

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.396

Г. Г. Бортник¹
М. Л. Мінов¹
О. В. Стальченко¹

**МЕТОД РОЗШИРЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ
 ІМПУЛЬСНО-КОДОВОГО МОДУЛЯТОРА
 ВИСОКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ**

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано метод розширення динамічного діапазону імпульсно-кодowego модулятора високочастотних сигналів на базі цифрового коригування розрядної нелінійності модулятора. Перевагою методу є широкий динамічний діапазон модулятора, а також простота процесу визначення коригувальних поправок.

Ключові слова: імпульсно-кодировий модулятор, високочастотні сигнали, динамічний діапазон, дискретне перетворення Уолша.

Вступ

Останнім часом набуває широкого поширення у засобах зв'язку використання імпульсно-кодирових модуляторів (ІКМ). Для побудови приймально-передавальної апаратури телекомунікаційних систем необхідно застосовувати ІКМ, що кодують високочастотні багатоканальні сигнали. Така організація приймально-передавального тракту в сучасних стандартах зв'язку виключає необхідність транспонування багатоканального сигналу в низькочастотний діапазон і дозволяє всі операції оброблення сигналів здійснювати в цифровій формі безпосередньо у смузі високих частот. Це дає можливість значно покращити якість зв'язку за рахунок збільшення відношення сигнал/шум. Але при цьому висуваються жорсткі вимоги щодо розширення динамічного діапазону ІКМ, тобто модулятори не повинні створювати паразитні гармонічні складові, що маскують корисні сигнали з низькою амплітудою.

Незважаючи на високі технічні характеристики, досягнуті в існуючих ІКМ, питання розширення їх динамічного діапазону у приймально-передавальному тракті телекомунікаційних систем як і раніше залишається актуальним [1, 2]. Забезпечення необхідного динамічного діапазону ІКМ, як визначається в публікаціях [1—3] і як свідчить практика, є досить складною науково-технічною задачею.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розширення динамічного діапазону ІКМ високочастотних сигналів за рахунок цифрового коригування розрядної нелінійності передатної характеристики модулятора.

Задачами дослідження є:

- розробка принципів цифрового коригування розрядної нелінійності ІКМ;
- визначення розрядної нелінійності передатної характеристики ІКМ;
- аналіз ефективності цифрового коригування розрядної нелінійності ІКМ.

Принципи цифрового коригування розрядної нелінійності ІКМ

Основний принцип коригування нелінійності ІКМ полягає в ідентифікації параметрів передатної характеристики (ПХ), що відображають поведінку функції перетворення модулятора для широкого класу вхідних високочастотних сигналів. Для методу цифрового коригування, що пропонується в роботі, передбачаються такі етапи:

- а) гістограмне оцінювання нелінійності ПХ ІКМ для заданого тестового сигналу;

- б) визначення розрядної нелінійності ІКМ за допомогою цифрового оброблення сигналів (ЦОС);
 в) визначення коригувальних поправок для досліджуваного ІКМ;
 г) формування коригувальних сигналів в ІКМ.

У роботі пропонується здійснювати визначення розрядної нелінійності у спектральній області. Теоретичним підґрунтям можливості та коректності такого принципу коригування слугує аналого-дискретний варіант рівняння Парсеваля [3]

$$\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt = \frac{1}{T \cdot f_s} \sum_{i=0}^{T \cdot f_s} \left[\frac{i}{f_s} \right]^2, \quad (1)$$

де T — тривалість сигналу; f_s — частота дискретизації ІКМ; i — дискретний відлік сигналу.

Це рівняння дає змогу стверджувати про еквівалентність обчислення потужності неперервного сигналу на вході ІКМ та цифрового сигналу на виході ІКМ з урахуванням коефіцієнта передачі.

Важливим принципом коригування нелінійності ІКМ є його реалізація у цифровій частині модулятора, при цьому аналогова частина не змінюється. Подача тестового сигналу на вхід n -розрядного ІКМ з точним кодовим еквівалентом $Q_p = \sum_{i=1}^n 2^{-i} \cdot \alpha_{pi}$ приводить до формування на виході ІКМ реального кодового сигналу

$$Q_r = \sum_{i=1}^n 2^{-i} \cdot \alpha_{ri}, \quad (2)$$

де n — число розрядів ІКМ; α_{ri} — розрядний коефіцієнт.

При цьому різниця точного та реального кодового сигналу відповідає значенню сумарної нелінійності усіх розрядів ІКМ, що формують вихідний сигнал

$$Q_p - Q_r = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \alpha_{ri}, \quad (3)$$

де δ_i — значення i -ї розрядної нелінійності ІКМ.

Звідси скориговане значення вихідного сигналу ІКМ дорівнює

$$Q_c = Q_r + \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \alpha_{ri}. \quad (4)$$

Таким чином, згідно з виразом (4) реалізується інтегральний принцип цифрового коригування нелінійності ІКМ, узагальнена структура якого показана на рис. 1.

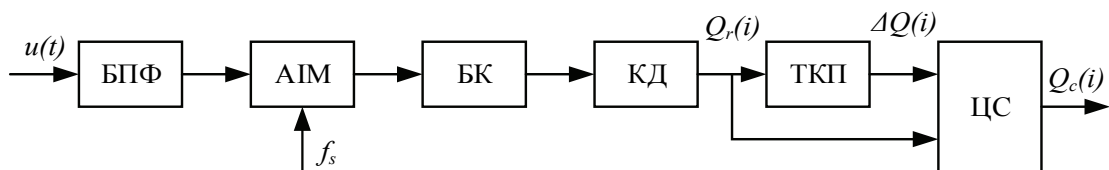


Рис. 1. Структура, що реалізує принцип цифрового коригування нелінійності ІКМ

Вхідний неперервний сигнал $u(t)$, пройшовши відповідні перетворення у блоці підсилення та формування (БПФ), подається на вхід амплітудно-імпульсного модулятора (АІМ), де відбувається його трансформація в дискретну форму з частотою дискретизації f_s . Цифровий сигнал $Q_r(i)$ утворюється в результаті послідовного проходження амплітудно-імпульсно-модульованого сигналу через блок квантування (БК) та кодер (КД). Скоригований сигнал $Q_c(i)$ формується при додаванні до сигналу $Q_r(i)$ коригувальної поправки $\Delta Q(i)$. Для цього використовується цифровий суматор (ЦС) і таблиця коригувальних поправок (ТКП).

Визначення розрядної нелінійності ІКМ

Визначення розрядної нелінійності ІКМ здійснюється з метою подальшого калібрування ІКМ та запису поправок у ТКП. Для цього на першому етапі пропонується виконувати гістограмне оці-

нювання нелінійності ПХ ІКМ шляхом накопичення великого масиву відліків вихідного сигналу з відомою густиною ймовірностей. Як тестовий вплив застосовується сигнал синусоїдальної форми. Для n -розрядного ІКМ з вхідним діапазоном $\pm u_{f_s}$ імовірність появи j -го кодового слова, що є еквівалентом синусоїдального сигналу, дорівнює [4]

$$p(j) = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \frac{u_{f_s} (j - 2^{n-1})}{u_m \cdot 2^n} - \arcsin \frac{u_{f_s} (j - 1 - 2^{n-1})}{u_m \cdot 2^n} \right], \quad (5)$$

де u_m — амплітуда тестового синусоїдального сигналу.

Для такого тестового сигналу теоретичне число появи j -го кодового слова визначається як

$$M_t(j) = p(j) \cdot M_\Sigma, \quad (6)$$

де M_Σ — загальний обсяг вибірки тестового сигналу.

Тоді диференціальна нелінійність ІКМ дорівнює

$$\delta_d(j) = \frac{M_r(j)}{p(j) \cdot M_\Sigma} - 1, \quad (7)$$

де $M_r(j)$ — реальне число появи j -го кодового слова.

Необхідна точність гістограмного оцінювання забезпечується за умови, щоб частота вхідного синусоїдального сигналу не була кратною частоті дискретизації ІКМ. Для допустимої похибки на рівні 0,1 одиниці молодшого розряду (ОМР), обсяг необхідної вибірки можна задати як:

$$M_\Sigma \geq 50\pi \cdot 2^{n-1}. \quad (8)$$

Гістограмне оцінювання може використовуватись для коригування кожного рівня квантування ПХ ІКМ. Але для цього потрібно мати ТКП обсягом $2^n - 1$, що значно ускладнює його апаратну реалізацію та знижує швидкодію ІКМ. Окрім того, поправка рівня квантування ПХ залежить від попередніх поправок рівнів, тому випадання будь-якої з цих кодових комбінацій призводить до помилок визначення усіх подальших поправок. Тому на другому етапі пропонується здійснити процедуру ЦОС, а саме: застосувати для послідовності нелінійностей ІКМ дискретне перетворення Уолша (ДПУ), яке має такий вигляд [5]:

$$X_W(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot \text{Wal}(k, m), \quad (9)$$

де $\text{Wal}(k, m)$ — функції Уолша, що набувають значень ± 1 .

Розглянемо, як нелінійність ПХ ІКМ відображається у спектрі дискретних функцій Уолша. ПХ n -розрядного ІКМ з числом кроків квантування $N = 2^n - 1$, може бути повністю представлена лише $m + 1$ складовими спектра у базисі Уолша. При цьому $X_W(0)$ відповідає зміщенню ПХ ІКМ, а інші складові $X_W(k)$ — відповідним вихідним розрядам ІКМ. Проаналізуємо нелінійність ПХ ІКМ, що наведена на рис. 2.

Використовуючи функції Уолша $\text{Wal}(1, m)$ і $\text{Wal}(3, m)$ [5], отримаємо для $n = 4$:

$$X_W(1) = -\frac{1}{N} \delta_{n-1} \cdot 0,5N = -0,5 \delta_3; \quad (10)$$

$$X_W(3) = -\frac{1}{N} (\delta_{n-2} \cdot 0,25N + \delta_{n-2} \cdot 0,25N) = -0,5 \delta_2.$$

Звідси, у загальному випадку, можна записати для i -го розряду ІКМ значення складової у базисі Уолша:

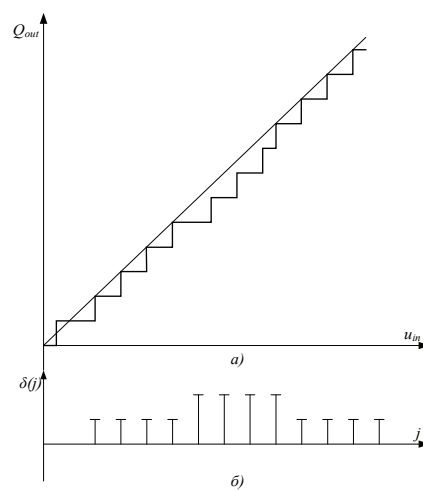


Рис. 2. Передатна характеристика ІКМ: а) з відповідною нелінійністю; б) представлена спектром складових у базисі Уолша

$$X_W(k) = X \left[2^{n-i} - 1 \right] = -0,5\delta_i, \quad (11)$$

де $i = 0, 1, \dots, n-1$.

Таким чином, розрядна нелінійність ІКМ знаходить своє відображення у відповідній складовій в базисі Уолша. ДПУ послідовності, що представляє нелінійність ПХ ІКМ, для кожного спотвореного розряду формує лише одну частотну складову, а це спрощує процес визначення поправки для коригування вихідного сигналу ІКМ.

Аналіз ефективності цифрового коригування розрядної нелінійності ІКМ

Критерієм ефективності запропонованого методу є динамічний діапазон ІКМ, який визначається згідно з виразом [6]

$$D = 20 \lg \frac{u_{in}}{u_{fs}} + 6n - 20 \lg k - 4,8, \quad (12)$$

де k — пік-фактор вхідного сигналу.

З урахуванням потужності завад, що вносяться нелінійністю ІКМ, його динамічний діапазон можна знайти як

$$D = 20 \lg \frac{u_{in}}{u_{fs}} + 6n - 20 \lg k + 4,8 - 20 \lg \left(1 + \frac{2\delta}{q} \right), \quad (13)$$

де q — крок квантування ІКМ.

Уведемо у вираз (13) коригувальну складову Δu . При цьому здійснюється компенсація нелінійності до заданого рівня в ОМР. Визначимо, до якого рівня доцільно знижувати δ , виходячи з умов рівності потужності завад, що породжуються нелінійністю та потужністю шумів квантування. Для цього розв'яжемо рівняння $3(2\delta)^2 = 2^{-n}$. Звідси, враховуючи, що 2^{-n} визначає крок квантування, отримаємо $\delta = \frac{q}{2\sqrt{3}}$. Тобто нелінійність ПХ ІКМ не повинна перевищувати 0,3 ОМР. Тоді

запишемо вираз для динамічного діапазону ІКМ з коригуванням розрядної нелінійності

$$D = 20 \lg \frac{u_{in}}{u_{fs}} + 6n - 20 \lg k + 4,8 - 20 \lg \left(1 + \frac{2\delta - \Delta u}{q} \right). \quad (14)$$

Точність формування коригувальної складової визначається похибкою гістограмного оцінювання нелінійності $\sigma_{LH} = \frac{u_m \cdot \pi}{2q} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}}$ [4]. Слід врахувати також втрати на неоптимальність оброблення розрядної нелінійності L згідно з алгоритмом ДПУ, що зумовлені квантуванням коефіцієнтів у базисі Уолша та масштабуванням даних

$$\sigma_L = \frac{u_m \cdot \pi}{2q} \frac{1}{\sqrt{M}} \cdot 10^{\frac{L}{10}}. \quad (15)$$

Традиційно для умовно-реального масштабу процесу калібрування ІКМ, значення $L < 3$ дБ [7].

Графічна інтерпретація залежності $D = f(\delta)$ для 12-розрядного ІКМ має вигляд, зображений на рис. 3. Верхні графіки побудовано для ІКМ з коригуванням, а нижній — без коригування. Причому криву D1 побудовано без урахування втрат на неоптимальність оброблення, для кривої D2 враховано похибки гістограмного оцінювання, а для D3 враховано усі наведені вище чинники.

Аналіз залежностей на рис. 3 дозволяє стверджувати, що ефект від коригування зростає зі збі-

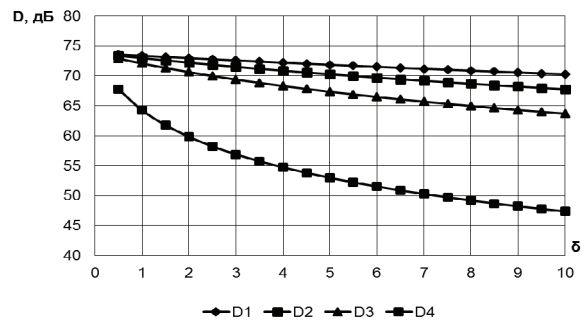


Рис.3. Залежність динамічного діапазону 12-розрядного ІКМ від нелінійності передатної характеристики

льшенням нелінійності ІКМ і для значення нелінійності 10 ОМР динамічний діапазон ІКМ з цифровим розрядним коригуванням на 17 дБ ширший, ніж в аналогічного ІКМ без коригування.

Висновки

Запропонований метод цифрового розрядного коригування ІКМ передбачає двоетапний процес визначення нелінійності ПХ модулятора, а саме: гістограмне оцінювання нелінійності з подальшим ЦОС на базі ДПУ. Це спрощує процес визначення коригувальних поправок та зберігає високу швидкодію ІКМ високочастотних сигналів.

Аналіз ефективності запропонованого методу підтвердив, що цифрове коригування розрядної нелінійності ІКМ дає змогу розширити динамічний діапазон модулятора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В. В. Деев. — СПб. : Наука, 2007. — 267 с. — ISBN 978-5-02-025182-3.
2. Minkoff J. Signal processing fundamentals and applications for communications and sensing systems / J. Minkoff. — Norwood : Artech House, 2002. — 325 p. — ISBN 1-58053-360-4.
3. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис ; пер. с англ. — М. : Вильямс, 2008. — 992 с. — ISBN 978-5-8459-0710-3.
4. 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.
5. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К. Рао ; пер. с англ. — М. : Связь, 1980. — 248 с.
6. Бортник Г. Г. Методи та засоби обробки високочастотних сигналів / Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. — Вінниця : УНІ-ВЕРСУМ-Вінниця, 1998. — 132 с. — ISBN 966-7199-23-1.
7. Петровский А. А. Методы и микропроцессорные средства обработки широкополосных и быстропротекающих процессов в реальном времени / А. А. Петровский ; под ред. Г. В. Римского. — Минск : Наука и техника. — 1988. — 272 с. — ISBN 5-343-00260-9.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.02.2015

Бортник Геннадій Григорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: bgen88@gmail.com;

Мінов Михайло Леонідович — інженер кафедри телекомунікаційних систем і телебачення;

Стальченко Олександр Володимирович — старший викладач кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, e-mail: stal1978@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

G. G. Bortnyk¹
M. L. Minov¹
O. V. Stalchenko¹

Method of expansion of dynamic range of pulse-code modulator of high-frequency signals

¹Vinnitsia National Technical University

There has been offered the method of expansion of dynamic range of pulse-code modulator of high-frequency signals on the base of digital correction of bit non-linearity. The advantage of the method is a wide dynamic range of keyer, and also simplicity of process of determination of corrections.

Keywords: pulse-code modulator, high-frequency signals, dynamic range, discrete Walsh transform.

Bortnyk Gennadii G. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: bgen88@gmail.com;

Minov Mykhailo L. — Engineer of the Chair of Telecommunication Systems and Television;

Stalchenko Oleksandr V. — Senior Lecturer of the Chair of Telecommunication Systems and Television,
e-mail: stal1978@mail.ru

Г. Г. Бортник¹
М. Л. Минов¹
О. В. Стальченко¹

Метод расширения динамического диапазона импульсно-кодowego модулятора высокочастотных сигналов

¹Винницкий национальный технический университет

Предложен метод расширения динамического диапазона импульсно-кодowego модулятора высокочастотных сигналов на базе цифровой коррекции разрядной нелинейности. Преимуществом метода является широкий динамический диапазон модулятора, а также простота процесса определения корректирующих поправок.

Ключевые слова: импульсно-кодовой модулятор, высокочастотные сигналы, динамический диапазон, дискретное преобразование Уолша.

Бортник Геннадий Григорьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: bgen88@gmail.com;

Минов Михаил Леонидович — инженер кафедры телекоммуникационных систем и телевидения;

Стальченко Александр Владимирович — старший преподаватель кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: stal1978@mail.ru