

ПРЯМІ ЦИФРОВІ СИНТЕЗАТОРИ ЧАСТОТИ НА ОСНОВІ КОДІВ ФІБОНАЧЧІ

Розглянуто принципи побудови прямих цифрових синтезаторів частоти, та їх місце у сучасних системах синтезу радіосигналів. Запропоновані структури синтезаторів із фазовими акумуляторами на основі кодів Фібоначчі, що дасть можливість збільшити розрядність синтезаторів, покращити їх частотні характеристики у сторону розширення діапазону синтезованих сигналів. Запропоновано у якості вихідного ЦАП прямого цифрового синтезатора частоти використовувати ЦАП у кодах Фібоначчі, що дозволить створити синтезатори із високою точністю.

Ключові слова: обчислювальний синтезатор частоти, фазовий акумулятор, суматор, Фібоначчі

O.I.POLIKAROVSKYKH
Khmelnytsky National University

DIRECT DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER BASED ON FIBONACCI CODES

A principle of construction of the direct digital frequency synthesizers and their place in the modern synthesis radio systems was proposed. The proposed structure of the phase synthesizer accumulators based on Fibonacci codes that will increase the bit synths and improve their frequency response range expansion in the direction of the synthesized signals. We consider a method of Fibonacci DAC will create precision DDS.

Keywords: adder, direct frequency synthesizer (DDS), phase accumulator, Fibonacci

Вступ

Прямі цифрові синтезатори частоти відіграють важливу роль у сучасних радіоелектронних пристроях. Це забезпечується багатьма значними перевагами: швидкість переналаштування частоти, висока розрізнявальна здатність, широка синтезована смуга частот. Багаторівневі DDS у силу своєї, технологічності, надійності, можливості мікромініатюризації та унікальності технічних характеристик (нерозривність фази під час перемикання з частоти на частоту, можливість формування сигналів складної форми, цифрове керування амплітудою, частотою та фазою вихідного коливання) на сьогодні знайшли застосування у системах зв'язку. Особливо перспективним є використання DDS у радіотехнічних системах передачі інформації з підвищеною завадостійкістю та захищеністю. Одним з обмежуючих факторів за максимальною швидкодією та якісним спектральним складом таких синтезаторів є швидкість окремих арифметичних операцій в ядрі цифрового синтезатора [1].

Якщо, наприклад, ми додаємо два двійкових числа

$$01111111+00000001=100000000,$$

то при цьому виникає «довгий перенос» із молодших розрядів доданків, що є принциповим фактором, який знижує максимальну синтезовану частоту синтезатора. Намагання подолати ці недоліки двійкової системи привели до створення багаточисельних систем числення з широким спектром властивостей:

- трійкова симетрична система числення;
- система залишкових класів;
- система із комплексною основою;
- нега-позиційна система числення;
- факторіальна система числення;
- біноміальна система числення та інші.

Усі ці системи числення мали певні переваги у порівнянні із двійковою системою і були спрямовані на подолання розглянутого недоліку і покращення характеристик суматора як базового елементу будь-якої обчислювальної системи. Найбільшої популярності набули трійкова система числення [2] та система залишкових класів [3], на основі яких були створені універсальні комп'ютери і процесори спеціальних застосувань.

У роботі Стахова А.П. [4] описані підходи до побудови нової теорії кодування на основі чисел Фібоначчі. Розглянемо можливість використання нової теорії кодування для побудови швидкодіючого прямого цифрового синтезатора частоти (ПЦСЧ).

Формулювання цілей статті

В роботі необхідно розглянути теоретичні основи використання Фібоначчєвого представлення кодів для побудови високошвидкісного накопичувального суматора, який є акумулятором фази ПЦСЧ. Необхідно провести аналіз його роботи. Необхідно розглянути принципи організації ЦАП у кодах Фібоначчі, та його застосування для побудови ПЦСЧ з покращеними тактико-технічними характеристиками. Зробити порівняння пропонованого синтезатора Фібоначчі із існуючими на сьогоднішній день класичними синтезаторами прямого цифрового синтезу.

Основна частина

Для реалізації ПЦСЧ у кодах Фібоначчі розглянемо структурну схему класичного синтезатора, яка представлена на рис.1. Структура складається з наступних функціональних блоків: Акумулятора фази, який являє собою класичний накопичувальний суматор; Постійний запам'ятовуючий пристрій – перетворювач фаза-амплітуда, ЦАП-цифро-аналоговий перетворювач і вихідний фільтр ВЧ.

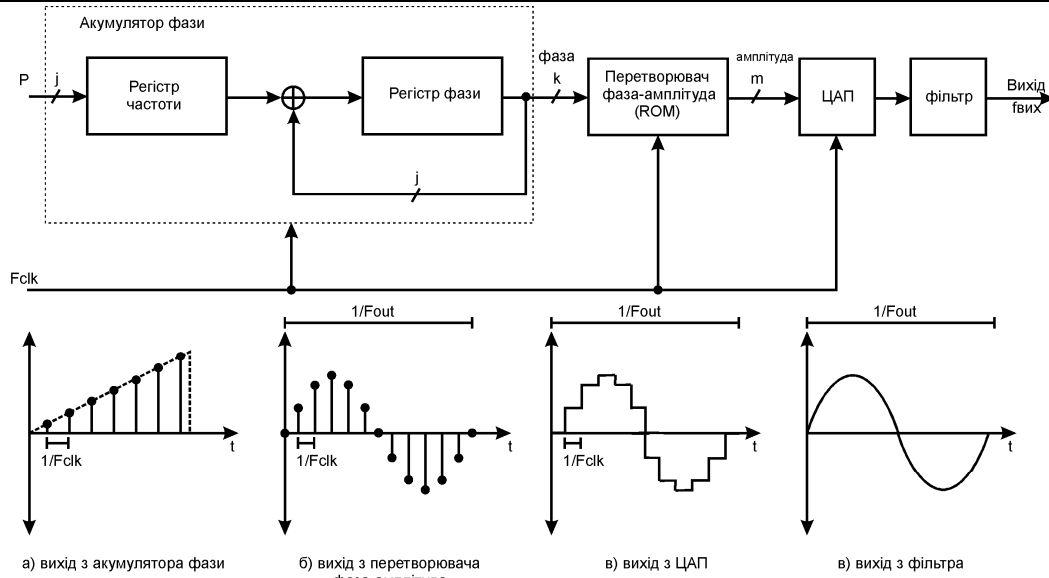


Рис.1. Структурна схема ПЦСЧ, та перетворення сигналів у ньому.

Розглянемо можливість заміни акумулятора фази на акумулятор фази на основі лічильника та суматора кодів Фібоначчі. Фібоначчівий лічильник, заснований на операціях згортки і розгортки мають суттєві переваги у порівнянні із двійковими лічильниками. Лічба одиниць у коді Фібоначчі (підсумовуючий лічильник) здійснюється наступним чином. Перед додаванням одиниці у молодший розряд вихідне представлення, що відповідає числу N , перетворюється у таку форму, щоб значення молодшого розряду дорівнювало 0. Потім до молодшого розряду додається 1, що приводить до того, що числове значення лічильника стає рівним $N + 1$. після цього фібоначчіве представлення числа $N + 1$ приводиться у таку форму, щоб значення молодшого розряду було рівним 0. Продемонструємо це:

$$\begin{aligned}
 000000+1 &= 000001 = 000010 = 1 \\
 000010+1 &= 000011 = 000100 = 2 \\
 000100+1 &= 000101 = 000110 = 3 \\
 000110+1 &= 001001 = 001010 = 4 \\
 001010+1 &= 001011 = 001100 = 5 \\
 001100+1 &= 010001 = 010010 = 6 \\
 010010+1 &= 010011 = 010100 = 7 \\
 010100+1 &= 010101 = 010110 = 8 \\
 010110+1 &= 011001 = 100010 = 9 \\
 100010+1 &= 100011 = 100100 = 10 \\
 &\dots \\
 101010+1 &= 101011 = 000000 = 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Особливістю лічби у системі Фібоначчі полягає в тому, що у будь якій ситуації перехід від числа N до $N + 1$, здійснюється за час послідовного виконання не більше двох згорток. Останній рядок (1) представляє собою переповнення фібоначчівого лічильника. Згорткою називається базова операція арифметики Фібоначчі, що заснована на чотирьох базових мікро-операціях [5]:

Згортка: $011 \rightarrow 100$	Розгортка: $100 \rightarrow 011$
1 0	1 0
Переміщення: $\downarrow =$	Поглинання: $\downarrow =$
0 1	1 0

Операції згортки та розгортки засновані на основному рекурентному співвідношенні (2). Ці операції є одномісними, тобто виконуються у рамках однієї фібоначчівої комбінації, що розташовується у одному регістрі. Мікро-операції переміщення та поглинання є двомісними, тобто виконуються у рамках комбінації, яка розташована у двох регістрах.

$$F(n) = F(n-1) + F(n-2); F(0) = 0, F(1) = 1, \tag{2}$$

де $n \in \{0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$.

Розглянутий алгоритм функціонування підсумовуючого лічильника показує, що у таких лічильниках закладені основи конструювання надшвидкісних лічильників без використання складних схем групового переносу.

Проте для побудови ПЦСЧ більш актуальним є використання у якості акумулятора фази не

лічильника а накопичувального суматора. Розглянемо у якості прикладу додавання наступних фібоначієвих чисел:

$$A_0 = 010100100 \text{ і } B_0 = 001010100.$$

Під час фібоначієвого додавання ми використовуємо мікро-операції переміщення, згортки і розгортки. Сума формується у нижньому регістрі B .

Перший крок полягає у виконанні усіх можливих переміщень двійкових 1 із регістру А в В:

$$A_0 = 010100100$$

↓ ↓

$$B_0 = 001010100.$$

$$A_1 = 010100100$$

$$B_1 = 010100100$$

Другий крок складається із виконання усіх можливих розгортки в двійковій комбінації A_1 і усіх можливих згорток в двійковій комбінації B_1 , тобто

$$A_1 = 000000100 \rightarrow A_2 = 000000011$$

$$B_1 = 011110100 \rightarrow B_2 = 100110100.$$

Третій крок полягає у виконанні усіх можливих переміщень двійкових 1 з регістру А в регістр В:

$$A_2 = 000000011$$

↓ ↓

$$B_2 = 100110100$$

$$A_3 = 000000000$$

$$B_3 = 100110111$$

Додавання завершено, оскільки усі двійкові 1 переміщені із регістру А в регістр В. Після приведення фібоначієвої двійкової комбінації B_3 до мінімальної форми, ми отримаємо суму $B_3 = A + B$ представлену у мінімальній формі:

$$B_3 = 100110111 = 101001001 = 101001010.$$

Отже додавання двох багато розрядних чисел можливе за три такти вхідної частоти незалежно від розрядності вхідного кодового слова.

Крім фазового акумулятора важливу роль, а можливо і вирішальну, у ПЩСЧ відіграє вихідний ЦАП якість якого забезпечує параметри спектральної густини потужності амплітудного та фазового шумів вихідного синтезованого сигналу. Для того, щоб не здійснювати перетворення значення фази на виході фазового акумулятора у позиційне двійкове представлення, можна використати у якості ЦАП не класичний пристрій, а ЦАП Фібоначчі [6].

ЦАП на рис.1. здійснює перетворення фібоначієвого 5-ти розрядного коду в електричну напругу U_{out} на виході ЦАП. Кількість розрядів ЦАП може бути збільшено до будь-якого n шляхом розширення фібоначієвого резистивного подільника зліва направо. Фібоначієвий ЦАП містить n (на рис.2. $n=5$) генераторів стандартного електричного струму I_0 і n електричних ключів $K_0 - K_n$. Стани ключів керуються двійковими цифрами $a_n \dots a_2 a_1 a_0$ коду золоті р - пропорції. На основі якої, створено спосіб позиційного представлення чисел:

$$A = a_i \Phi_p^i, \quad (3)$$

де $a_i \in \{0,1\}$ - двійкова цифра i -го розряду, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, Φ_p - основа системи числення.

Для випадку $a_i = 1$ ключ K_i ($i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$) знаходиться у замкнутому положенні, $a_i = 0$ у вимкнутому. Можна показати, що замкнутий ключ K_i приводить до появи наступної напруги в точці i :

$$U_i = \beta_p I_0 R, \quad (4)$$

де $\beta_p = 1/(1 + \Phi_p^{-1})$. Напруга (4) передається від i -ї точки до $i+1$ -ї точки з коефіцієнтом передачі $1/\Phi_p$, тоді на виході ЦАП виникне наступна напруга:

$$U_{out} = \frac{\beta_p I_0 R}{\Phi_p^{n-i-1}} = \frac{\beta_p I_0 R}{\Phi_p^{n-1} \times \Phi_p^{-1}} = \frac{\beta_p I_0 R}{\Phi_p^{n-1}} \times \Phi_p^i, \quad (5)$$

Використовуючи принцип суперпозиції, легко обчислити напругу на виході ЦАП при подачі на вхід ЦАП n -розрядного коду золоті р пропорції $a_{n-1} a_{n-2} \dots a_2 a_1 a_0$:

$$U_{out} = B_p \sum_{p=0}^{n-1} a_p \Phi_p^i, \quad (6)$$

де $B_p = \frac{\beta_p I_0 R}{\Phi_p^{n-1}}$. Як слідує з (6) ЦАП на рис.2. перетворює код «золотої» пропорції $a_{n-1}a_{n-2}\dots a_2a_1a_0$ у

еквівалентну електричну напругу U_{out} з точністю до постійного коефіцієнту B_p .

Такий ЦАП дозволяє здійснювати контроль лінійності в процесі виробництва та експлуатації [6]. Така властивість ЦАП Фібоначчі робить його надзвичайно перспективним для використання у системах ПЦСЧ. Створення акумулятора фази на основі суматорів Фібоначчі дасть можливість створювати синтезатори частоти із фіксованою затримкою у три такти опорної частоти, незалежно від довжини фазового акумулятора. У поєднанні із самокаліброваними ЦАП у кодах Фібоначчі, це дасть можливість створити принципово нові синтезатори прямого цифрового синтезу із поліпшеними характеристиками.

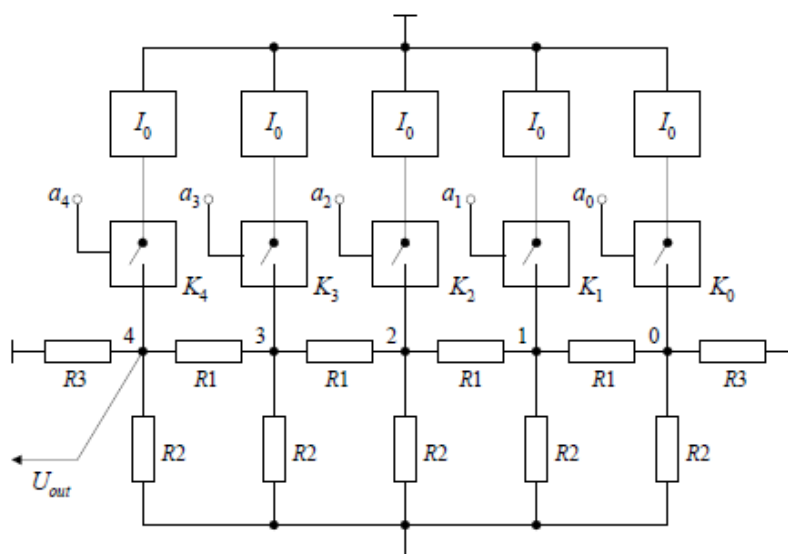


Рис.2. Цифро-аналоговий перетворювач Фібоначчі [5]

Висновки

В роботі проаналізовані перспективні прямі цифрові синтезатори частоти на основі кодів Фібоначчі.

Проведено аналіз структурних елементів такого синтезатора, а саме ключових елементів: фазового акумулятора та цифро-аналогового перетворювача. Показано, що ПЦСЧ на основі кодів Фібоначчі буде мати ряд значних переваг над класичним синтезатором: відсутність проблеми затримки переносу у фазовому акумуляторі – результат у фазовому акумуляторі завжди буде з'являтися на третьому такті опорного генератора; можливість побудови самокаліброваних ЦАП у кодах Фібоначчі.

Література

1. Макаренко В. Компоненты для построения беспроводных устройств связи. Часть 7. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. - 2010. - №1. - С.34-46
2. Поспелов Д.А. Арифметические основы вычислительных машин дискретного действия / Д.А. Поспелов. – М.: Высшая школа, 1960.
3. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. – М.: Советское радио, 1968.
4. Стахов А.П. Компьютеры Фибоначчи и новая теория кодирования: история, теория, перспективы / А.П. Стахов // Электронный журнал Таганрогского радиотехнического университета «Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы». – 2004. – №2(18)
5. Стахов А.П. Помехоустойчивые коды: Компьютер Фибоначчи / А.П. Стахов. – Москва, Знание, серия «Радиоэлектроника и связь. вып.6, 1989.
6. Стахов А.П. Тьюринг, филлотаксис, математика гармонии и «золотая» информационная технология / А.П. Стахов. – Электронный ресурс. – режим доступа: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0232/004a/02321089.pdf>

References

1. Makarenko V. Komponenty dlja postroenija besprovodnyh ustrojstv svyazi. Chast' 7. Sintezatory chastoty prjamoego cifrovogo sinteza//Elektronnyye komponenty i sistemy.-2010.-№1.-S.34-46
2. Pospelov D.A. Arifmeticheskie osnovy vychislitel'nyh mashin diskretnogo dejstvija. Moskva: Vysshaja shkola, 1960.
3. Akushskij I.Ja., Judickij D.I. Mashinnaja arifmetika v ostatochnyh klassah. Moskva: Sovetskoe radio, 1968.
4. Stahov A.P. Komp'jutery Fibbonachchi i novaja teorija kodirovanija: istorija, teorija, perspektivy. Jelectronnyj zhurnal Taganrogsogo radiotekhnicheskogo universiteta «Perspektivnye informacionnye tehnologii i intellektual'nye sistemy», №2(18), 2004
5. Stahov A.P. Pomehoustojchivye kody: Komp'juter Fibbonachchi, Moskva, Znanie, serija «Radioelektronika i svjaz'. vyp.6, 1989.
6. Stahov A.P. T'juring, fillotaksis, matematika garmonii i «zlotaja» informacionnaja tehnologija. <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0232/004a/02321089.pdf>