

ЦИФРОВИЙ ДЕТЕКТОР ВУЗЬКОСМУГОВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

Михальова А.Г.

anastasiia.mykhalova@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., доц. Посошенко В. О.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС,
м. Харків, Україна

A digital method for narrowband filtering of ultrasonic signals is proposed to detect gas leaks in high-pressure pipelines. The approach utilizes complex variable functions to perform simultaneous filtering and determination of quadrature components of the signal envelope. By shifting the spectrum to the zero-frequency region, the method significantly reduces hardware complexity compared to traditional analog systems. It is demonstrated that the complex envelope can be calculated directly after low-pass filtering, which optimizes computational efficiency. This technique ensures high stability and precision in isolating signals from noise for industrial diagnostic applications.

Низка практичних задач вимагає використання вузькосмугової фільтрації корисних сигналів ультразвукового діапазону, замаскованих шумом. Прикладом подібної задачі є проблема оперативного виявлення факту витoku газів через мікротріщинки у трубах високого тиску. При цьому мікропотоки газу утворюють ультразвукові коливання на несійній частоті $f_0 = 78 \dots 80 \text{ кГц}$ з ефективною смугою частот $\Delta f = 50 \dots 80 \text{ кГц}$.

Зрозуміло, що вирішити цю задачу аналоговими методами практично неможливо через необхідність використовувати вибіркові системи з еквівалентною добротністю $Q_E \simeq 1000$ і високою стабільністю параметрів їх налаштування. Використання методу прямого перетворення також є сумнівним через необхідність забезпечення відносно високої стабільності частоти квадратурних складових опорного сигналу гетеродину, а також потребу значної апаратної підтримки алгоритму обробки.

Разом з тим можливо запропонувати суто цифровий спосіб вузькосмугової фільтрації суміші «сигнал + шум», при якому основні зусилля зосереджені на програмній частині при мінімальних апаратних затратах.

Покажемо, що використання властивостей функції комплексної змінної дозволяє здійснити сумісні цифрові операції вузькосмугової фільтрації і визначення значень квадратурних складових комплексної огинаючої відфільтрованого сигналу.

Сформуємо вихідний смуговий процес $s(t)$, який підлягає фільтрації, у вигляді послідовності вибірових значень $S[n \cdot T_B]$ з частотою вибірок $F_B = 2 \cdot (f_c + f_1)$, де f_c – центральна частота вихідного смугового процесу; f_1 – деяка захисна добавка до частоти f_c . Тобто $T_B = \frac{1}{F_B}$.

Застосуємо до відліків $S[n \cdot T_B]$ певну операцію прямого перетворення [1], результатом якої є формування поточних відліків добутків виду:

$$\xi[nT_B] = S[nT_B] \cdot \exp[j \cdot n \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot T_B] \quad (1)$$

Головний сенс перетворення (1) полягає у «пересуванні» спектральних складових спектру $W_s(\omega)$ вихідного сигналу $s(t)$, що розташовані поблизу частоти $(-f_c)$ (які є комплексно спряженими стосовно складових біля частоти $(+f_c)$) в область нульових частот. При цьому спектральні складові $W_s(\omega)$, розташовані поблизу частоти $+f_c$, «пересуваються» в область частоти $(-2f_1)$. Таким чином, отримуємо коливання $\xi[nT_B]$ з несиметричним спектром $W_\xi(\omega)$.

Після цього потрібно надіслати послідовність $\xi[nT_B]$ на фільтр нижніх частот (ФНЧ) з частотою зрізу $f_{зр.} = \frac{\Delta f}{2}$, де Δf – потрібна смуга частот корисних коливань після вузькосмугової фільтрації в районі частоти $(-f_c)$.

В результаті на виході ФНЧ буде сформована послідовність $g[nT_B]$, яка визначається спектральними складовими вихідного спектру $W_s(\omega)$, які зосереджено в області частоти $(-f_c)$. Сигнал $g[nT_B]$ в загальному випадку є комплексним з відповідними косінусними і синусними складовими через несиметричність спектру $W_\xi(\omega)$:

$$g[nT_B] = g_c[nT_B] + j \cdot g_s[nT_B] \quad (2)$$

Застосуємо до послідовності $g[nT_B]$ операцію зворотного перетворення, яка полягає у здійсненні поточної операції добутку відліків $g[nT_B]$ на комплексну експоненту $\exp[-j \cdot n \cdot \omega_c \cdot T_B]$:

$$Y[nT_B] = g[nT_B] \cdot \exp[-j \cdot n \cdot \omega_c \cdot T_B] \quad (3)$$

Сигнал

$$Y[nT_B] = Y_c[nT_B] + j \cdot Y_s[nT_B],$$

де

$$\begin{aligned} Y_s[nT_B] &= g_s[nT_B] \cdot \cos[n \cdot \omega_c \cdot T_B] - g_c[nT_B] \cdot \sin[n \cdot \omega_c \cdot T_B] \\ Y_c[nT_B] &= g_c[nT_B] \cdot \cos[n \cdot \omega_c \cdot T_B] - g_s[nT_B] \cdot \sin[n \cdot \omega_c \cdot T_B] \end{aligned} \quad (4)$$

В результаті операції зворотного перетворення відфільтрована ділянка спектру $W_s[\omega]$ з корисними коливаннями у смузі Δf зсувається з області нульових частот в область частоти $(-f_c)$. Таким чином, досягається асиметрична вузькосмугова фільтрація довільного смугового процесу $S(t)$ з центральною частотою f_c . Причому реалізується умова $f_c \gg \Delta f$, яку важко забезпечити засобами аналогової схемотехніки.

Для розглянутих операцій симетрична смугова фільтрація реалізується шляхом простого вилучення дійсної (косінусної) частини сигналу $Y[nT_B]$. Тобто сигналу $Y_c[nT_B]$ відповідає симетричний спектр дійсного вузькосмугового процесу в смузі Δf з центральною частотою f_c .

Для задачі виявлення факту витoku газу через мікротріщинки достатньо отримати значення комплексної огибаючої $A[nT_B]$ вузькосмугового процесу $Y[nT_B]$. Послідовності $Y_c[nT_B]$ та $Y_s[nT_B]$ можна розглядати як вибірки сигналів, які є спряженими за Гільбертом. Тому квадрат огибаючої

$A^2[nT_B]$ вузькосмугового процесу в смузі частот Δf з центральною частотою f_c можна визначити таким чином:

$$A^2[nT_B] = Y_c^2[nT_B] + Y_s^2[nT_B] \quad (5)$$

При апаратній реалізації алгоритму відшукування оцінок $A^2[nT_B]$ немає необхідності здійснювати операцію зворотного перетворення. Дійсно, якщо у вираз (5) підставити значення для $Y_c[nT_B]$ та $Y_s[nT_B]$ з виразів (4), отримаємо:

$$A^2[nT_B] = g_c^2[nT_B] + g_s^2[nT_B].$$

Таким чином, вузькосмугову фільтрацію енергії смугового процесу $S(t)$ можна завершувати на етапі обробки ФНЧ послідовностей $\xi_c[nT_B]$, $\xi_s[nT_B]$. Період дискретизації T_d вихідних сигналів ФНЧ визначається смугою Δf . Тому $T_d \gg T_B$. Остання умова дозволяє використання в якості ФНЧ багатосекційний цифровий фільтр.

Список використаних джерел:

1. Посошенко В.А. Дискретний фільтр обвідної вузько смугового процесу // Радіотехніка: вид-во ХДУ, 1989 р.. – Вип.93. - С.7-10