

УДК 621.396.967

М.П. Кандирін

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ЦИФРОВІ СИНТЕЗАТОРИ СИГНАЛІВ У ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТКАХ

Цифрові синтезатори прямого синтезу (DDS) дозволяють цифровими методами формувати сигнали потрібної форми і частоти, стабільність яких визначається задає кварцовим генератором опорної частоти. В даний час їх все частіше використовують, зокрема, в сучасних фазованих антенних решітках (ФАР). Дослідження спектральних і фазових характеристик формувачів сигналів для ФАР на основі DDS і присвячена ця стаття.

Ключові слова: сигнал з лінійною частотною модуляцією, прямий цифровий синтез, фазова автотроювання частоти, фазовий шум, фазованная антенна решітка.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз публікацій.

В останні роки за кордоном, насамперед у США, активно ведуться дослідження в області ФАР з DDS [1, 2]. Так у доповіді Управління наукових досліджень ВМФ США [2] була викладена концепція побудови багатофункціональних радарів для надводних бойових кораблів ВМФ США. Зокрема, вона передбачала оснащення судів багатофункціональними радарми S - і X – діапазону, основні завдання яких зводяться до контролю навколишнього простору і вирішення завдань бойового управління. Програма передбачала розробку радарів, як з нерухомими, так і з поворотними ФАР.

Традиційні системи з ФАР проводилися головним чином на основі аналогових радіочастотних (РЧ) компонентів, дорогих і зазвичай працюють тільки у вузькій смузі частот.

Застосування в РЧ – блоках сучасних цифрових технологій надає розробникам додаткові можливості. Яскравим прикладом служать цифрові обчислювальні синтезатори, які можна знайти практично у всіх нових системах з ФАР.

Активні ФАР з набором DDS дозволяє реалізувати ряд важливих функцій і переваг систем радіолокації, управління та зв'язку, а саме:

- формування сигналів різних типів з широкими діапазонами зміни параметрів, у тому числі сигналів з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ);
- високоточне управління частотою, фазою сигналів і тимчасовими затримками;
- швидка зміна параметрів режимів роботи, типів і параметрів формованих сигналів;
- багатофункціональний режим роботи системи ФАР, коли різні групи активних елементів виконують індивідуальні завдання;
- підвищена надійність і живучість системи, оскільки при виході з ладу одного або декількох елементарних блоків DDS система в цілому залишається працездатною.

Динаміка досліджень за тематикою ФАР з DDS дуже широка, це можна судити хоча б по великій кількості патентів і розробок цифрових радарів з ФАР для американської армії [3, 4].

Проте ні в одній з доступних авторів публікацій не згадується про величину шумових характеристик формувачів сигналів на основі DDS для ФАР. Тому в даній статті постараємося заповнити цей пробіл.

Метою статті є дослідження шумових характеристик формувачів сигналів на основі DDS для передавальних модулів активних ФАР S - і X - діапазонів.

Виклад основного матеріалу

Отже, для наочності і кращого сприйняття подальшого матеріалу на рис. 1 наведена узагальнена структура активних ФАР з цифровим формуванням променя.

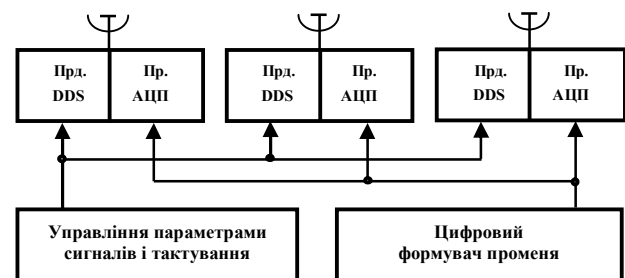


Рис. 1. Структурна схема цифрового формування променя у фазованих антенних решітках

Такий цифровий радар здатний одночасно формувати кілька променів і відслідковувати безліч цілей у різних напрямках. Тут кожен активний елемент ФАР (радіочастотний блок) містить передавач (Прд.), виконаний на цифрових синтезаторах, і приймач (Пр.) з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Крім цифрового формувача променя в систему входять і засоби управління параметрами сигналів з

тактування і синхронізацією. Найсерйозніша проблема подібних ФАР – це забезпечення синхронізації між кількома приймачами або декількома паралельно випромінюючими елементами решітки.

Радіочастотний блок формування сигналу DDS в самому загальному вигляді наведено на рис. 2.

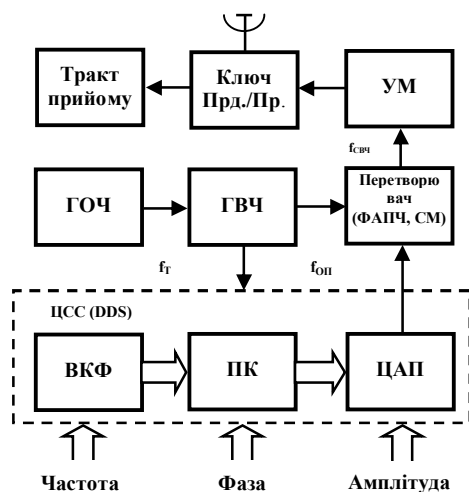


Рис. 2. Структурна схема радіочастотного блоку з використанням DDS

У цифровому синтезаторі сигналів, які періодично, з заданою частотою дискретизації, цифровими методами формуються відліки амплітуди вихідного сигналу. Отриманий код амплітуди, що відповідає поточній фазі, подається на ЦАП, де він перетворюється в напругу. Після ЦАП сигнал фільтрується, потім підсилюється підсилювачем потужності (РОЗУМ) і далі подається на антену через ключ прийом-передача (Прд./Ін.). Найчастіше в елементах активних ФАР як формувачів ВЧ сигналів використовують комбіновані синтезатори з спільним використанням DDS і ФАПЧ, перетворюють сигнали вгору по частоті. При цьому сигнал DDS служить вхідним еталонним сигналом для системи ФАПЧ. Комбінований метод дозволяє отримати високий дозвіл по частоті і фазі, а також високу робочу частоту ФАР.

Для перенесення сформованого сигналу DDS в область високих частот існує багато способів, крім ФАПЧ, в тому числі і з допомогою змішувачів (СМ). Зупинимося докладніше на цих двох способах як найбільш простих і часто використовуваних.

Щоб віддати перевагу тому чи іншому із способів, хотілося б заздалегідь знати величину шумових характеристик вихідних сигналів після їх перенесення в область ВЧ.

При розрахунку шумових характеристик таких формувачів скористаємося моделями з [5]. Формувачі сигналів на основі DDS і ФАПЧ можуть бути реалізовані різними способами.

Один з таких формувачів (активний помножувач частоти на основі системи ФАПЧ), який будемо

розглядати нижче, реалізується в схемі, наведеній на рис. 3.

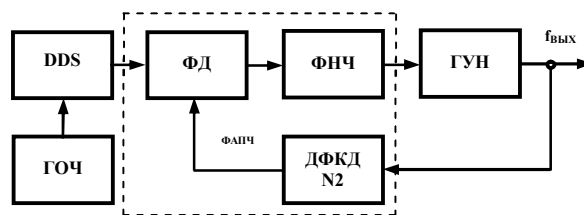


Рис. 3. Структурна схема формувача сигналів на основі DDS і ФАПЧ

При моделюванні шумових характеристик формувача (рис. 3) всі його комплектуючі елементи виберемо з номенклатури продукції, що випускається промисловістю.

Так як генератора опорної частоти (ГОЧ) для синтезатора будемо використовувати малощумящий кварцовий генератор частотою (100 МГц) з малим рівнем фазових шумів (-173 дБ/Гц і 10 кГц) типу FE-102A або MOXO-100.

В якості DDS виберемо синтезатор середньої швидкодії з тактовою частотою в 1000 МГц, але здатого формувати як прості, так і складні широкосмугові сигнали, а саме AD9910.

Вихідний сигнал синтезатора в S-діапазоні частот (1,6...4,1) ГГц формується з допомогою ГУН типу MVCO-2040-SF з фазовими шумами -112 дБн/Гц і 100 кГц, а в X - діапазоні частот (9,05...10,15) ГГц формується з допомогою ГУН HMC511LP5 с фазовими шумами -115 дБн/Гц і 100 кГц. Вихідні сигнали в обох випадках контролюються схеми ФАПЧ, виконаного на інтегральній схемі ADF4107.

Для отримання високої частоти вихідного сигналу DDS необхідна і висока тактова частота, яку будемо отримувати з частоти високостабільного кварцового генератора (100 МГц) шляхом множення на 10 з допомогою вбудованого помножувача на петлі ФАПЧ.

В цьому випадку математична модель СПМ ФШ вбудованого помножувача тактової частоти ФАПЧ буде мати вигляд [5]

$$S_{\text{ФАПЧ}}(F) = [S_{\text{ГОЧ}}(F) + ((S_{\text{ФД}}(F) + S_{\text{ФНЧ}}(F)) / E_{\text{ФД}}^2) + S_{\text{ДФКД}}(F)] \times N_2^2 \cdot |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2. \quad (1)$$

Тоді вираз для розрахунку фазових шумів DDS з урахуванням впливу вбудованого помножувача тактової частоти приймає наступний вигляд

$$S_{\text{Ф}_1}(F) = K_{\text{DDS}}^2 S_{\text{ФАПЧ}}(F) + S_{\text{DDS}}(F), \quad (2)$$

де $S_{\text{DDS}}(F)$ – модель СПМ фазових шумів DDS для основної частоти формування, що має вигляд

$$S_{DDS}(F) = \left(\frac{f_{\text{ВВХ}}}{f_T}\right)^2 \cdot \left(\frac{10^{k_2}}{F^2} + \frac{10^{k_1}}{F} + 10^{k_4}\right) + 10^{k_3} + 2^{-2N-0,59} \cdot \left(\frac{f_{\text{ВВХ}}}{f_T^2}\right) \cdot \left(\pi \frac{f_{\text{ВВХ}}}{f_T} / \sin\left(\pi \frac{f_{\text{ВВХ}}}{f_T}\right)\right)^2, \quad (3)$$

$K_{\text{DDS}} = f_{\text{ВВХ}}/f_T$ – коефіцієнт ділення DDS.

У результаті вираз для СГП фазових шумів всього комбінованого синтезатора (рис. 1) буде виглядати таким чином:

$$S_{\text{ВВХ}}(F) = [S_{\Phi_1}(F) + ((S_{\Phi_D}(F) + S_{\Phi_{\text{НЧ}}}(F))/E_{\Phi_D}^2) + S_{\text{ДФКД}}(F)] \times N_2^2 \cdot |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2. \quad (4)$$

З метою отримання меншого рівня фазових шумів прийемо частоту порівняння ФД 100 МГц, а оскільки DDS є джерелом опорного напруги для ФАПЧ то і частота на його виході повинна бути в районі 100 МГц.

На рис. 4 наведено спектри гармонійного і ЛЧМ сигналів на частоті 100 МГц, синтезовані за допомогою DDS AD9910.

Як бачимо, при формуванні гармонійного сигналу рівень побічних спектральних складових лежать нижче рівня -92 дБ, а при формуванні ЛЧМ сигналу вони становлять менше -50 дБ.

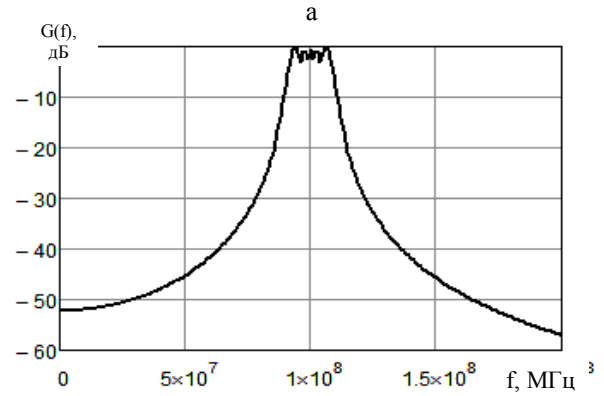
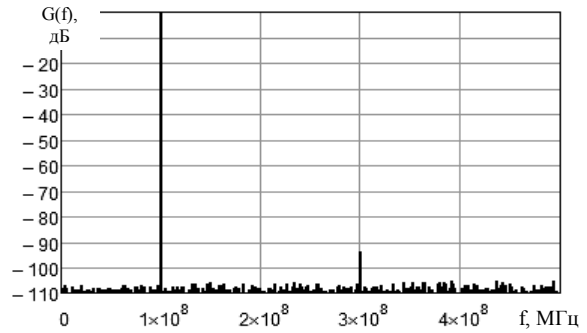


Рис. 4. Спектри сигналів на виході DDS AD9910

Результати моделювання фазових шумів за виразом (4) для вихідних частот комбінованих формувачів S - діапазону з $f_{\text{ВВХ}} = 2300$ МГц і в X - діапазону з $f_{\text{ВВХ}} = 9300$ МГц наведені на рис. 5.

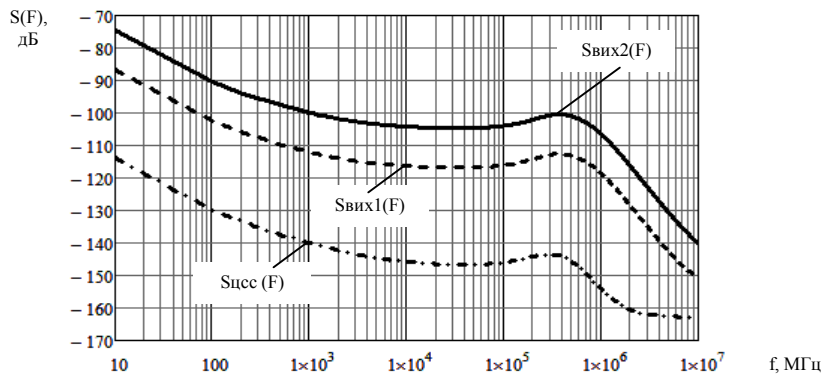


Рис. 5. Шумові характеристики формувачів сигналів на основі AD9910 і ФАПЧ для частот 2300 МГц ($S_{\text{Вих1}}(F)$) та 9300 МГц ($S_{\text{Вих2}}(F)$)

При цьому коефіцієнти розподілу в ланцюзі зворотного зв'язку ФАПЧ становили відповідно – 23 і 93, з тим, щоб частота порівняння ФД була рівною 100 МГц.

Шумова характеристика $S_{\text{DDS}}(F)$ на рис.5 відображає фазові шуми сигналу синтезатора AD9910 (100 МГц) в залежності від частоти відбудови з урахуванням множення частоти ГОЧ вбудованим поміжувачі на ФАПЧ.

Аналіз фазових шумів в обох випадках показує, що їх рівень залежить від величини коефіцієнта ділення в ланцюзі зворотного зв'язку, тобто від коєфі-

цієнта множення системи ФАПЧ. При цьому на спектрі вихідних коливань формувачів можна чітко розрізнити дві частотні області: низькочастотна – зовнішніх шумів, головним джерелом яких є коливання опорного генератора, і високочастотна – внутрішніх шумів, пов'язана з флюктуациями фази ГУН. Межею розподілу цих областей є частота зрізу петлі ФАПЧ, в даному випадку рівна 800 кГц.

У разі застосування однокільцевої системи ФАПЧ виникає суперечність: для того, щоб зменшити вплив фазових шумів ГУН, необхідно зменшити інерційність ФНЧ, а для зниження проникнен-

ня в вихідне коливання зовнішніх фазових шумів, потрібно діяти протилежним чином, тобто робити фільтр більше вузькосмуговим. Цю проблему часто вирішують з допомогою введення в систему ФАПЧ додаткових петель авторегулювання [6, 7].

В результаті однокільцеві схеми ФАПЧ знаходять обмежене застосування, а саме, в системах, що не пред'являють високі вимоги до якості формованого сигналу.

У разі використання ФАР сигналів з ЛЧМ їх фазові шуми можна розрахувати, скориставшись методикою [8].

Основні характеристики формувача можуть бути поліпшені введенням змішувача в ланцюг зворотного зв'язку [9, 10]. При цьому сигнал ГУН переноситься вниз по частоті, що дозволяє значно зменшити коефіцієнт ділення ланцюга зворотного зв'язку.

Спрощена структурна схема такого формувача наведена на рис. 6.

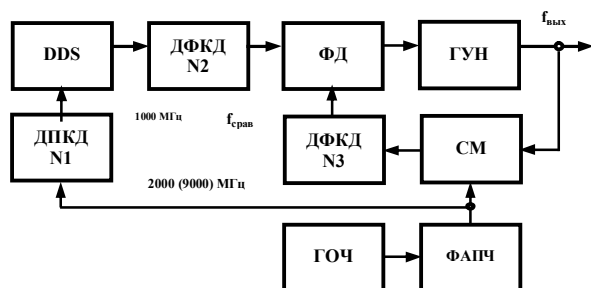


Рис. 6. Структурна схема формувача сигналів із змішувачем в ланцюзі зворотного зв'язку ФАПЧ

Для моделювання ФШ такого формувача скористаємося виразом [8]

$$S_{\text{ВИХ}}(F) = \left[S_{\Phi_2}(F) + S_{\text{ДПКД1}}(F) + S_{\Phi\text{Д}}(F)/E_{\Phi\text{Д}}^2 + (S_{\text{СМ}}(F) + S_{\Phi\text{АПЧ1}}(F))/N_3^2 \right] \times N_3^2 |H_{31}(F)|^2 + S_{\text{ГУН}}(F) \cdot |H_{32}(F)|^2,$$

$$S_{\Phi_2}(F) = K_{\text{DDS}}^2 \cdot S_{\Phi\text{АПЧ1}}(F)/N_1^2 + S_{\text{ДПКД1}}(F) \cdot K_{\text{DDS}}^2 + S_{\text{DDS}}(F),$$

де фазові шуми DDS з урахуванням частоти ФАПЧ1; $S_{\Phi\text{АПЧ1}}(F)$ – опорна частота (гетеродина) для змішувача отримана у відповідності з (1) множенням частоти ГОЧ з допомогою петлі ФАПЧ з коефіцієнтами поділу 20 і 90. При цьому коефіцієнти розподілу становили $N_1 = 2$ (9), а $N_3 = 3$ в обох випадках перетворення.

Розраховані за виразом (6) шумові характеристики, наведені на рис. 7.

Порівнюючи шумові характеристики (рис. 5, 7) видно, що рівень фазових шумів в схемі зі змішувачем всього на (-3...-5 дБ) нижче, ніж зі схемою з дільником в ланцюзі зворотного зв'язку ФАПЧ.

Настільки невелике зменшення рівня шумів пояснюється хоча б тим, що в цьому випадку коефіцієнт множення ФАПЧ і зменшився до 3, але в теж час на вході цієї системи вхідні шуми зросли у 20 і 90 разів відповідно за рахунок множення частоти ГОЧ при отриманні опорної частоти (гетеродина) для змішувача.

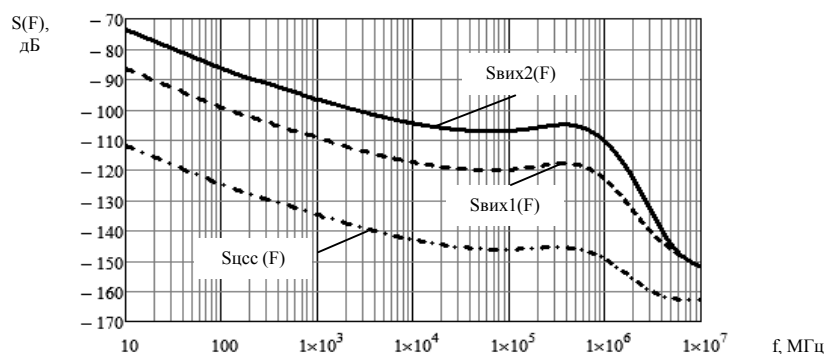


Рис. 7. Шумові характеристики формувача сигналів на основі DDS AD9910 і ФАПЧ із змішувачем в ланцюзі зворотного зв'язку

І в тому і в іншому випадку основний внесок в сумарний рівень фазових шумів вносить ГОЧ, який множиться з допомогою систем ФАПЧ.

Залежно від конкретних вимог до фазових шумів і розділення по частоті можливо введення більшого числа змішувальних каскадів, що, призводить до ускладнення конструкції синтезатора [11].

Інший спосіб зменшення сумарного коефіцієнта ділення засновано на використанні дробові коефіцієнти розподілу, що досягається діленням частоти на N і кожні M періодів сигналу і діленням на N

протягом іншого проміжку часу. У цьому випадку усереднений коефіцієнт розподілу дорівнює $(N \cdot M)/M$, де N і m – цілі числа. Основний недолік дільників з дробовим коефіцієнтом ділення – підвищений вміст негармонічних спектральних складових з-за фазових помилок, притаманних механізму дробового розподілу.

Ще одним ефективним рішенням є використання синтезатора DDS в ланцюзі зворотного зв'язку ФАПЧ, який по суті є дробовим подільником частоти. Однак при цьому необхідно приділяти особливу

увагу спектрального складу вихідного сигналу цифрового синтезатора, який також схильний до збільшення фазових шумів відповідно відношенню вхідний (тактовою) і вихідний частот цифрового синтезатора.

У висновку слід зазначити, що наведені вище методи покращення шумових характеристик цифрових синтезаторів ефективно працюють зі схемами ФАПЧ, що володіють виключно високими фільтруючими властивостями. У свою чергу, цифрові синтезатори дозволяють гнучко змінювати амплітудно-частотно-часові параметри формуються параметрів, що важливо при їх застосуванні в активних елементах ФАР.

Висновки

Аналіз отриманих результатів показав, що з рівня фазових шумів обидва розглянутих комбінованих синтезатора практично ідентичні (різниця в -3...-7 дБ). Для зменшення ФШ необхідно використовувати ГОЧ з гранично малими фазовими шумами. Для радіотехнічних систем з ФАР DDS є найбільш перспективними при рішенні питань формування сигналів на базі спеціалізованих інтегральних схем (AD9910, AD9959, AD9914, AD9915, 1508ПІІ8Т та ін.).

Такі схеми дозволяють забезпечувати багатфункціональний режим з формуванням гармонійних, квадратурних і ЛЧМ сигналів, а також оперативно змінювати режими роботи та параметри сигналів в компактній конструкції з відносно малим енергоспоживанням.

Список літератури

1. Wu Manqing. Digital array radar: Technology and trends / Wu Manqing // 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. – 2011. – Vol. 1. – P. 1-4.
2. Sexton R. R&D in navy phased array radar. – Second national symposium on multi-function phased array technology innovation and development, November 18, 2009.

3. Yinghao Zhang, Wen Wu, Guo Yang, Jianzhong Zhao. DDS-PLL phased source beam control active phased array. – Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China. 2008.

4. Avitabile G., Cannone F., Vania A. Phase shifter based on DDS – driven offset – PLL. Electronics Letters 7th December 2006, vol. 42, no. 25.

5. Кандырин Н.П. Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 3 (40). – С. 63-68.

6. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики двухкольцевой системы ИФАПЧ с преобразованием частоты внутри кольца / Н.П. Кандырин // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 4 (17). – С. 77-81.

7. Кандырин Н.П. Комбинированные синтезаторы сигналов на основе двухкольцевой ИФАПЧ и ЦСС / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 1 (126). – С. 27-31.

8. Кандырин Н.П. Формирование широкополосных ЛЧМ сигналов методом прямого цифрового синтеза и перенос их в диапазон СВЧ. Часть 3. Исследование фазовых шумов синтезаторов ЛЧМ сигналов в диапазоне СВЧ / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 7 (144). – С. 41-46.

9. Кандырин Н.П. Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 8 (124). – С. 30-32.

10. Кандырин Н.П. Шумовые характеристики комбинированного формирователя сигналов на основе однокольцевой системы ФАПЧ со смесителем и цифрового синтезатора сигналов / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 9(125). – С. 35-38.

11. Кандырин Н.П. Комбинированные синтезаторы сигналов на основе двухкольцевой ИФАПЧ и ЦСС / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 1 (126). – С. 27-31.

Надійшла до редколегії 8.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ЦИФРОВЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ СИГНАЛОВ В ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ

Н.П. Кандырин

Цифровые синтезаторы прямого синтеза (DDS) позволяют цифровыми методами формировать сигналы нужной формы и частоты, стабильность которых определяется задающим кварцевым генератором опорной частоты. В настоящее время их все чаще используют, в частности, в современных фазированных антенных решетках. Исследованию спектральных и фазовых характеристик формирователей на основе DDS при формировании СВЧ сигналов и посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: сигнал с линейной частотной модуляцией, прямой цифровой синтез, фазовая автоподстройка частоты, фазовый шум, фазированная антенная решетка.

DIGITAL SYNTHESIZERS OF SIGNALS IN PHASED ARRAY

N.P. Kandyrin

Synthesizers direct digital synthesis (DDS) techniques allow digital signals to form the desired shape and frequency, the stability of which is determined by specifying a quartz reference oscillator. Now they are increasingly being used, particularly in modern phased antenna arrays. The study of the spectral and phase characteristics of shapers based on the DDS in the formation of microwave signals and the subject of this article.

Keywords: signal with linear frequency modulation, direct digital synthesis, phase locked loop, phase noise, phased array antenna.