

О.В.Тимченко

ВИКОРИСТАННЯ ДЕЛЬТА-МОДУЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Сучасне поліграфічне обладнання, наприклад, машини багатоколірного офсетного або глибокого друку, вимагає використання високоточних і швидкодіючих систем автоматичного регулювання [1].

Побіжний аналіз показує, що при швидкості руху паперової стрічки 6 м/с і необхідній точності суміщення фарб 1 мм слід оцифровувати регулюючі сигнали з точністю 12—13 двійкових розрядів при частоті дискретизації $T_{\Sigma}^{-1} = 1$ кГц, хоча верхня частота спектра регулюючих сигналів, як правило, $f_{\Sigma} < 10$ Гц. Тому особливістю цих

сигналів є порівняно низька швидкість зміни, тобто вузькосмуговість сигналів регулювання.

Подання аналогових сигналів цифрових систем може здійснюватись за допомогою імпульсно-кодової модуляції або дельта-модуляції (ІКМ або ДМ).

ІКМ базується на аналого-цифровому перетворенні сигналу, яке використовує дискретизацію за часом, квантування і кодування отриманих аналогових відліків за рівнем.

Майже всі види ДМ базуються на дискретизації за часом, квантуванні і кодуванні за рівнем різниці між відліками вхідного та апроксимуючого сигналів. ДМ характеризується зв'язками між кроками квантування і є більш заводостійкою, ніж ІКМ: при попаданні або трансформації символів катастрофічний збій, як при ІКМ, відсутній. Апроксимуючий сигнал формується шляхом сумування відповідних кроків квантування. Оскільки різницевий сигнал змінюється в більш вузьких межах, ніж вхідний, розрядність ДМ-коду завжди нижча порівняно з кодом ІКМ. Саме це робить перспективним використання ДМ у системах автоматичного регулювання.

У даній роботі обгрунтовано переваги ДМ-подання сигналів перед ІКМ у системах автоматичного регулювання і дано методику розрахунку таких систем в частотній області. Крім того, коротко охарактеризовані переваги реалізації процесорів з ДМ-поданням.

Визначимо вигрaш у розрядності оброблюваних сигналів при переході від ІКМ до ДМ. Як відмічалось раніше, системи автоматичного регулювання поліграфічного обладнання є вузькосмуговими, тобто величина $\mu = T_{\delta}^{-1} / T_{\mu}^{-1} \gg 1$, де $T_{\mu}^{-1} = 2 f_{\delta}$ — частота Найквіста. Як показано в [3], величина μ визначається співвідношенням максимального кроку квантування $s_{\text{max}}^{(x)}$ і діапазону зміни сигналів $\{-U_m, U_m\}$:

$$\mu = \frac{\pi}{2} \arcsin^{-1} \left(\frac{s_{\text{max}}^{(x)}}{2 U_m} \right).$$

Звідси, враховуючи, що однакова роздільна здатність при ДМ-ІКМ-кодуванні сигналу вимагає однакових величин' мінімальних кроків квантування $s_{\text{min}}^{(x)} = s_{\text{max}}^{(x)} / 2^{r(x)} - 1$ ($r(x)$ — розрядність кодування), знайдемо вигрaш у розрядності при переході від ІКМ до ДМ:

$$\Delta r = - \log_2 \left[\sin \left(\frac{\pi}{2\mu} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Значення $\Delta r(\mu)$ дозволяє визначити бажаний вид подання вхідного сигналу системи автоматичного регулювання: вигрaш у розрядності настауає при $\mu > 1,6$ або $T_{\delta}^{-1} > 3,2 f_{\delta}$. При таких μ завжди слід

надавати перевагу ДМ-кодуванню, тому що це приводить у кінцевому підсумку до скорочення апаратурних затрат при однаковій роздільній здатності.

Розрахунок системи автоматичного регулювання в частотній області може бути зведений до розрахунку фільтрів з кінцевою імпульсною характеристикою (ІХ), які формують необхідні амплітудно-частотні і фазочастотні характеристики (АЧХ і ФЧХ). Такі фільтри завдяки лінійній ФЧХ є абсолютно стійкими.

Розрахунок цифрових фільтрів з ДМ, які мають задану АЧХ $H(\omega)$, докладно розглянутий у [4]. Він базується на знаходженні коефіцієнтів ІХ $\{s_{\max}^{(h)}\}_{m=0, M-1}$ в ДМ-форматі, які апроксимують вагову ІКМ-послідовність фільтра $\{h_m\}$, $m=0, M$ із заданою $H(\omega)$. Це здійснюється за правилом:

$$s_k^{(h)} = s_{\min}^{(h)} \cdot \operatorname{sgn}(h_k - \hat{h}_0) \cdot ETN \left(\frac{|h_k - \hat{h}_0|}{s_{\min}^{(h)}} + 0,5 \right), \quad (2)$$

де $\hat{h}_k = \sum_{i=1}^k s_i^{(h)}$, $\hat{h}_0 = 0$; $ETN(\cdot)$, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ — ціла частина і знак величини (\cdot).

Мінімальний крок квантування $s_{\min}^{(h)}$ в (2) повинен мінімізувати величину шумів зернистості і тому вибирається з нерівності

$$|s_{\min}^{(h)}| \leq \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} (h_i - h_{i-1})^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

З другого боку, максимальне значення кроку $s_{\max}^{(h)} = s_{\min}^{(h)} \cdot 2^{(h)} - 1$ повинно забезпечити відсутність шумів перевантаження по крутизні і вибирається на основі [5]:

$$|s_{\max}^{(h)}| \geq \max_{i=1, M-1} |h_i - h_{i-1}|. \quad (4)$$

Вибір кроків на основі (2) — (4) дозволяє при заданому співвідношенні сигнал/шум мінімізувати розрядність оброблюваних сигналів.

Перевірка розрахованих АЧХ і ФЧХ здійснюється за допомогою дискретного перетворення Фур'є апроксимуючої ІХ $\{h_m\}$, $m=0, M-1$:

$$\widehat{H}(\omega) = \sum_{k=0}^{M-1} \widehat{h}_k \cdot e^{jk\omega T_0} \quad (5)$$

Відповідно, відхилення отриманої АЧХ від заданої визначимо як:

$$\Delta H(\omega) = H_L(\omega) - \widehat{H}_L(\omega), \quad (6)$$

де $H_L(\omega)$ — логарифмічна АЧХ. Відмітимо, що $\Delta H(\omega) \rightarrow 0$ при збільшенні M і відповідному зменшенні $s_{\text{max}}^{(h)}$.

Вихідний ІКМ-сигнал фільтра, якщо вхідний сигнал $\{s_k^{(v)}\}$, $k > 0$ та ІХ $\{s_m^{(h)}\}$, $m = 0, M-1$ дані в ДМ-форматі, записують на основі [3] у вигляді:

$$y_n = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^i \sum_{m=0}^{M-1} s_{k-m}^{(v)} s_m^{(h)}. \quad (7)$$

Обчислення $\{y_n\}$, $n > 0$ за (7) раціонально проводити в три етапи. На першому виконується дозоване нагромадження добутоків:

$$\nabla^2 y_k = \sum_{m=0}^{M-1} s_{k-m}^{(v)} s_m^{(h)}, \quad (8)$$

а на другому і третьому — неперервне нагромадження значень другої різниці (8):

$$\nabla^2 y_l = \sum_{k=1}^l \nabla^2 y_k; \quad y_n = \sum_{i=1}^n \nabla y_i.$$

Значення (8) вираховуються за допомогою M -перемножень і $M-1$ -го додавань отриманих добутоків. Враховуючи, що при переході від подання сигналів з ІКМ до ДМ зменшення розрядності згідно з (1) складає величину $\Delta r^{(v)} = 5$, виграш у швидкодії процесора при використанні апаратних перемножувачів за [6] становить не менше 4. Оскільки розрядність ДМ-сигналів у (8) не перевищує 4...6, є сенс перемножувачі виконувати, застосовуючи постійні запам'ятовуючі пристрої з відповідною кількістю входів. Це дозволяє підвищити швидкодію такого фільтра або його точність (за рахунок збільшення довжини ІХ) не менш як на порядок.

Таким чином, використання ДМ у системах автоматичного регулювання доцільне: підвищується точність і швидкодія систем не менше як на порядок, а їх реалізація може бути простішою, ніж при традиційному ІКМ-поданні сигналів.

1. Луцків М.М. Системи автоматичного керування ротаційними машинами з пружними зв'язками: Навч. посібник. К., 1991.
2. Погрибной В.А. Дельта-модуляція в цифровій обробці сигналів. М., 1990.
3. Погрибной В.А., Тымченко А.В. Расчет цифровых фильтров с дельта-модуляцией // Изв. вузов СССР. Сер. Радиозлектроника. 1988. Т.31.
4. Погрибной В.А. Бортовые системы обработки сигналов. К., 1984.
5. Погрибной В.А., Тымченко А.В. Улучшение свойств цифровых фильтров на основе преобразования импульсных характеристик // Радиотехника и электроника. 1989. Вып.5. С.1045 — 1051.
6. Стил Р. Принципы дельта-модуляции. М., 1979.

Стаття надійшла до редакції 20.01.94