

АДАПТИВНА ЦИФРОВА ФІЛЬТРАЦІЯ

1. Адаптивні фільтри
2. Лінійний прогноз
3. Вокодери з лінійним прогнозом

Адаптивними називають фільтри, частотні характеристики яких залежать від спектрів оброблюваних сигналів. Основне завдання адаптивного фільтру (АФ) — підвищити якість прийому або обробки сигналу. Вимоги до АЧХ адаптивних фільтрів не задаються, оскільки їх характеристики *змінюються в часі*.

Процедура конструювання АФ полягає у виборі класу фільтру (КИХ, БІХ) і оптимального алгоритму коректування (адаптації) змінних коефіцієнтів. Саме вибір і побудова оптимального алгоритму є найбільш складним завданням, пов'язаним з великими затратами обчислювальних ресурсів і забезпеченням роботи пристрою у реальному часі.

Адаптивні фільтри

Серед багатьох областей застосування АФ можна виділити основні:

- *корекція спотворень* при передачі сигналу по каналах зв'язку; в цьому випадку АФ моделює зворотну характеристику системи: відомий на передачі і прийомі еталонний сигнал подається на вхід каналу зв'язку, його спотворена копія з виходу каналу зв'язку проходить через ЦФ, далі від сигналу, одержаного на виході ЦФ, віднімається еталонний сигнал; в результаті перебудови коефіцієнтів частотна характеристика цифрового фільтру виявляється зворотного щодо частотної характеристики каналу зв'язку;

- *придушення шумів* — в цьому випадку сигнал, що містить заваду, подається безпосередньо на суматор, на вхід ЦФ подається зразок завади, яка після проходження через ЦФ віднімається з сигналу, що містить заваду; в результаті на виході виходить шуканий сигнал;

- *компресія (стиснення)* мовних сигналів в системах з лінійним прогнозом (вокодерах), які розглядаються нижче.

Адаптивні фільтри

АФ складається з трьох елементів (рис.1):

- цифрового фільтру із змінними коефіцієнтами;
- пристрої визначення помилки (суматор на схемі);
- пристрою, що реалізовує алгоритм адаптації.

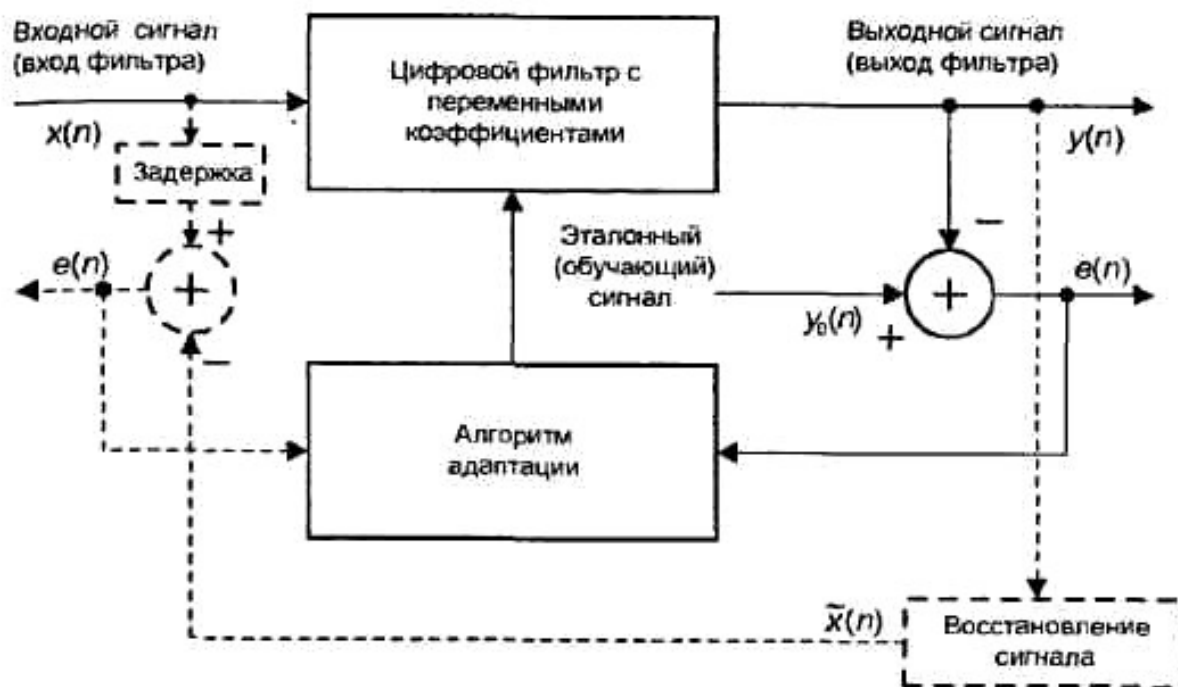


Рис.1

Адаптивні фільтри

Принцип роботи АФ видно з рисунка 1. Вихідний сигнал фільтру $y(n)$, що відрізняється від еталонного $y_0(n)$, віднімається з $y_0(n)$. Отримувана помилка $e(n)$ подається на пристрій адаптації, який так змінює коефіцієнти ЦФ, щоб звести $e(n)$ до мінімуму.

У складніших системах з метою отримання кращих характеристик сигналу $y(n)$ використовується інший принцип адаптації, що одержав назву *зворотного*. Цей варіант зображений на рис.1 штриховими лініями. По сигналу $y(n)$ відновлюється сигнал, який відрізнятиметься від вхідного сигналу $x(n)$ на величину помилки $e(n)$, яка і управляє адаптацією. Введення лінії затримки необхідне для часового узгодження сигналів $x(n)$ і $\tilde{o}(n)$.

Адаптивні фільтри

Процес адаптації може бути як одноцикловим (однокроковим) так і ітеративним, коли адаптація здійснюється крок за кроком. Основними характеристиками алгоритму адаптації є швидкість збіжності при заданій помилці і складність (об'єм обчислень). На практиці з багато алгоритмів адаптації, але найчастіше застосовуються алгоритми, засновані на критерії мінімуму середньоквадратичної помилки (СКП).

Залежно від характеру усереднювання помилки фільтрації по заданому критерію виділяють *глобально-адаптивні* і *локально-адаптивні* фільтри. Якщо помилка усереднюється по всьому оброблюваному сигналу, фільтр називається глобально-адаптивним (звичайне це КІХ-фільтри); якщо адаптація здійснюється в межах окремих фрагментів (кадрів) сигналу, фільтр називається локально-адаптивним (звичайне це БІХ-фільтри).

Лінійний прогноз

Лінійний прогноз (ЛП) — це обчислювальна процедура, що дозволяє по деякій лінійній комбінації L попередніх зважених відліків сигналу передбачити (з деякою точністю) майбутнє значення відліку.

Практична важливість лінійного прогнозу для спектрального аналізу полягає в отриманні оцінки спектру досліджуваного сигналу на його відрізку (кадрі) завдовжки в L відліків, а з погляду фільтрації — в отриманні рекурсивного адаптивного фільтру порядку M — на ділянці квазістаціонарної, тобто на тому часовому відрізку тривалістю LT , де коефіцієнти фільтру залишаються постійними. Підсумком рішення задачі ЛП є отримання коефіцієнтів адаптивного фільтру, АЧХ якого з хорошим ступенем наближення відповідає спектру сигналу на кадрі.

Лінійний прогноз є надзвичайно ефективним при побудові вокодерів — систем стиснення мови. Він дозволяє одержувати на прийомі синтезований мовний сигнал за якістю, дуже близькому до природного звучання. Лінійний прогноз знайшов також широке застосування в обробці зображень для стиснення відеоданих.

Лінійний прогноз

Завдання лінійного прогнозу може бути сформульоване таким чином: на виході деякої системи спостерігається сигнал $y(n)$; відомо, що це система полюсного типу з системною функцією виду:

$$H(z) = \frac{b_0}{1 - \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}}$$

яка має порядок $K=M-1$ і збуджується білим шумом.

З виду системної функції $H(z)$ можна отримати, що відліки сигналу $y(n)$ на виході системи визначаються виразом:

$$y(n) = b_0 x(n) + \sum_{k=1}^{M-1} a_k y(n-k).$$

Необхідно знайти значення коефіцієнтів a_k

Лінійний прогноз

Суть процедури рішення пояснює рисунок 2:

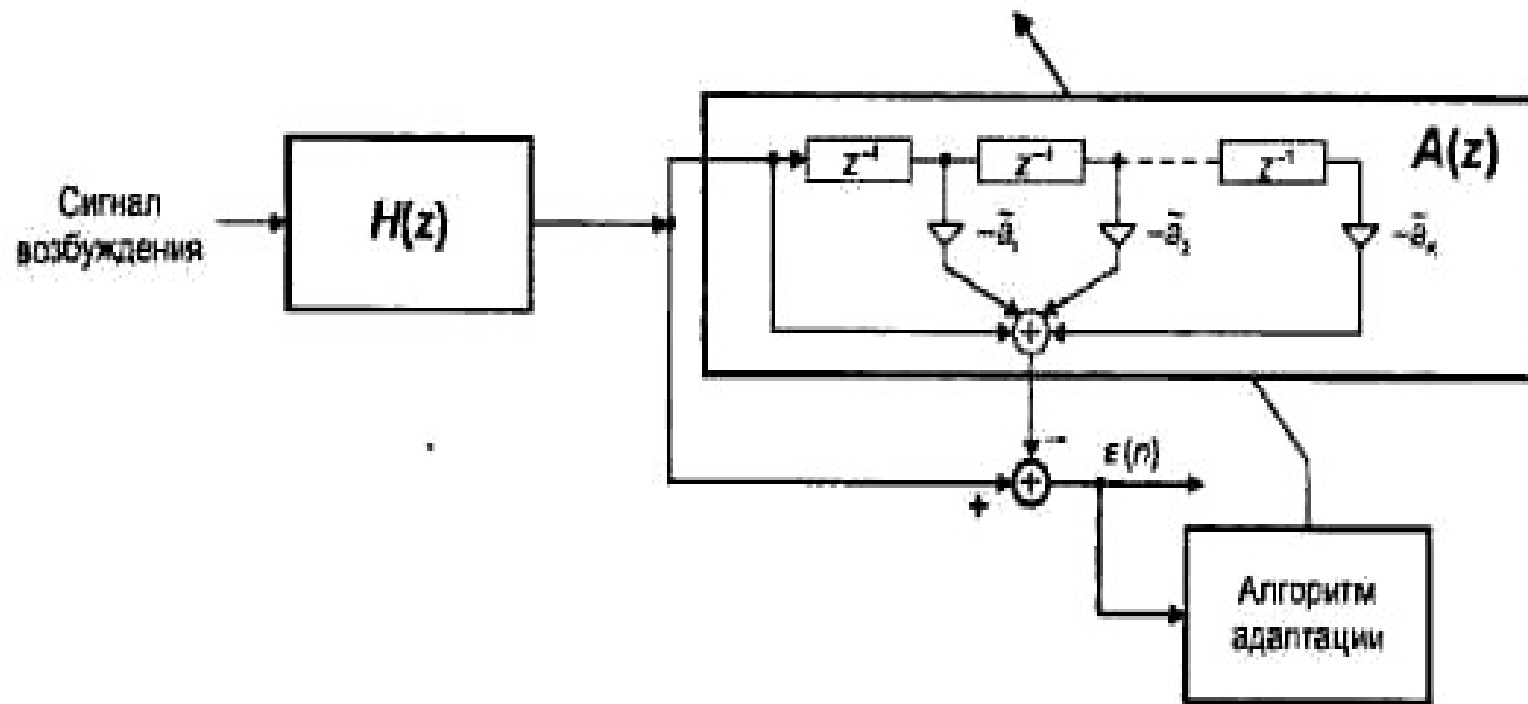


Рис.2

Лінійний прогноз

Послідовно з шуканою системою включають КІХ-фільтр з системною функцією виду:

$$A(z) = 1 - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k z^{-k},$$

коефіцієнти якої $\tilde{a}_k = a_k$

Загальна системна функція одержить вигляд:

$$H_{\text{общ}}(z) = \frac{b_0}{1 - \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}} \left(1 - \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k} \right) = b_0 = \text{const.}$$

Фільтр з передавальною функцією $A(z)$ називається фільтром лінійного прогнозу або *фільтром-провісником*.

Лінійний прогноз

Насправді коефіцієнти \tilde{a}_k відрізнятимуться від точних a_k , а відповідно значення сигналу $\tilde{y}(n)$, що передбачається, відрізнятиметься від точного сигналу $y(n)$ (при $n > 0$) на величину помилки прогнозу:

$$\epsilon(n) = y(n) - \tilde{y}(n) = y(n) - \sum_{k=1}^K \tilde{a}_k y(n-k),$$

яку називають *залишком*. Звідси неважко одержати передавальну функцію КІХ-фільтру лінійного прогнозу:

$$A(z) = 1 - \sum_{k=1}^K a_k z^{-k},$$

сигнал на виході якого є залишком $e(n)$.

Лінійний прогноз

Ці вирази показують, що системна функція шуканої системи :

$$H(z) = \frac{b_0}{A(z)},$$

з точністю до коефіцієнта b_0 є зворотною системною функцією (а відповідно і частотною характеристикою) фільтру-провісника.

Коефіцієнти лінійного прогнозу a_k обчислюються згідно критерію мінімуму середньоквадратичної помилки (СКП) прогнозу:

$$E = \sum_{n=1}^K \varepsilon^2(n) = \sum_{n=1}^K \left[y(n) - \sum_{k=1}^K a_k y(n-k) \right]^2.$$

Коефіцієнти a_k можна знайти, поклавши:

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0; \quad k = 1, \dots, K,$$

Лінійний прогноз

що приводить до системи з L рівнянь для визначення K коефіцієнтів:

$$\sum_l y(l)y(l-1) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K a_k y(l-k)y(l-1), \quad 1 \leq l \leq L, \quad 1 \leq k \leq K,$$

де L — кількість відліків на кадрі, яке може істотно перевершувати порядок прогнозу (наприклад, для стандарту LPC-10 $K = 10$, $L = 120$). Це означає, що в процесі обчислення шуканих коефіцієнтів необхідно на кожному кадрі мови вирішувати перевизначену систему рівнянь.

Перевизначені системи після ряду перетворень зводяться до симетричних систем рівнянь вигляду :

$$\sum_{k=1}^K a_k R_{lk} = R_{l0}, \quad \text{де коефіцієнт кореляції: } R_{lk} = \sum_{l=1}^L y(l-k)y(l)$$

Вокодери з лінійним прогнозом

Найважливішою областю застосування лінійного прогнозу є стиснення мовного сигналу з метою зниження швидкості передачі мови по каналах телекомунікації. Необхідність постановки такого завдання пояснюється наступним. Передача стандартного телефонного сигналу, обмеженого смугою (0,3—3,4) кГц, по цифрових каналах зв'язку при стандартній частоті дискретизації 8 кГц і нескладному АЦП з розрядністю 12 бітів вимагає швидкості передачі:

$$C = 12 \times 8000 = 96\,000 \text{ бит/с}$$

і, отже, в ідеальному випадку смуги пропускання каналу 48 кГц.

В той же час, бажано економніше використовувати частотний ресурс каналу. Цей приклад показує, що необхідно так перетворити інформацію, що міститься в мовному сигналі, щоб швидкість передачі скоротилася в 40 разів (!), тобто коефіцієнт стиснення повинен бути принаймні рівний 40. Ступінь усунення надмірності при передачі відбивається на якості відновлюваного (що синтезується) сигналу.

Вокодери з лінійним прогнозом

Пристрої кодування мови називаються *вокодерами* (від англ. *voice* — голос, *coder* — кодувальник). Для їх побудови використовуються властивості голосового тракту.

Основним елементом моделі голосового тракту (рис.3) є адаптивний фільтр з дискретно змінними в часі коефіцієнтами, фільтр підстроює свою частотну характеристику під спектр короткого відрізка передаваного мовного сигналу. Таким адаптивним фільтром є фільтр ЛП порядку K . Збудження подібного сигналу можливо основним тоном або шумом. Моделювання збудження здійснюється перебудовуванням генератором частот. Для моделювання сигналу збудження служить перебудовуваний генератор частот (генератор основного тону — частоти коливань голосових зв'язок) і спеціальний генератор білого шуму (генератор шуму).

Вокодери з лінійним прогнозом

Вокодер (рис.3) складається з двох частин: аналізатора і синтезатора.

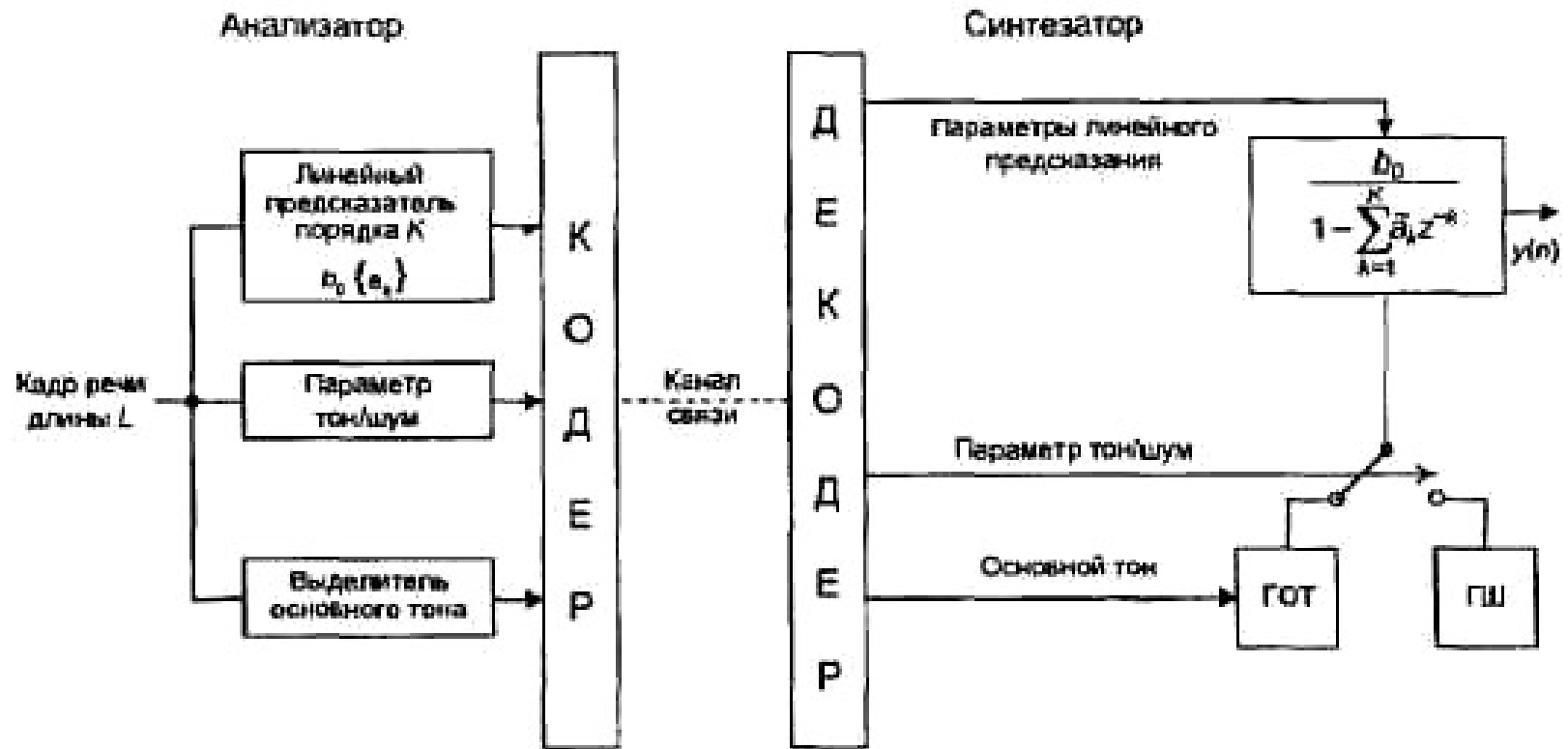


Рис.3

Вокодери з лінійним прогнозом

Аналізатор визначає параметри мови, синтезатор по прийнятих параметрах відновлює мову.

Аналізатор обробляє цифровий мовний сигнал *покадрово*. Кадри вирізуються один за одним за допомогою гладкої функції типу "вікна" (трикутного або Хеммінга). Тривалість одного кадру і кількість відліків мовного сигналу, що містяться в одному кадрі, визначається стандартом і знаходиться в межах від 15 мс до 30 мс. При частоті дискретизації 8 кГц в одному кадрі міститься від 120 до 240 відліків відповідно.

До параметрів мовного сигналу, що аналізується на кадрі, відносяться:

- параметри лінійного прогнозу (математично еквівалентні коефіцієнтам ЛП);
- тип збудження голосового тракту тон/шум;
- період основного тону і енергія сигналу збудження.

Вокодери з лінійним прогнозом

У синтезаторі відбувається зворотний процес: по параметрах лінійного прогнозу відновлюються коефіцієнти (звичайно, вони дещо відрізнятимуться від обчислених на передачі, але стійкість гарантується), формується полюсний фільтр, що збуджується або шумом від генератора шуму (якщо передавався глухий звук), або основним тоном від генератора основного тону (якщо передавався дзвінкий звук), що виробляє частоту в залежності від прийнятих параметрів.

Відомо декілька типів вокодерів, що відрізняються один від одного способами представлення параметрів мовного сигналу на кадри, бітовою швидкістю в каналі і, у зв'язку з цим, якістю сигналу, що синтезується на прийомі. Нижче дається коротка характеристика вокодерів згідно прийнятим міжнародним стандартам і рекомендаціям.

Вокодери з лінійним прогнозом

Стандарт LPC-10 (Linear Prediction Coder). У вокодерах цього типа використовується фільтр-провісник 10-го порядку на кадрах мови, тривалістю = 20 мс; коефіцієнти прогнозу яких передаються по каналу зв'язку. Вокодери даного типа забезпечують прийнятну (= 92%) словесну розбірливість; використовуються на швидкостях 1,2; 2,4 і 4,8 Кбіт/с.

Стандарт ITU-T G.723.1 — двошвидкісний вокодер для мультимедійних комунікацій, є частиною сімейства стандартів H.324. Вокодер працює на швидкостях 5,3 і 6,3 Кбіт/с. Застосовується лінійний прогноз LPC-10 з векторним квантуванням параметрів ЛП.

Крім власне рекомендації G.723.1 існує **Додаток А**, згідно якому в кодер додається класифікатор вхідного сигналу VAD (Voice Activity Detector, визначник активності голосу). Класифікатор з'ясовує, який сигнал присутній на вході: мова або пауза. Під час пауз швидкість передачі знижується з 6,3 (або 5,3) Кбіт/с до 1 Кбіт/с і менш.

Стандарт ITU-T G.728.1 — вокодер з векторним квантуванням сигналів збудження і параметрів лінійного прогнозу, призначений для роботи на швидкості 16 Кбіт/с. Вхідний сигнал (частота дискретизації 8 кГц) піддається компандуванню по А- або μ -закону. Для обчислення параметрів лінійного прогнозу служить провісник 50-го порядку, для обчислення коефіцієнтів посилення сигналу збудження використовуються лінійні провісники 10-го порядку.