

УДК 621.325

Г. Г. Бортник, к. т. н., доц.;

В. М. Кичак, д. т. н., проф.;

С. Г. Бортник, студ.

АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА БАЗІ ТАБЛИЧНОГО МЕТОДУ КОРИГУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ НЕЛІНІЙНОСТІ

Описано аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з коригуванням диференціальної нелінійності на базі табличного методу. Дослідження швидкодіючого АЦП з табличним коригуванням показали, що застосування гістограмної методики оцінювання диференціальної нелінійності з подальшим використанням результатів випробування з калібруванням перетворювача створює умови для підвищення ефективної роздільної здатності АЦП.

Вступ

Швидкодіючі аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є основними блоками сучасної радіоелектронної апаратури. Точність перетворення сигналів за допомогою АЦП впливає на ефективність функціонування радіоелектронних засобів.

Традиційно проблеми підвищення точності швидкодіючих АЦП вирішуються шляхом введення надлишковості у процес аналого-цифрового перетворення сигналів. Слід зазначити, що такий підхід поліпшення точнісних характеристик перетворювачів аналог—код досягається за рахунок суттєвого зниження швидкодії та значного ускладнення апаратної реалізації. У цьому зв'язку окреме місце займають дослідження, пов'язані з вирішенням проблеми комплексного підвищення точності при незначному зниженні швидкодії та ускладненні АЦП [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Динамічні властивості АЦП відображають його здатність функціонувати зі змінними у часі вхідними сигналами. У динамічному режимі передатна характеристика АЦП та її параметри суттєво відрізняються від значень, виміряних у статичному режимі випробувань. Реальний крок квантування АЦП може відрізнятись від номінального кроку, заданого при нормуванні параметрів АЦП у статичному режимі. Ця невідповідність виникає внаслідок інерційності та затримки реакції компараторів АЦП на змінювання вхідного сигналу, що призводить до збільшення похибки та шуму квантування, які характеризуються диференціальною нелінійністю [2].

Диференціальна нелінійність визначається як максимальне відхилення різниці двох вхідних аналогових сигналів, що викликають послідовне змінювання вихідних кодів АЦП, від значення, що відповідає одиниці молодшого розряду. Диференціальна нелінійність збільшується при перетворенні сигналів, що за амплітудою та частотним спектром відповідають граничним для даного АЦП. Таким чином, починаючи з деякої швидкості змінювання вхідного сигналу в динамічному режимі погіршується роздільна здатність АЦП, і відповідно зменшується ефективне число розрядів перетворювача. Тому для оцінювання похибок, що вносяться АЦП в результаті динамічних вимірювань, необхідно керуватись не лише статичними, але й динамічними характеристиками [3].

Для підвищення роздільної здатності АЦП у динамічному режимі в [4] запропоновано застосувати паралельне вмикання кількох перетворювачів. Даний підхід характеризується значним ускладненням структури перетворювача та вимагає використання ідентичних зразків мікросхем швидкодіючих АЦП.

У монографії [1] пропонується використання надлишкових позиційних систем числення для створення високоточних АЦП. Даний метод ефективний для побудови АЦП невисокої швидкодії і може застосовуватись при частотах дискретизації до 10 МГц.

У роботі [5] описано АЦП з коригуванням результатів перетворення аналог—код, у якому знаходиться математичне сподівання вихідного сигналу, що у подальшому враховується при коригуванні нелінійності АЦП. Але такий метод може використовуватись лише для вхідних сигналів, які є су-

мою корисного сигналу і низькочастотного шуму. Для інших класів вхідних сигналів даний метод коригування нелінійності АЦП є неефективним.

Виділення невіршених раніше частин проблеми

Практичний інтерес має задача автоматичного коригування динамічних похибок у процесі аналого-цифрового перетворення, розв'язання якої дозволяє покращити динамічні властивості швидкокодійних АЦП. Вказаний підхід є новим і недостатньо дослідженим. Тому розробка АЦП з коригуванням диференціальної нелінійності при збереженні високої швидкодії аналого-цифрового перетворення є актуальною задачею.

Метою роботи є зниження диференціальної нелінійності швидкокодійних АЦП за рахунок коригування результатів аналого-цифрового перетворення.

Розв'язання задачі

Протиріччя, що виникають між вимогами з підвищення точності з одного боку та збереження високої швидкодії й підвищення технологічності АЦП з іншого боку, обумовлюють необхідність пошуку нових принципів функціонально-структурної організації коригувальних АЦП з урахуванням можливостей мікроелектронних технологій.

Одним з найефективніших методів процесу коригування результатів аналого-цифрового перетворення, який у значній мірі задовольняє зазначеним вище вимогам, є табличний метод. Даний метод базується на збереженні коригувальних коефіцієнтів у постійному запам'ятовувальному пристрої (ПЗП). Досягнення інтегральної технології дозволяють створювати швидкокодійні великі інтегральні схеми ПЗП ємністю 16...64 Мбайт, що дає змогу розширити діапазон використання табличного методу коригування від 8-розрядних до 16-розрядних АЦП.

Для адекватного оцінювання диференціальної нелінійності, тобто, для отримання достовірних результатів вимірювання, необхідно використовувати статистичні методики, які базуються на визначенні гістограми вихідних кодів АЦП. Диференціальна нелінійність визначається на основі вимірюного статистичного ряду кодованих значень тестового сигналу. При цьому знаходиться розподілення вихідних кодів АЦП і функція густини ймовірності, що апроксимує це розподілення. Структура АЦП на основі табличного методу коригування диференціальної нелінійності показана на рис. 1.

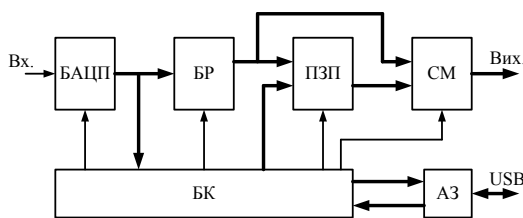


Рис. 1. Структура АЦП на базі табличного методу коригування диференціальної нелінійності

АЦП функціонує у двох режимах: калібрування та робочому. У режимі калібрування на вхід базового АЦП (БАЦП) подається тестовий сигнал. Для цього може використовуватись сигнал трикутної форми або синусоїдальний сигнал. Для того, щоб відліки БАЦП були незалежними, частота дискретизації не повинна бути синхронізованою з частотою тестового сигналу. Ймовірності появи кодових комбінацій нормуються відносно вхідного

сигналу, і отримана гістограма програмним методом за допомогою комп'ютера аналізується для оцінювання диференціальної нелінійності. Використовуючи тестовий сигнал трикутної форми і визначаючи гістограму ідеального АЦП, має бути отримана рівномірна густина кодових значень. Синтез тестових сигналів трикутної форми є складною технічною задачею, тому як тестовий використовують синусоїдальний сигнал, який при визначенні гістограми характеризується нерівномірною густиною ймовірності. Математична модель синусоїдального сигналу з випадковою початковою фазою має вигляд [6]

$$U(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos[\Psi(t)], \quad (1)$$

де φ — випадкова величина, рівномірно розподілена в інтервалі $[0, 2\pi]$; $\Psi(t)$ — випадкова величина, рівномірно розподілена в інтервалі $[\omega_0 t, \omega_0 t + 2\pi]$.

Математично це можна записати так [7]:

$$f_{\varphi}(x) = \begin{cases} 1/2\pi, & 0 \leq x \leq 2\pi; \\ 0, & x < 0 \text{ або } x > 2\pi \end{cases}$$

та

$$f_{\psi}(y) = \begin{cases} 1/2\pi, & \omega_0 t \leq y \leq \omega_0 t + 2\pi; \\ 0, & y < \omega_0 t \text{ або } y > \omega_0 t + 2\pi. \end{cases} \quad (2)$$

Для реалізації статистичної методики оцінювання диференціальної нелінійності АЦП необхідно знайти одновимірну густину ймовірності миттєвих значень тестового сигналу (1). З визначення густини ймовірності виходить, що ймовірність дорівнює $f_u(x)dx$. Тут $f_u(x)$ — шукана одновимірна ймовірність миттєвих значень сигналу $U(t)$. Ця ймовірність для синусоїдального сигналу дорівнює ймовірності того, що значення повної фази попадає в один з двох інтервалів dy . Тому можна знайти

$$f_u(x)dx = 2f_{\psi}(y)dy. \quad (3)$$

Підставивши (2), можна отримати

$$f_u(x)dx = \frac{1}{\pi} dy$$

або

$$f_u(x) = \frac{1}{\pi \left| \frac{dx}{dy} \right|}, \quad -U_m < x < U_m. \quad (4)$$

Щоб конкретизувати (4) для синусоїдального сигналу, необхідно знайти похідну

$$\left| \frac{dx}{dy} \right| = U_m \left| \frac{d[\cos(\Psi)]}{d\Psi} \right| = \sqrt{U_m^2 - U^2}. \quad (5)$$

Підставивши цей вираз у (4) можна отримати для заданих значень U

$$f_u(U) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{U_m^2 - U^2}}, & -U_m < U < U_m; \\ 0, & U < -U_m \text{ або } U > U_m. \end{cases} \quad (6)$$

Таким чином, одновимірна густина ймовірності тестового синусоїдального сигналу АЦП з випадковою початковою фазою не залежить від частоти ω_0 і від часу. Графік густини ймовірності сигналу $U(t)$ показано на рис. 2.

Як видно з графіка, в діапазоні $|U| < 0,5U_m$ змінювання змінної U густина ймовірності близька до рівномірної. А зі збільшенням $|U|$ значення густини ймовірності різко зростає.

Амплітуда тестового сигналу вибирається такою, щоб подвійний розмах сигналу перекривав усю шкалу перетворення АЦП. Запуск БАЦП відбувається з блоку керування (БК). Вихідні коди АЦП, які є цифровими еквівалентами тестового сигналу, подаються через адаптер зв'язку (АЗ) та шину USB в комп'ютер. Далі в умовно-реальному масштабі часу за допомогою комп'ютера відбувається вторинне оброблення масиву даних з метою визначення диференціальної нелінійності БАЦП. Диференціальна нелінійність оцінюється шляхом порівняння ймовірності появи заданого відліку з теоретичною ймовірністю для ідеальної синусоїди. Для цього за результатами N значень вихідного сигналу АЦП будується гістограма частот N_i/N , де $i = 0, 1, \dots, M_{\max}$.

За мінімальним і максимальним значеннями кодів, i_{\min} та i_{\max} , визначається амплітуда p_m ,

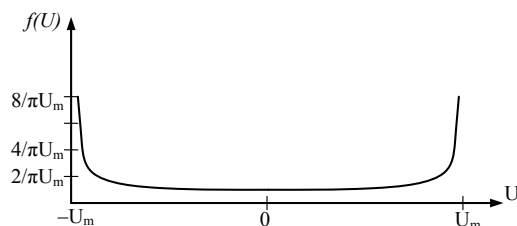


Рис. 2. Густина ймовірності синусоїдального сигналу з випадковою фазою

синусоїдального сигналу та його середнє кодове значення n_c

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{i_{\max} - i_{\min}}{2}; \\ n_c &= \frac{i_{\max} + i_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Потім розраховується теоретичне розподілення кодів комбінацій

$$P(i) = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{i-1-n_c}{n_m} \right) - \arcsin \left(\frac{i+n_c}{n_m} \right) \right]. \quad (8)$$

Диференціальна нелінійність в одиницях молодшого розряду (ОМР) для кожного i -го коду

$$\delta_{LD}(i) = \frac{N(i)/N}{P(i)} - 1. \quad (9)$$

Для ідеального АЦП $N(i)/N \approx P(i)$ і $\delta_{LD}(i) = 0$.

Необхідний обсяг масиву вихідних даних АЦП оцінюється з урахуванням таких міркувань. Внаслідок обмеження обсягу вибірки, середнє число відліків найменш імовірних середніх кодів визначають із середньоквадратичним відхиленням

$$\sigma = \sqrt{P_{\min} N}, \quad (10)$$

де $P_{\min} \approx \frac{2}{\pi M_{\max}}$ — мінімальна ймовірність появи середніх кодів на виході АЦП.

Для похибки оцінювання на рівні 1 %, обсяг вибірки задається як

$$N \geq 500\pi M_{\max}. \quad (11)$$

Компенсувальні значення диференціальної нелінійності для кожного рівня квантування БАЦП записуються у таблицю, тобто, у ПЗП.

В основному режимі вихідний код БАЦП через буферний регістр (БР) надходить на адресну шину ПЗП і першу вхідну шину суматора (СМ). На другу вхідну шину СМ подається код компенсації диференціальної нелінійності з ПЗП, який вибирається за адресою, що відповідає вихідному значенню коду БАЦП. За допомогою СМ здійснюється коригування диференціальної нелінійності.

На основі запропонованої структури АЦП створено макетний зразок перетворювача, у якому як БАЦП використано велику інтегральну схему (ВІС) фірми Analog Devices типу AD9432. Дана ВІС є 12-розрядним АЦП з максимальною частотою дискретизації 105 МГц [8]. Експериментальні дослідження диференціальної нелінійності макета АЦП теж здійснювались з використанням методу гістограм. На рис. 3 показано гістограми диференціальної нелінійності БАЦП (3а) та макетного зразка АЦП (3б) з частотою дискретизації 70 МГц.

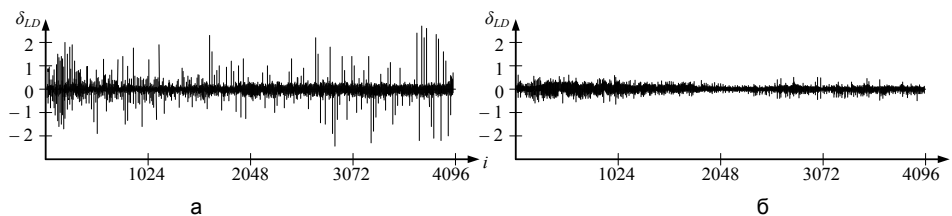


Рис. 3. Гістограми диференціальної нелінійності досліджуваних АЦП

Як видно з рис. 3а, типові значення диференціальної нелінійності мікросхеми AD9432 для частоти дискретизації 70 МГц знаходяться у межах $\pm 2,0$ ОМР. Водночас макет АЦП на базі табличного коригування характеризується максимальними значеннями диференціальної нелінійності, що не перевищує 0,5 ОМР (рис. 3б). Це відповідає збільшенню динамічного діапазону АЦП на 12 дБ.

Висновки

1. Диференціальна нелінійність визначає найбільш детальні особливості характеристики перет-

ворення швидкодійного АЦП. При перетворенні високочастотних сигналів ефективна кількість розрядів АЦП зменшується внаслідок збільшення диференціальної нелінійності.

2. Для поліпшення динамічних параметрів АЦП необхідно виконувати коригування результатів аналого-цифрового перетворення шляхом оцінювання диференціальної нелінійності на кожному рівні квантування тестового синусоїдального сигналу в режимі калібрування перетворювача, записуванням компенсувальних значень у таблицю (ПЗП) та подальшим компенсуванням нелінійності в робочому режимі.

3. Експериментальні дослідження швидкодійного АЦП з табличним коригуванням показали, що застосування гістограмної методики оцінювання диференціальної нелінійності з подальшим використанням результатів випробування при калібруванні перетворювача створює умови для підвищення ефективної роздільної здатності АЦП.

Перспективи. Зниження диференціальної нелінійності ВІС швидкодійних АЦП за рахунок табличного коригування дає можливість розширити сфери використання цих перетворювачів у контрольно-вимірній апаратурі та засобах вторинного оброблення радіолокаційних сигналів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення. — Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. — 260 с.
2. Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Советское радио, 1980. — 280 с.
3. Руднев П. И., Хаджи Б. А., Чернышев В. Ю., Шильев С. Н. Динамические параметры аналого-цифровых преобразователей и методы их измерений // Радиотехника и электроника. — 1993. — № 10. — С.1868—1876.
4. Reeder R., Looney M., Hand J. Pushing the state of the Art with Multichannel A/D Converters // Analog Dialogue. — 2005. No 5. P. 3—6.
5. Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов. — М.: Мир, 1999. — 559 с.
6. Аминев А. М., Бахтиаров Г. Д., Тимофеев А. Л. Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП // Зарубежная радиоэлектроника. — 1989. — № 4. — С. 36—55.
7. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / Пер. с франц. под ред. К.С.Шифрина. — М.: Наука, 1967. — 780 с.
8. Романов В. А. Быстродействующий 12-разрядный АЦП // Электронные компоненты и системы. — 2000. — № 1. — С. 48.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007)» (31.05—2.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.09.07
Рекомендована до друку 04.10.07

Бортник Геннадій Григорович — доцент, **Кичак Василь Мартинович** — завідувач кафедри.

Кафедра телекомунікаційних систем і телебачення;

Бортник Сергій Геннадійович — студент Інституту радіотехніки, зв'язку та приладобудування.

Вінницький національний технічний університет