

Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Петров А.Е.
 Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного
 учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет
 имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23
 E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.

Математическая модель шумовых характеристик гетеродина анализатора спектра СК4-Белан

Гетеродины современных анализаторов спектра 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, 2].

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов – важнейший критерий оценки любого источника гармонического 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 [3].

Целью данной работы является разработка математической модели СПМ фазовых шумов малощумящего гетеродина анализатора спектра СК4-Белан 240 [4] и исследование с её помощью шумовых характеристик гетеродина.

Гетеродин является гибридным синтезатором частот, состоящим из двух синтезаторов прямого цифрового метода синтеза – цифровых вычислительных синтезаторов ЦВС1 и ЦВС2, и двухкольцевой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

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;

$$S_{Подст2}(F) = \frac{1}{N_2^2} \cdot \left[[S_{Гоч}(F) \cdot K_{ЦВС2}^2 + S_{ЦВС2}(F) + S_{Фд2}(F) + S_{Фнч2}(F) + S_{См2}(F) + S_{Гоч2}(F) \cdot n_1^2 + S_{Уч}(F)] \cdot |H_{312}(j2\pi F)|^2 + S_{Гун}(F) \cdot |H_{322}(j2\pi F)|^2 + S_{дч} \right] \cdot n_{днз}^2 + S_{днз}(F), \quad (2)$$

где $S_{\text{ЦВС1}}(F)$, $S_{\text{ФД1}}(F)$, $S_{\text{ФНЧ1}}(F)$, $S_{\text{ПФ}}(F)$, $S_{\text{СМ}}(F)$, $S_{\text{ЖИГ}}(F)$, $S_{\text{дч}}(F)$, $S_{\text{ДНЗ}}(F)$ – 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; $n_{\text{ДНЗ}}$ – номер гармоники 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, $H_{12}(j2\pi F) = \left(\frac{F_{\text{ФНЧ2}}(j2\pi F) \cdot s_{\text{ФД2}} \cdot s_{\text{ГУН}}}{j2\pi F} \right)$ – передаточная функция разомкнутого второго кольца ФАПЧ, $F_{\text{ФНЧ2}}(j2\pi F)$ – передаточная функция ФНЧ2, $s_{\text{ФД2}}$ – крутизна дискриминационной характеристики ФД2; $s_{\text{ГУН}}$ – крутизна регулировочной характеристики ГУН.

Проведённые исследования показали, что разработанная математическая модель СПМ фазовых шумов позволяет с высокой точностью провести моделирование СПМ фазовых шумов. В соответствии с результатами 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., Romashova L.V., Khramov 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.
3. 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.
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.