

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОШВИДКІСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ ЧАСТОТИ (DDS)

Розглянуто методи підвищення якості спектральних характеристик синтезованих сигналів обчислювальних синтезаторів частоти. Запропоновані структури синтезаторів із покращеними спектральними характеристиками. Застосування запропонованих структур синтезаторів дозволить зменшити рівні поза смугових випромінювань апаратури радіозв'язку, що використовує цифрові обчислювальні синтезатори.

Ключові слова: : АЦП, ЦАП, обчислювальний синтезатор частоти, фазовий акумулятор, поле Галуа, алгебра логіки

О.І. POLIKAROVSKYKH, V.V. MISHAN

Хмельницький національний університет

METHODS OF IMPROVING SPECTRAL CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED DDS

Methods of improving the quality of the spectral characteristics of the synthesized signal DDS. The proposed structure DDS with improved spectral characteristics. Application of the proposed structures synthesizers will reduce the level of spurs outside the band radio equipment that uses DDS. The methods and means of reducing the lateral spectral components in the output spectrum of the classical computational synthesizer based on accumulative adder. We found that it is possible to build a synthesizer with high tactical and technical characteristics of the algorithm used by Wheatley. The possibilities of the application of new mathematical approaches for building adders without a problem propagation delay signal transfer from the category in the category codeword. Consider a Boolean algebra operations over a couple of numbers and the theory of Galois fields to improve performance synthesizer. The mathematical apparatus will build a digital computer synthesizer with lower levels of lateral components in the spectrum of the output signal, due to some complications of the internal structure of the synthesizer using two additional adders and pseudo-random number generator.

Keywords: ADC, DAC, Galois, direct frequency synthesizer (DDS).

Постановка задачі

Обчислювальним синтезаторам притаманна операція квантування відліків фази та амплітуди синтезованих сигналів, що приводить до появи у вихідному спектрі бічних складових квазівипадкового характеру. Їх суму у деякому діапазоні частот зазвичай називають шумом квантування. Відповідно говорять про рівень шумових бічних складових або про рівень шуму квантування. Фазовий шум, що виникає у процесі квантування фази визначається за формулою [2]:

$$D_{\phi} = 20 \lg \left[\frac{p}{2^{q+1} \sqrt{12}} \right], \quad (1)$$

де q – число відліків квантування фази на чверть періоду гармонійного сигналу. Квантування за рівнями в перетворювачі фаза-амплітуда створює амплітудний шум

$$D_a = 20 \lg \left[\frac{1}{\sqrt{6(2^n - 1)}} \right], \quad (2)$$

де n – кількість вихідних розрядів відліків перетворювача фаза-амплітуда на чверть періоду синусоїдального сигналу або розрядність ЦАП без врахування розрядів керування сегментами. Теоретично, за рівності розрядності накопичувального суматора, модуля пам'яті і ЦАП, відношення сигнал/шум на виході ЦОС (Цифрового Обчислювального Синтезатора) може складати більше 190 дБ [1]. Проте, нажалі, технологія виготовлення ВІС (великих інтегральних схем) не дозволяє досягнути такого значення розрядності перетворювача фаза-амплітуда і ЦАП. Як правило, у реальних синтезаторах використовується накопичувальний суматор із розрядністю 32 біта, розрядністю пам'яті 12-16 біт, розрядність шини даних 8-16 одиниць. Це приводить до виникнення помилок у вигляді амплітудного і фазового шуму, що потребує пошуку нові технічні рішення для побудови пристроїв компенсації різного роду помилок.

Аналіз досліджень та публікацій

В [4] показано, що в більшості сучасних ЦОС використовується достатньо висока на даному етапі розвитку мікроелектроніки розрядність ЦАП, яка складає 10-16 розрядів. Це забезпечує рівень вищих гармонік у вихідному сигналі не більше - (20...15 дБ). При цьому також знижується рівень дискретних компонентів спектру поблизу носійної, що проявляється у випадку нецілого числа. Також вказані деякі способи корекції такого роду складових:

1. спеціальний вибір кроку дискретизації за рівнями;
2. індивідуальна калібровка і вирівнювання рівнів спрацювання ключів у ЦАП і якості перехідних процесів;
3. використання двох чи трьох ступенів виборок із вихідного сигналу ЦАП, що виключають вплив початкового процесу після перемикавання;

4. використання подільників частоти з коефіцієнтом $N/(N+1)$ у складі схеми формування опорного коливання, що покращує співвідношення між вихідною і тактовими частотами для деяких несприятливих співвідношень вказаних частот;

5. формування на вході молодшого розряду ЦАП псевдовипадкової послідовності для розширення спектру паразитних спектральних складових (ПСС);

6. збільшення періоду повторення помилок усереднення використанням більш довгої псевдовипадкової послідовності;

7. стохастизація (рандомізація) вихідних сигналів ЦОС.

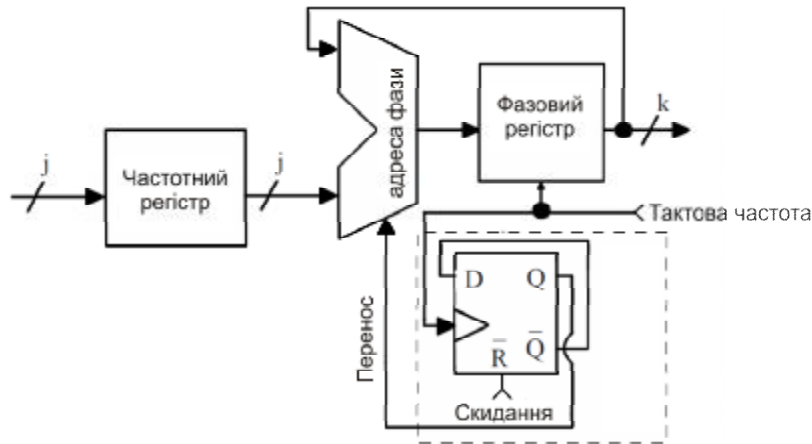


Рис 1. Модифікований накопичувач фази Ніколаса

цифрового обчислювального синтезатора дозволяє розробити доволі простий спосіб зменшення рівнів бічних складових у найгіршому випадку на 4 дБ. В структуру класичного фазового акумулятора вводиться додатковий елемент у відповідності до рис.1. Така структура не порушує періодичність помилки послідовностей, однак розподіляє потужність бічних складових у пікових викидах за шириною спектра.

Якщо найбільший спільний дільник $HCD(\Delta P, 2^{j-k})$, де ΔP - значення у частотному регістрі, рівний 2^{j-k-1} , то потужність бічних викидів сконцентрується у одному пікові (рис.2). Найгірший випадок відношення потужності носійної до потужності бічної складової визначається як [1]

$$\frac{C}{S} = (6,02k - 3,992) \text{ дБн}, \quad (3)$$

де k – розрядність слова вихідного сигналу фазового накопичувача, що використовується як адреса в перетворювачі фаза-амплітуда. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=264$, відношення носійної до бічних складових склало 44,24 дБ. Див.рис.2.

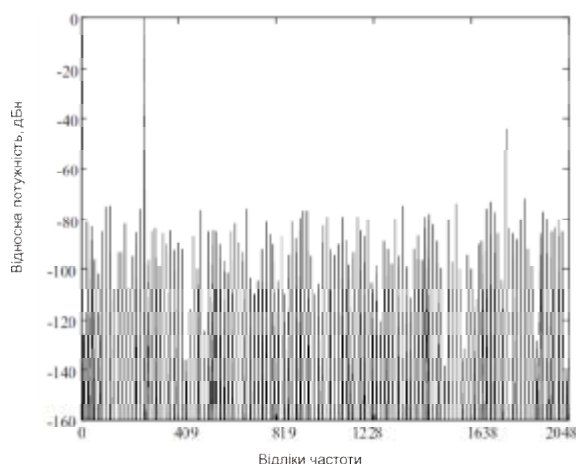


Рис 2. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, $k=8$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=264$.

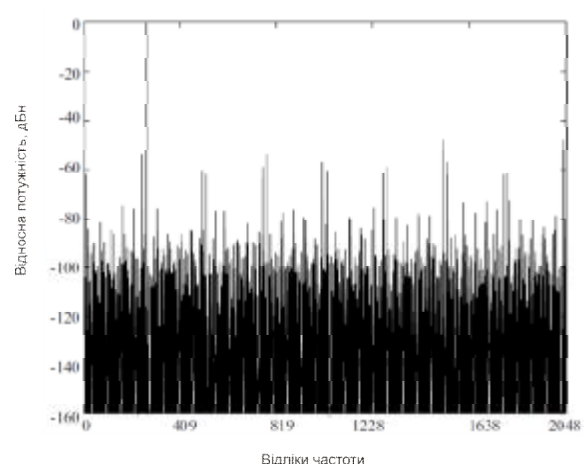


Рис 3. Розподіл бічних складових, що виникають у процесі відсікання бітів фази класичного синтезатора. При моделюванні з параметрами розрядність накопичувача $j=12$, $k=8$, розрядність даних на виході ПЗП $m=10$, $\Delta P=265$.

При $HCD(\Delta P, 2^{j-k}) = 1$ потужність бічних викидів дробиться на велику кількість окремих «піків» рис.3. Якщо $j - k \gg 1$, то співвідношення потужності носійної до потужності бічної складової

$C/S \approx 6,02k$ дБн. Моделюючи параметри тіж самі, що на рис.2, лише $\Delta P = 265$. співвідношення сигнал/шум складе 48,08 дБ. Незручність модифікації полягає у тому, що воно вводить зміщення у частоту вихідного сигналу ЦОС:

$$f_{\text{відстройки}} = \frac{f_{\text{тактова}}}{2^{j+1}}, \quad (4)$$

де $f_{\text{тактова}}$ - тактова частота ЦОС. І при цьому відстройка буде незначною, якщо частота відліків буде невисокою, а розрядність фазового суматора великою.

Іншим ефективним методом подавлення бічних складових у спектрі вихідного сигналу є метод псевдо шумового формування і методика рандомізації, запропонована Вітлі [4].

Пристрій, що складається з накопичувального суматора і генератора випадкових чисел - рис.4, генерує прямокутні імпульси. Під час кожного переповнення накопичувального суматора до його вмісту додається випадкове число X , $0 < X < K - 1$. У той самий час попереднє значення X віднімається. Віднімання виконується таким чином, щоб середнє значення $X(i) - X(i-1)$ перетворювалась в нуль, а середня частота вихідних коливань лишалась такою самою, якою була задана сигналом керування. У результаті під час кожного переповнення накопичувального суматора до його вмісту додається випадкове число $-(K-1)/2 < X' < (K-1)/2$. Зазвичай X формується як послідовність псевдовипадкових чисел, які широко використовуються у техніці зв'язку, кодування інформації, тощо.

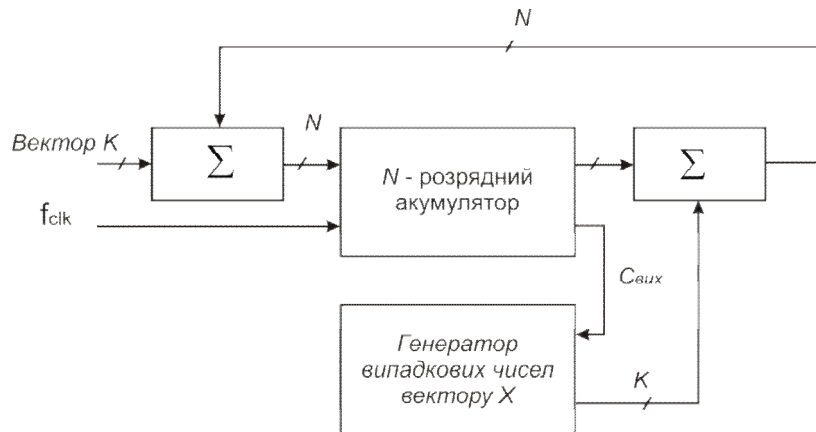


Рис. 4. Структурна схема рандомізатора Вітлі

Щоб проаналізувати результат, позначимо фазову помилку, що викликана дискретністю синтезатора, як e_c , $e_c < K$. Ймовірності того, що у такті T , помилка буде e_c або $T - e_c$, рівні

$$p(e_c) = e_c / K;$$

$$p(T - e_c) = 1 - e_c / K.$$

Середнє значення помилки затримки:

$$t_{cp} = tp(e_c) + (T - t) p(T - e_c). \quad (5)$$

Таким чином, у середньому переповнення накопичувального суматора синтезатора, що використовує схему рандомізованої модуляції фази, відбувається у ті самі моменти часу, що і у звичайному синтезаторі. Це означає, що середній період синтезованої частоти не залежить від миттєвих значень вмісту накопичувального суматора, тому вихідна частота цього синтезатора однозначно і точно визначається значенням коду частоти. При цьому важливим є той факт, що час настання переповнення суматора не залежить від початкової фазової помилки. Це означає, що навіть якщо сусідні значення фазової помилки на початковому етапі корельовані, додавання випадкової величини X не впливає на середній час переповнення накопичувального суматора і усі бічні дискретні лінії у спектрі, що виникають внаслідок когерентності похибки, ліквідуються. Таким чином, на виході замість дискретних бокових ліній буде з'являтися неперервний шум, пов'язаний з випадковістю між моментами перемикавання накопичувального суматора. При цьому максимальний рівень бічних складових знижується.

Вітлі розвинув свою ідею, довівши, що ця процедура може перетворити усю енергію паразитного сигналу в енергію фазового шуму. Відношення спектральної густини шуму до потужності корисної гармоніки складає

$$\frac{N_0}{C} = \frac{p^2 f}{f_{\text{такт}}}, \quad (6)$$

де $f_{\text{такт}}$ - тактова частота синтезатора.

Новизна процедури Вітлі полягає у її принципі; проте її важко реалізувати, особливо у високошвидкісній логіці, тому практичне значення цього методу обмежене.

Найбільшою перепорою на шляху реалізації методу Вітлі лежить обмежена швидкодія суматорів, які використовуються як у структурі накопичувального суматора так і у колах додавання/віднімання псевдовипадкових чисел. Реальне застосування цього методу можливе лише із застосуванням суматорів, які здатні додавати числа за один або кілька тактів. Такі суматори будуються на принципах, що закладені у теорії полів Галуа [5] та спеціалізованої алгебри логіки [6].

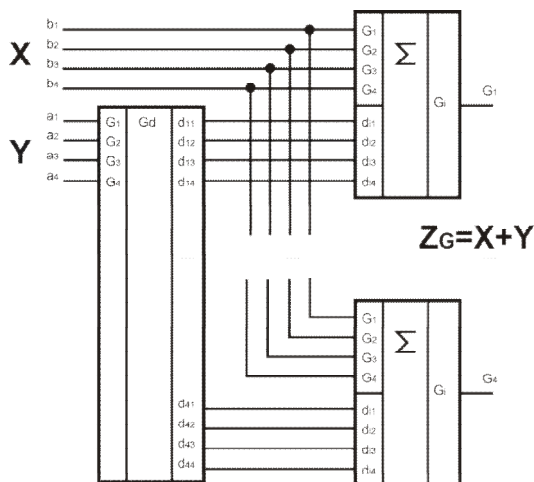


Рис. 5 Структурна схема 4-х розрядного паралельного суматора Галуа [6]

високими тактико-технічними характеристиками за рахунок використання алгоритму Вітлі. Розглянуто можливості застосування нових математичних підходів для побудови суматорів без проблеми затримки поширення сигналів переносу із розряду у розряд кодового слова. Розглянута можливість застосування операцій Булевої алгебри над парою чисел та теорії полів Галуа для покращення швидкодії синтезатора. Наведений математичний апарат дозволить побудувати цифровий обчислювальний синтезатор із меншими рівнями бічних складових у спектрі вихідного сигналу, за рахунок деякого ускладнення внутрішньої будови синтезатора із використанням двох додаткових суматорів та генератора псевдовипадкових чисел.

Аналіз структури операційного пристрою [7] сумування в базисі Галуа показує, що при використанні суматорів з розрядністю $k = 16-64$ швидкодія у базисі Галуа перевищує швидкоддю суматорів у базисі Радемахера в 5-9 разів.

На рис.5 представлено структурну схему 4-х розрядного паралельного суматора Галуа із Галуа дешифратором, що перетворює коди Радемахера у коди Галуа.

Висновки

Розглянуто методи та способи зменшення бічних спектральних складових у вихідному спектрі класичного обчислювального синтезатора на основі накопичувального суматора. Виявлено, що можливо побудувати синтезатор із високими тактико-технічними характеристиками за рахунок використання алгоритму Вітлі. Розглянуто можливості застосування нових математичних підходів для побудови суматорів без проблеми затримки поширення сигналів переносу із розряду у розряд кодового слова. Розглянута можливість застосування операцій Булевої алгебри над парою чисел та теорії полів Галуа для покращення швидкодії синтезатора. Наведений математичний апарат дозволить побудувати цифровий обчислювальний синтезатор із меншими рівнями бічних складових у спектрі вихідного сигналу, за рахунок деякого ускладнення внутрішньої будови синтезатора із використанням двох додаткових суматорів та генератора псевдовипадкових чисел.

Література

1. J. Vankka Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications, Helsinki University of Technology, 2000
2. Шапиро Д.Н. Основы теории синтеза частот/ Паин А.А, Шапиро Д.Н.. -М.: Радио и связь, 1981.- 264 с.
3. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи / Рыжков А.В., Попов В.Н. -М.: Радио и связь, 1991 -263с.
4. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов / Белов Л.А. -М.: Академия, 2005.-223 с.
5. Николайчук Я.М Коди поля Галуа: теорія та застосування / Николайчук Я.М – Тернопіль: ТзОВ «Тернограф», 2012.-576 с.
6. Хармут Х. Теория секвентного анализа: основы и применение.: Пер. с англ./ Хармут Х – М.: Мир, 1980.- 578 с.
7. Полікаровських О.І Застосування нового теоретико-числового базису для побудови високошвидкісних обчислювальних синтезаторів частоти (DDS)/Полікаровських О.І. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2013.-№1.-С.20-27.

References

1. J. Vankka Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications, Helsinki University of Technology, 2000
2. Shapiro D.N. Osnovy teorii sinteza chastot/ Pain A.A, Shapiro D.N.. -M.: Radio i svjaz', 1981.-264 s.
3. Ryzhkov A.V. Sintezatory chastot v tehnikе radiosvjazi / Ryzhkov A.V., Popov V.N. -M.: Radio i svjaz', 1991 -263s.
4. Belov L.A. Formirovanie stabil'nyh chastot i signalov / Belov L.A. -M.: Akademiya, 2005.-223 s.
5. Nikolajchuk Ja.M Kodi polja Galua: teorija ta zastosuvannja / Nikolajchuk Ja.M – Ternopil': TzOV «Ternograf», 2012.-576 s.
6. Harmut H. Teorija sekventnogo analiza: osnovy i primenenie.: Per. s angl./ Harmut H – M.: Mir, 1980.- 578 s.
7. Polikarovs'kih O.I Zastosuvannja novogo teoretiko-chislovogo bazisu dlja pobudovi visokoshvidkisnih obchisljuval'nih sintezatoriv chastoti (DDS)/Polikarovs'kih O.I. //Vimiruval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah.-2013.-№1.-S.20-27.

Рецензія/Peer review : 25.7.2013 р.

Надрукована/Printed : 29.9.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.