

УДК 681.335

Г.Г. БОРТНИК, А.В. КОВАЛЕНКО
Вінницький національний технічний університет, Україна**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АНАЛОГО-ЦИФРОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА БАЗІ
ВЗАСМНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ**

У роботі представлено метод визначення динамічних характеристик аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), що базується на обробленні вихідного сигналу АЦП в базисах дискретних функцій Уолша-Фур'є. Доведено, що запропонований метод характеризується високою ефективністю визначення динамічних характеристик АЦП за рахунок підвищення продуктивності та спрощення програмної реалізації алгоритмів цифрового оброблення вихідних сигналів досліджуваних перетворювачів.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач, цифрове оброблення сигналів, динамічні характеристики.

G.G. BORTNYK, A.V. KOVALENKO
Vinnitsa National Technical University, Ukraine**METHOD FOR DETERMINING DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF THE ANALOG TO DIGITAL CONVERTERS BASED MUTUAL SPECTRAL DISPLAYED**

A spectral analysis for the analog-digital converters (ADC) using algorithms mutual spectral reflections. Algorithm fast Walsh transform allow a range of output ADC system frequency-ordered Walsh functions Kachmazha. To evaluate bit ADC nonlinearity under developed mathematical model to be signal spectrum in the basis of discrete Fourier functions.

To do this, complete the proposed mutual spectral reflections Walsh-Fourier, minimizing the algorithm fast Fourier transform inputs to the ADC. Based on known use WF-core model Fourier transform algorithm rapid basis Walsh spectrum in a range in the basis of Fourier same output ADC.

Analysis of the effectiveness of the developed method showed that the rate of productivity remains almost constant depending on the bit ADC and is within 2,5 ÷ 2,88. This algorithm is implemented mutual spectral reflections based on the composition procedure base operations and in terms of program implementation creates conditions for the modular structure of the program with a flexible changeover to different mode processing output signals investigational ADC.

Key words: analog-digital converter, digital signal processing, dynamic characteristics.

Вступ

Підвищення ефективності комп'ютерних систем у сучасних умовах неможливе без використання в задачах перетворення неперервних сигналів аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Застосування методології цифрового оброблення сигналів (ЦОС) у комп'ютерних засобах призводить до використання в них у умовах роботи з широкосмуговими сигналами [1]. Ефективність оброблення широкосмугових сигналів безпосередньо залежить від властивостей АЦП, що використовуються [2].

Особливістю АЦП є нелінійний вид функції перетворення, який проявляється як в статичному, так і в динамічному режимах функціонування. Якщо проблеми аналізу поведінки АЦП у статичному режимі функціонування достатньо добре вивчені та відповідна методологія добре відома широкому колу спеціалістів, то проблеми визначення динамічних характеристик (ДХ) з урахуванням нелінійних і стохастичних властивостей продовжують інтенсивно досліджуватись [2-4].

У свою чергу існує проблема продуктивності визначення ДХ АЦП внаслідок великого обсягу обчислень, що може слугувати серйозною перешкодою при дослідженні перетворювачів широкосмугових сигналів. Апаратура оцінювання ДХ АЦП випускається в багатьох країнах протягом тривалого часу і характеристики цієї апаратури визначені відповідними рекомендаціями. Однак розвиток спеціалізованих засобів визначення характеристик АЦП для оцінювання якості функціонування цих перетворювачів з широкосмуговими сигналами у значній мірі відстає від розвитку самих комп'ютерних засобів та не задовольняє сучасні вимоги до продуктивності процесу визначення характеристик АЦП у широкій смузі робочих частот [4-6].

Таким чином, розроблення методів визначення динамічних характеристик АЦП, що характеризуються підвищеною продуктивністю є актуальною науковою задачею.

Метою роботи є підвищення ефективності визначення динамічних характеристик АЦП за рахунок оброблення вихідних сигналів досліджуваних перетворювачів у базисах дискретних функцій.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) виконати визначення нелінійності характеристики перетворення АЦП;
- 2) здійснити визначення динамічних характеристик АЦП у частотній області;
- 3) проаналізувати ефективність спектрального методу визначення ДХ АЦП.

Визначення нелінійності характеристики перетворення АЦП

Використання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) дає змогу з високою точністю оцінити вплив

окремого розряду АЦП на нелінійність його характеристики перетворення (ХП) та визначити відповідне значення коефіцієнта гармонічних спотворень. У разі виникнення нелінійності у двох і більше розрядів АЦП, здійснити таке оцінювання з достатньою точністю неможливо внаслідок появи інтермодуляційних спотворень при аналізі послідовностей кількох вихідних розрядів. Це пояснюється наявністю помилок суперпозиції при дослідженні спектрів нелінійностей на базі ДПФ [7].

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним розвитком комп'ютерних систем з ЦОС привертає увагу повна ортогональна система прямокутних функцій Уолша, що набувають двох значень $+1$ та -1 . Для базису дискретних функцій Уолша існує дискретне перетворення Уолша (ДПУ), яке є узагальненням ДПФ і має такий вигляд [8]:

$$X_w(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot Wal(k, m), \quad (1)$$

де $Wal(k, m)$ – функції Уолша.

Слід зазначити, що для ДПУ існують прискорені процедури, що наділяють їх високою конкурентноздатністю відносно традиційних методів на базі ШПФ. Розрізняють три основні системи упорядкування функцій Уолша: двійково-упорядковані або функції Уолша-Пелі $Wal_p(k, m)$; частотно-упорядковані або функції Уолша-Качмажа $Wal_w(k, m)$ та кронекер-упорядковані або функції Уолша-Адамара $Wal_h(k, m)$ [8]. Частотно-упорядковані функції Уолша мають таку ж періодичність, що і послідовності порушення лінійності АЦП, тому їх можна застосовувати для аналізу нелінійності ХП АЦП.

Для визначення частотно-упорядкованих функцій використовують парні функції Радемахера [8]:

$$C(\mu, m) = \text{sign}[\cos(2^\mu \cdot \pi \cdot m)], \quad (2)$$

де $\mu = 1, 2, \dots$

При застосуванні ДПУ до нелінійності АЦП з кроком $\frac{\Delta q}{q}$ отримаємо складову спектра у базисі Уолша значенням $\frac{\Delta q}{2q}$ у послідовності з номером $2^{n-i} - 1$. Коефіцієнт 2 є особливістю дискретних функцій Уолша, які можуть мати значення -1 та $+1$. Якщо виникає помилка в $i + 1$ -му розряді АЦП, то при ДПУ з'являється складова спектра значенням X_i з номером $2^{n-i} - 1$. Значення складової X_i можна знайти як функцію помилки Δq_i і коефіцієнта зважування (кроку квантування) q :

$$X_i = \frac{\Delta U}{2 \cdot q} = \frac{\Delta q_i \cdot 2^i}{2q}. \quad (3)$$

Знак X_i дає інформацію про напрям відхилення від ідеального аналого-цифрового перетворення. Цей знак залежить від виду функцій Уолша. Якщо порівняти функції Уолша з нелінійністю АЦП, то можна зробити висновок, що для додатного значення нелінійності Δq_3 існує відповідна функція Уолша $Wal_w(3, m)$ з від'ємним коефіцієнтом (рис.1).

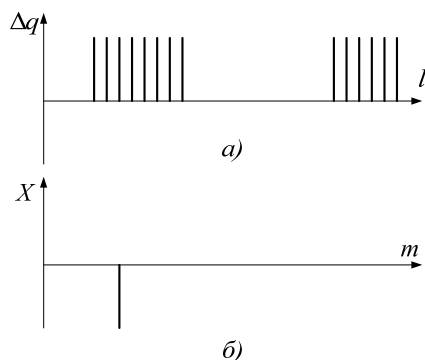


Рис.1. Нелінійність ХП АЦП: а) у часовій області; б) у базисі функцій Уолша

Ефективним засобом прискорення спектрального аналізу вихідного сигналу АЦП є алгоритм швидкого перетворення Уолша (ШПУ), що базується на можливості обчислення коефіцієнтів ітераційним методом [8]. Основний принцип побудови алгоритмів швидкого перетворення у базисі Уолша – розбиття матриці Уолша на ряд слабкозаповнених матриць тієї ж розмірності таким чином, щоб кожний співмножник мистив у рядку лише два ненульових елементи.

Визначення динамічних характеристик АЦП у частотній області

Алгоритм ШПУ при визначенні ХП АЦП дає можливість отримати спектр вихідного сигналу АЦП у системі частотно-впорядкованих функцій Уолша-Качмажа. Для визначення динамічних характеристик АЦП необхідно мати спектр сигналу у базисі дискретних функцій Фур'є. Для цього доцільно виконати процедуру взаємних спектральних відображень (ВСВ) Уолша-Фур'є, уникнувши при цьому реалізації алгоритму ШПФ до вхідних сигналів АЦП.

Центральне місце при розв'язанні такої задачі належить таким питанням, як вибір рівня паралелізму та характеру однорідності обчислювального процесу. З цієї точки зору теоретичним підґрунтям швидкого ВСВ є використання відомої WF-моделі ядра Фур'є, яка забезпечує перетворення між спектральними областями в базисах $Wal(k, m)$ і $F(k, m)$. Слід зазначити, що WF-ядро Фур'є можна інтерпретувати як спектральні коефіцієнти функції Уолша в базисі Фур'є:

$$F(k, m) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} Wal(m, x) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot k \cdot x}{N}}. \quad (4)$$

Відомо узагальнену WF-модель ядра Фур'є, яка має такий вигляд [8]

$$WF(k, m) = \prod_{\tilde{i}=1}^n \tilde{V}_{\tilde{i}}(k, m), \quad (5)$$

де співмножники $\tilde{V}_{\tilde{i}}(k, m)$ визначаються за допомогою такого співвідношення:

$$\tilde{V}_{\tilde{i}}(k, m) = \begin{cases} \sin(k \cdot \pi / 2^{\tilde{i}}), \alpha_{\tilde{i}}(m) = 1 \\ \cos(k \cdot \pi / 2^{\tilde{i}}), \alpha_{\tilde{i}}(m) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

де $\alpha_{\tilde{i}}(m)$ – \tilde{i} -й розряд коду Грея.

Подамо часовий параметр x у двійковій системі числення $x = \sum_{\tilde{i}=1}^n 2^{\tilde{i}-1} \cdot x_{\tilde{i}}$. Тоді вираз (4) з урахуванням (5) і (6) набуде такого вигляду:

$$F(k, m) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \prod_{\tilde{i}}^n [(-1)^{\alpha_{\tilde{i}}(m)}]^{x_{\tilde{i}}} \cdot e^{-j \cdot \pi \cdot k \cdot 2^{\tilde{i}-n} \cdot x_{\tilde{i}}}. \quad (7)$$

Функцію синуса та косинуса від аргумента $\pi \cdot k \cdot 2^{\tilde{i}-n-1}$ можна об'єднати, якщо врахувати значення розрядів коду Грея:

$$\begin{cases} \sin \\ \cos \end{cases} \left\{ \pi \cdot k \cdot 2^{\tilde{i}-n-1} \right\} = \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \alpha_{\tilde{i}-n-1}(m) - \pi \cdot k \cdot 2^{\tilde{i}-n-1} \right]. \quad (8)$$

Таким чином, WF-модель ядра (5) характеризується рівнем паралелізму, що дорівнює $\log_2 N$ та однорідністю операндів $\sin(x)$ і $\cos(x)$ [11]. Важливою перевагою обраної WF-моделі є простота формування добутку (6). При цьому функціональна залежність між співмножниками та значеннями коду Грея, а також структура аргументів співмножників забезпечують при синтезі можливість ефективного використання табличних способів генерації функцій.

У матричній формі перетворення спектра вихідного сигналу АЦП у базисі Уолша в спектр у базисі Фур'є має вигляд:

$$C^{(F)} = WF \cdot C^{(W)}, \quad (9)$$

де $C^{(F)}, C^{(W)}$ – вектори розміром $N \times 1$, компоненти яких визначають спектральні складові у базисах відповідно Фур'є та Уолша.

Безпосереднє використання виразу (9) для реалізації програмними засобами недоцільне з обчислювальної точки зору, оскільки матриця WF-ядра у загальному випадку містить значну кількість ненульових елементів. Представимо ядро Фур'є у такому вигляді:

$$WF = \frac{1}{N} A_N \cdot B_N^{-1}, \quad (10)$$

де A_N – матриця порядку N , що визначає базис Фур'є; B_N^{-1} – матриця порядку N , обернена до матриці B_N , що визначає базис Уолша.

Ці матриці можуть бути факторизовані, що дозволяє реалізувати перетворення (9) у вигляді швидкого алгоритму ВСВ. Тоді вираз (9) набуде вигляду

$$C^{(F)} = \frac{1}{N} \left\{ \left(A_N^{(1)} \cdot A_N^{(2)} \cdot \dots \cdot A_N^{(n)} \right) \left([B_N^{(1)}] \cdot [B_N^{(2)}] \cdot \dots \cdot [B_N^{(n)}] \right) \right\} \cdot C^{(W)}, \quad (11)$$

де $A_N^{(i)}$, $B_N^{(i)}$ – слабкозаповнені матриці, отримані в результаті факторизації матриць A_N і B_N відповідно.

Перевагою алгоритму швидкого ВСВ згідно (11) є використання m -точкового перетворення Фур'є як основної обчислювальної операції, що є характерною властивістю для усіх швидких алгоритмів.

Аналіз ефективності методу визначення ДХ АЦП

Ефективність методу визначення ДХ АЦП пропонується оцінювати за допомогою коефіцієнта продуктивності, який демонструє виграв у кількості необхідних операцій для запропонованого методу порівняно з існуючим методом на базі ШПФ [10, 11]. Оцінимо обчислювальну складність цього методу за числом "довгих" операцій множення. Для реалізації графу швидкого ВСВ Уолша-Фур'є необхідно $N(n-2)$ операцій множення. Спектральний аналіз вихідних сигналів АЦП на базі безпосереднього виконання ШПФ вимагає $2N \cdot \log_2 N$ операцій множення [1]. Окрім того, алгоритму ШПФ обов'язково передую операція віконного зважування та формування масиву вхідних даних, яка виконується з використанням $3N-1$ мнужень.

Тоді коефіцієнт продуктивності запропонованого методу швидкого ВСВ дорівнює

$$G_s = \frac{2N \cdot \log_2 N + 3N - 1}{N[\log_2 N - 2]}. \quad (12)$$

У таблиці наведено результати оцінювання продуктивності методу швидкого ВСВ.

Таблиця

Результати оцінювання продуктивності методу швидкого ВСВ

Обсяг вибірки	1024	4096	16384	65536
Коефіцієнт продуктивності	2,88	2,69	2,58	2,5

З таблиці видно, що коефіцієнт продуктивності залишається майже постійним залежно від обсягу вибірки (розрядності АЦП) і дорівнює $2,5 \div 2,88$. Слід також зазначити, що метод визначення ДХ АЦП реалізується на основі процедури композиції базової операції. З точки зору програмної реалізації це дає можливість організувати модульну структуру програми з гнучким переналаштуванням.

Таким чином, використовуючи модель ВСВ вдалось отримати швидкий алгоритм перетворення спектра Уолша у спектр Фур'є з достатньою продуктивністю та високою однорідністю структури програмної реалізації.

Висновки

У рамках запропонованого методу встановлено, що частотно-впорядковані функції Уолша мають таку ж періодичність, що і послідовності порушення лінійності АЦП. Тому їх можна застосовувати для аналізу нелінійності ХП АЦП. Встановлено, що нелінійність АЦП знаходить своє відображення у відповідній складовій у базисі Уолша. Причому наявність інтермодуляційних складових не спотворює спектр Уолша і не знижує точність визначення нелінійності АЦП.

Запропоновано для спектрального аналізу сигналів АЦП використовувати алгоритми взаємних спектральних відображень. Алгоритм ШПУ дає можливість отримати спектр вихідного сигналу АЦП у системі частотно-впорядкованих функцій Уолша-Качмажа. Для оцінювання розрядної нелінійності АЦП згідно розробленої математичної моделі необхідно мати спектр сигналу у базисі дискретних функцій Фур'є. Для цього запропоновано виконати процедуру ВСВ Уолша-Фур'є, уникнувши при цьому реалізації алгоритму ШПФ до вхідних сигналів АЦП. На базі використання відомої WF-моделі ядра Фур'є, розроблено алгоритм швидкого перетворення спектра $X_W(k)$ у базисі Уолша в спектр $X_F(k)$ у базисі Фур'є того ж вихідного сигналу АЦП.

Аналіз ефективності розробленого методу показав, що коефіцієнт продуктивності залишається майже постійним залежно від розрядності АЦП і знаходиться в межах $2,5 \div 2,88$. При цьому алгоритм ВСВ реалізується на основі процедури композиції базової операції і з точки зору програмної реалізації це створює умови для організації модульної структури програми з гнучким переналаштуванням на інший режим оброблення вихідних сигналів досліджуваного АЦП.

Література

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.
3. Бортник Г.Г. Методи та засоби аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів /

- Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник, В.М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с. – ISBN 978-966-641-537-3.
4. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений / Руднев П.И., Хаджи Б.А., Чернышев В.Ю., Шилов С.Н. // Радиотехника и электроника. – 1993. – №10. – С. 1868–1876.
 5. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с. – ISBN 966-641-183-0.
 6. Бортник Г.Г. Швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності / Г.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 47-50.
 7. Бортник Г.Г. Дослідження інтегральної нелінійності аналого-цифрового перетворювача у базисі дискретних функцій Фур'є / Г.Г. Бортник, С.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С.117-119.
 8. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов: / Н. Ахмед, К. Рао. – М. : Связь, 1980. – 248 с.
 9. Бортник Г.Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом/ Г.Г. Бортник, О.В. Стальченко, К.О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.–2015.– № 1.– С. 100-105.
 10. Бортник Г.Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2. – С.12-15.
 11. Бортник Г.Г. Цифровий метод спектрального оцінювання випадкових сигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 2. – С.108-114.

References

1. Ayficher E.S. Tsifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – М.: Williams, 2008. – 992 s.
2. Kester W. Analogo-tsifrovoe preobrazovsnie / Walt Kester. – М.: Technosphere, 2007. – 1016 s.
3. Bortnyk G.G. Metodu ta zasoby analogo-tsifrovogo peretvoreny vusokochastotnuh signaliv / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk, V.M. Kuchak. – Vinnytsya: VNTY, 2013. – 128 s. – ISBN 978-966-641-537-3.
4. Dynamicheskiye parametry analoho-tsyfrovykh preobrazovatelei y metody ykh yzmerenyi/ Rudnev P.Y., Khadzhy B.A., Chernyshev V.Yu., Shylov S.N. // Radyotekhnika y elektronika.– 1993.– №10. – S. 1868–1876.
5. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby otsiniuvannia parametriv abonentskykh linii zviazku / G.G. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s. – ISBN 966-641-183-0.
6. Bortnyk G.G. Shvydkodiuychi analoho-tsyfrovyi peretvoriuvach pidvyshchenoi tochnosti/ G.G. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2002. – № 5. – S. 47-50.
7. Bortnyk G.G. Doslidzhennia intehralnoi neliniinosti analoho-tsyfrovoho peretvoriuvacha u bazysi dyskretnykh funksii Furie / G.G. Bortnyk, S.G. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2005. – № 5. – P. 117-119.
8. Akhmed N. Ortohonalye preobrazovanyia pry obrabotke tsyfrovyykh syhnalov: / N. Akhmed, K. Rao. – М. : Sviaz, 1980. – 248 s.
9. Bortnyk G.G. Metod analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv z dodatkovym shumopodibnym syhnalom / G.G. Bortnyk, O.V. Stalchenko, K.O. Boiarskyi // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015.– № 1.– S. 100-105.
10. Bortnyk G.G. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / G.G. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2011. – № 2. – S. 12-15.
11. Bortnyk G.G. Tsyfrovyi metod spektralnoho otsiniuvannia vypadkovykh syhnaliv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasykivskyi, O.V. Stalchenko// Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu.–2014.–№2.– S.108-114.

Рецензія/Peer review : 11.9.2016 р.

Надрукована/Printed : 8.11.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією