ}}{j2\pi F} \right)$ – передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ, $F_{ФНЧ1}(j2\pi F)$ – передаточная функция ФНЧ1, $s_{ФД1}$ – крутизна дискриминационной характеристики ФД1; $s_{ЖИГ}$ – крутизна регулировочной характеристики ЖИГ-генератора;

$$S_{ПОДСТ2}(F) = \frac{1}{N_2^2} \cdot \left[[S_{ГОЧ}(F) \cdot K_{ЦВС2}^2 + S_{ЦВС2}(F) + S_{ФД2}(F) + S_{ФНЧ2}(F) + S_{СМ2}(F) + S_{ГОЧ2}(F) \cdot n_1^2 + S_{УЧ}(F)] \times |H_{312}(j2\pi F)|^2 + S_{ГУН}(F) \cdot |H_{322}(j2\pi F)|^2 + S_{ДЧ} \right] \cdot n_{ДНЗ}^2 + S_{ДНЗ}(F), \quad (2)$$

где $S_{ЦВС1}(F)$, $S_{ФД1}(F)$, $S_{ФНЧ1}(F)$, $S_{ПФ}(F)$, $S_{СМ}(F)$, $S_{ЖИГ}(F)$, $S_{ДЧ}(F)$, $S_{ДНЗ}(F)$ – модели СПМ фазовых шумов генератора опорной частоты, цифрового вычислительного синтезатора ЦВС1, фазового детектора ФД1, петлевого ФНЧ1, полосового фильтра ПФ, смесителя, ЖИГ-генератора, делителя частот, ДНЗ, соответственно; $n_{ДНЗ}$ – номер гармони-

ки в ДНЗ; $H_{312}(j2\pi F) = H_{12}(j2\pi F)/(1 + H_{12}(j2\pi F))$ – передаточная функция второго кольца ФАПЧ по внешним шумам,

$H_{322}(j2\pi F) = 1/(1 + H_{12}(j2\pi F))$ – передаточная функция первого кольца ФАПЧ по внутренним шумам,

$H_{12}(j2\pi F) = \left(\frac{F_{ФНЧ2}(j2\pi F) \cdot s_{ФД2} \cdot s_{ГУН}}{j2\pi F} \right)$ – передаточная функция разомкнутого второго кольца ФАПЧ, $F_{ФНЧ2}(j2\pi F)$ – передаточная функция ФНЧ2, $s_{ФД2}$ – крутизна дискриминационной характеристики ФД2; $s_{ГУН}$ – крутизна регулировочной характеристики ГУН.

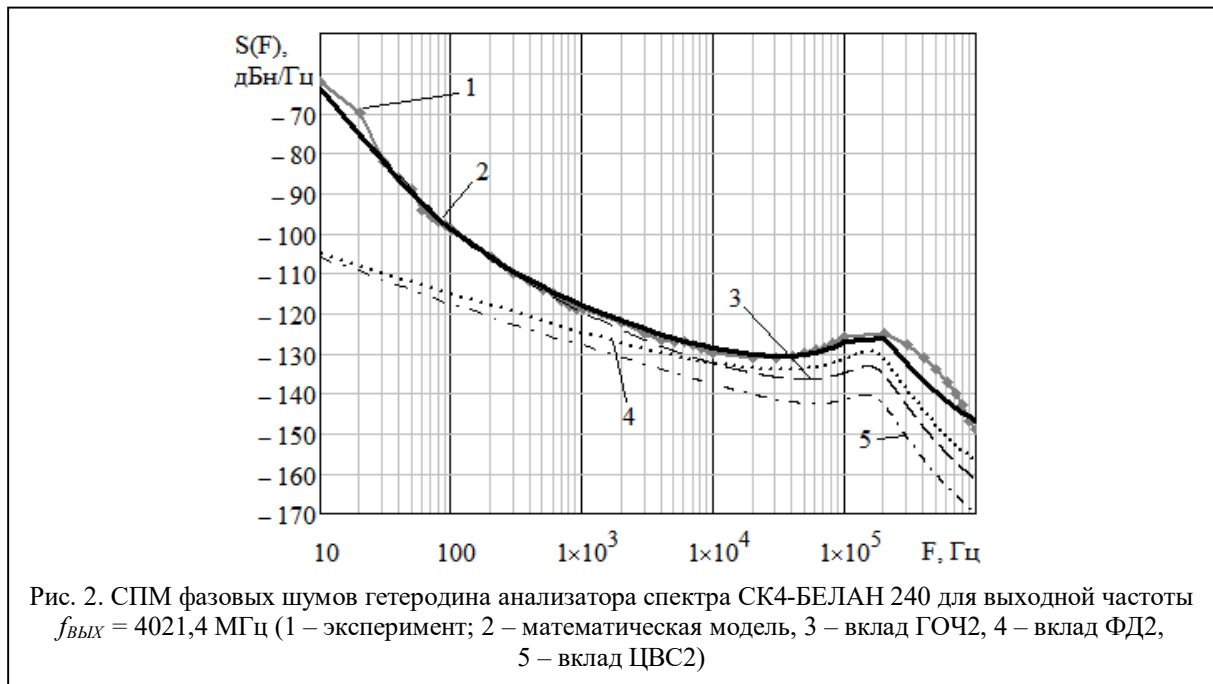
На рис. 2 представлены результаты сравнения разработанной математической модели СПМ фазовых шумов гетеродина анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240 с экспериментальными характеристиками из [4].

По рис. 2 можно сделать вывод, что разработанная математическая модель СПМ фазовых шумов позволяет с высокой точностью провести моделирование СПМ фазовых шумов. Как видно из результатов моделирования, основной вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов на частотах отстройки до 7 кГц вносит ГОЧ2, на отстройках свыше 7 кГц – ФД2. Цифровой вычислительный синтезатор ЦВС2 практически не вносит вклад.

Таким образом, предлагаемая математическая модель позволяет на стадии проектирования рассчитать уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов для любой архитектуры гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза, а также определить звенья, вносящие наибольший вклад в результирующий уровень СПМ фазовых шумов.

Литература

1. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.



2. Romashov V.V., Khranov K.K., Yakimenko, K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400.

3. Romashov V.V., Romashova L.V., Khranov K.K., Yakimenko K.A., Doktorov A.N. Wide-band hybrid frequency synthesizer with improved noise performance // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings. № 1. 2018. С. 1–4. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337224.

4. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы // Компоненты и технологии. 2009. №6. С. 142–147.

5. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // Proc. of the 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 20–22, 2015. ISBN: 978-147997102-2. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198.

6. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 5–20.

7. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2014. № 16. С. 18–24.

8. Ромашов В.В., Якименко К.А., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 1. С. 6–17.

9. Ромашов В.В., Якименко К.А. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 3. С. 3–9.

10. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе однокольцевой ИФАПЧ со смесителем и цифрового вычислительного синтезатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4 (12). С. 23–29.

11. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Применение образов основной частоты ЦВС в гибридных синтезаторах частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №3. С. 19–24.

12. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А., Докторов А.Н., Овчинников Р.В. Снижение уровня фазовых шумов гетеродинов современных анализаторов спектра при применении образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 65–68.

13. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирователи сетки опорных частот возбуждителя передатчика с использованием образов основной частоты //

Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 44–47.

14. Ромашов В.В., Якименко К.А. Программный комплекс для проектирования гибридных

Поступила 12 августа 2018 г.

синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 1. С. 36–44.

Phase noise level is one of the most important characteristics of the output signal of any frequency synthesizer. For theoretical analysis, we use mathematical models of the power spectral density (PSD) of phase noise, presented in the form of power polynomials. In this article, a mathematical model of SPM phase noise of low noise heterodyne spectrum analyzer SK4-Belan 240 was developed. Heterodyne is a hybrid frequency synthesizer based on direct digital and indirect methods, it provides a wide band of output frequencies at the same time with good noise and spectral characteristics. The analysis of noise characteristics carried out with the help of the developed mathematical model made it possible to determine the links of the synthesizer that make the greatest contribution to the resulting level of phase noise.

Key words: hybrid frequency synthesizer, DDS, PLL, phase noise, heterodyne, spectrum analyzer.

Ромашов Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Ромашова Любовь Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovamurom@mail.ru.

Якименко Кирилл Александрович – инженер кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Петров Андрей Евгеньевич – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: petrov_a@mail.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.