

Шумовые характеристики гибридных синтезаторов частот на основе ФАПЧ и ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений

Гибридные синтезаторы частот обладают достоинствами применяемых в них цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которые позволяют достичь высокого значения выходной частоты, упростить реализацию синтезатора, управление им, при этом получить достаточно низкий уровень фазовых шумов [1,2].

Важным параметром гибридных синтезаторов, определяющим качество работы устройства, является фазовый шум [3,4], оказывающий значительное влияние на выходные характеристики устройств. Основной характеристикой уровня фазовых флуктуаций является спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов выходного сигнала вблизи несущей частоты в зависимости от отстройки при различных значениях выходной частоты [3]. Каждый блок гибридного синтезатора вносит собственный вклад в результирующий выходной фазовый шум.

Разработаны 3 схемы гибридных синтезаторов частот на основе петли ФАПЧ и автоматической компенсации фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ, делителя частоты цепи обратной связи и генератора подставки. Для исследования шумовых характеристик данных гибридных синтезаторов частот составлены их эквивалентные функциональные схемы со всеми источниками действующих фазовых шумов.

Поскольку все шумы, генерируемые или добавляемые каждым компонентом схемы малы по сравнению с мощностью полезного сигнала, в соответствии с правилом наложения их можно добавлять к соответствующим входным или выходным воздействиям [1-4]. На основе эквивалентных схем получены результирующие выражения для СПМ фазовых флуктуаций гибридных синтезаторов с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС при воздействии некоррелированных возмущений основных блоков устройства.

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве опорного генератора системы ФАПЧ получили

$$S_{\text{вых}}(F) = \left(S_{\text{ог}}(F) \cdot K_{\text{цвс}}^2 + S_{\text{цвс}}(F) \cdot \left(\frac{n}{2K_{\text{цвс}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{фд1}}(F) + S_{\text{дч}}(F) + S_{\text{фд2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left(S_{\text{гун}}(F) + S_{\text{впт}}(F) \cdot \left(\frac{K_r}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (1)$$

где символами S и H с нижними индексами обозначены СПМ фазовых шумов и передаточные функции соответствующих блоков, K_r - крутизна управляющей характеристики ГУН, p - оператор Лапласа, $M_{(p)}$ - коэффициент передачи фильтра в кольце фазовой автоподстройки, $K_{д1}$ - крутизна дискриминационной характеристики фазового детектора ФАПЧ; N_1 , N_2 , N_3 - коэффициенты деления частоты ФАПЧ, n - коэффициент усиления постоянного тока автокомпенсатора, $K_{\text{цвс}}$ - коэффициент передачи ЦВС, n_1 - коэффициент умножения в цепи смещения;

$$H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2}{1 + H_1(p)} - \text{передаточная функция кольца ФАПЧ по внешним шумам};$$

$$H_{32}(p) = \frac{1}{1 + H_1(p)} - \text{передаточная функция кольца ФАПЧ по внутренним шумам};$$

$$H_1(p) = \frac{M_1(p)K_r K_{д1}}{pN_2} - \text{передаточная функция разомкнутого кольца ФАПЧ}.$$

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве делителя частоты петли обратной связи системы ФАПЧ

Секция 7. Машиностроение и материаловедение

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left(\frac{S_{\text{ОР}}(F)}{N_1^2} + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД1}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F)K_{\text{ЦВС}}^2 + S_{\text{ЦВС}}(F) \cdot \left(\frac{n}{2K_{\text{ЦВС}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{ФД2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left(S_{\text{ГВН}}(F) + S_{\text{ВПП}}(F) \cdot \left(\frac{K_{\Gamma}}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (2)$$

где $H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2}{(1+H_1(p))K_{\text{ЦВС}}}$, $H_{32}(p) = \frac{1}{1+H_1(p)}$, $H_1(p) = \frac{M_1(p)K_{\Gamma}K_{\text{Д1}}K_{\text{ЦВС}}}{pN_2}$.

Для схемы гибридного синтезатора с автокомпенсатором фазовых искажений ЦВС в качестве генератора подставки системы ФАПЧ

$$S_{\text{ВЫХ}}(F) = \left(S_{\text{ОР}}(F) \left(\frac{1}{N_1} + \frac{n_1 K_{\text{ЦВС}}}{N_2} \right)^2 + S_{\text{ДЧ1}}(F) + S_{\text{ФД1}}(F) + S_{\text{ДЧ2}}(F) + \frac{S_{\text{СМ}}(F) + S_{\text{ДЧ3}}(F)}{N_2^2} + S_{\text{ВЧ}}(F) \frac{K_{\text{ЦВС}}^2}{N_2^2} + S_{\text{ЦВС}}(F) \cdot \left(\frac{nN_2}{2K_{\text{ЦВС}}} - 1 \right)^2 + S_{\text{ФД2}}(F) \cdot n^2 \right) \cdot |H_{31}(F)|^2 + \left(S_{\text{ГВН}}(F) + S_{\text{ВПП}}(F) \cdot \left(\frac{K_{\Gamma}}{p} \right)^2 \right) \cdot |H_{32}(F)|^2, (3)$$

где $H_{31}(p) = \frac{H_1(p)N_2N_3}{1+H_1(p)}$, $H_{32}(p) = \frac{1}{1+H_1(p)}$, $H_1(p) = \frac{M_1(p)K_{\Gamma}K_{\text{Д1}}}{pN_2N_3}$.

Определены шумовые вклады всех составляющих звеньев для трех разработанных схем гибридных синтезаторов на основе ФАПЧ и ЦВС с автоматической компенсацией фазовых искажений, проведено моделирование шумовых характеристик. Основные соотношения СПМ входящих в схему блоков взяты из [3], также использована модель спектральных характеристик ЦВС из [1]. Исследования шумовых вкладов отдельных блоков показали, что предложенная схема автокомпенсатора подавляет паразитное фазовое отклонение на выходе ЦВС на $10 \log(1 + N_p)$ дБ, при этом создавая собственные небольшие шумы фазового детектора и усилителя постоянного тока. Установлено, что наибольшим уровнем фазовых шумов обладает гибридный синтезатор с ЦВС в качестве опорного генератора системы ФАПЧ, наименьшим - с ЦВС в качестве генератора подставки.

Литература

1. 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. №2 (10), 2014. – С. 30-38.
2. Surzhik D.I., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Kharchuk S.M. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.
3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Vasilyev G.S., Kurilov I.A., Kuzichkin O.R., Surzhik D.I., Kharchuk S.M. Modeling of noise properties of the signals former based on direct digital frequency synthesizer with autocompensating phase noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. –Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. - IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.