УДК 621.396.96

М. П. Кандирін, О. М. Дзігора

ФАЗОВІ ШУМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗАТОРІВ В ДІАПАЗОН НВЧ

***Анотація**: Розглядаються особливості побудови різних видів перетворювачів сигналів цифрових синтезаторів (DDS - Direct Digital Synthesizer) в діапазон надвисоких частот. Обговорюються можливості використання таких пристроїв для синтезу радіолокаційних гетеродинних і зондувальних сигналів. Для дослідження шумових характеристик таких перетворювачів у роботі використовуються математичні моделі спектральної густини потужності фазових шумів основних функціональних ланок. Наведено вирази для розрахунку і результати математичного моделювання шумових характеристик перетворювачів, а також проведено аналіз внесків окремих функціональних елементів схем перетворювачів у загальний рівень їхніх фазових шумів. Надані практичні рекомендації для розробників подібних перетворювачів щодо зменшення рівня фазових шумів на їхньому виході.*

***Ключові слова**: перетворювач сигналов, цифровий синтезатор сигналів, спектральна густина потужності, фазовий шум.*

***Abstract**: This paper examines the design features of various types of signal converters for digital synthesizers (Direct Digital Synthesizer - DDS) in the ultra-high-frequency range. The possibilities of using such devices for the synthesis of radar heterodyne and sounding signals are discussed. To study the noise characteristics of such converters, this paper uses mathematical models of the spectral power density of phase noise in the main functional stages. This paper presents formulas for calculating and the results of mathematical modeling of the noise characteristics of converters, and analyzes the contributions of individual functional elements of converter circuits to their overall phase noise level. Practical recommendations are provided for designers of such converters on how to reduce the phase noise level at their output.*

***Keywords**: signal converter, digital signal synthesizer, power spectral density, phase noise.*

Сучасні телекомунікаційні системи, радіолокаційні комплекси та новітні засоби зв'язку висувають жорсткі вимоги до чистоти спектра радіосигналів. Цифрові синтезатори частот та сигналів забезпечують високу швидкість перелаштування частоти та надзвичайно дрібний крок сітки, проте їх пряме використання у діапазоні надвисоких частот (НВЧ) обмежене елементною базою та робочими частотами цифро-аналогових перетворювачів. Для перенесення сигналу DDS у НВЧ-діапазон застосовуються спеціалізовані перетворювачі (помножувачі частоти, змішувачі, петлі ФАПЧ та ін.). Ключовою проблемою при цьому є деградація спектральних характеристик та зростання рівня фазових шумів (ФШ), що безпосередньо впливає на чутливість приймачів та ймовірність помилки у цифрових каналах передачі даних.

Фазовий шум – це випадкові флуктуації фази сигналу, до яких вносять свій внесок різні компоненти та ланцюги перетворювача, зокрема й генератор, що відповідає за переналаштування частоти. ФШ перетворювача складається з чотирьох основних компонентів: шуму джерела опорної частоти, шуму синтезатора (DDS), шуму фазового детектора (ФД) та, нарешті, шуму генератора, керованого напругою (ГКН) [1–4].

У доповіді розглядаються чотири варіанти перетворювачів, що найчастіше застосовуються на практиці для перенесення сигналів DDS у діапазон НВЧ [5–7]. Наводяться математичні моделі розрахунку рівня ФШ таких перетворювачів, а також вирази для моделювання внесків кожного елемента схеми у результуючий ФШ [8–10]. Наведено результати порівняльного аналізу перетворювачів за досяжним мінімумом рівня ФШ та результати математичного моделювання ФШ для різних окремо взятих частот, груп частот та складних сигналів.

Надано практичні рекомендації щодо зменшення ФШ. Показано, що зменшення ФШ, особливо поблизу несучої, забезпечується застосуванням малошумного термостатованого кварцового генератора опорної частоти 10 МГц і вище (ОСХО). У системі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) рекомендується застосування ФД з найвищою частотою порівняння. У якості ГКН рекомендується використовувати генератор сигналів з малим рівнем ФШ на основі залізо-ітрієвого гранату (YIG), який має кращі характеристики, ніж типовий ГКН.

Загалом, вибір того чи іншого перетворювача залежить від типу завдань, що вирішуються, та кваліфікації розробника.

Список використаних джерел:

1. Кандирін М. П. Фазовые шумы кварцевых генераторов и генераторов, управляемых напряжением. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2014. № 2(15). С. 127-129.
2. Кандирін М. П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов. *Збірник наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 3(40). С. 63-68.
3. Кандирін М. П. Перспективы использования комбинированных формирователей на основе ФАПЧ и ЦСС для формирования СВЧ сигналов. Фазовые шумы системы ФАПЧ. *Збірник наук. праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 2(39). С. 70-73.
4. Кандирін М. П. Собственные фазовые шумы цифровых вычислительных синтезаторов сигналов. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. Вип. 2(38). С. 99-102.
5. Kroupa V. F. Direct Digital Frequency Synthesizers. John Wiley & Sons, Inc. 1998. 396 p.
6. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособ. / Л.А. Белов. – М: Издательский дом МЭИ. – 2010. – С. 242-266.
7. Кандирін М. П. Исследование шумовых характеристик формирователя сигналов на основе ЦСС при использовании ВЧ боковых составляющих и специальных видов интерполирующих функций для расширения частотного диапазона. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2015. № 1(18). С. 101-108.
8. Кандирін М. П., Дзігора О. М. Внески фазових шумів ланками комбінованого синтезатора з цифровим синтезатором сигналів у якості опорного генератора системи фазового автопідстроювання частоти. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2023. № 2 (51). С. 78-84. https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.10.
9. Кандирін М. П., Дзігора О. М. Внески фазових шумів ланками комбінованого синтезатора з цифровим синтезатором сигналів у колі зворотного зв'язку системи фазового автопідстроювання частоти. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 3 (52). С. 66-73. https://doi.org/10.30748/nitps.2023.52.09.
10. Кандирін М. П., Дзігора О. М. Внески фазових шумів ланками комбінованого синтезатора на основі двокільцевої системи фазового автопідстроювання частоти і цифрового синтезатора сигналів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2024. № 1 (54). С. 111-117. https://doi.org/10.30748/nitps.2024.54.14.

Кандирін Микола Павлович *– кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: kandyrin.family@gmail.com*
ORCID https://orcid.org/0000-0002-0831-4384

Дзігора Олександр Михайлович *– старший викладач кафедри фізики та радіоелектроніки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: rozenboss@gmail.com.*
ORCID https://orcid.org/0000-0002-6614-4694.

Mykola Kandyrin *– PhD in Engineering, Senior Researcher, Researcher of scientific research department of Air Force science center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: kandyrin.family@gmail.com*
ORCID https://orcid.org/0000-0002-0831-4384

Oleksandr Dzihora *– Senior Lecturer of the Department of Physics and Radioelectronics, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: rozenboss@gmail.com ORCID https://orcid.org/0000-0002-6614-4694*