УДК 621.317.757

В. А. ПОСОШЕНКО

ДИСКРЕТНЫЙ ФИЛЬТР ЭНЕРГИИ УЗКОПОЛОСНОГО ПРОЦЕССА

Ряд задач локации метеорных следов требуют додетекторного оценивания приведенной энергии E отраженных сигналов на интервале наблюдения ($t1$; $t2$). Это можно сделать, если осуществить узкополосную фильтрацию входных колебаний $S(t)$, а затем просуммировать квадраты выборочных значений $A^2(n \cdot T_1)$ огибающей $A(t)$ узкополосного процесса $X(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t + \theta(t))$, т. е.

$$E = \sum_{n=1}^{N1} A^2(n \cdot T_1), \tag{1}$$

где T_1 — интервал дискретизации, определяемый полосой Δf узкополосного фильтра, f_c — центральная частота исходного широкополосного процесса $S(t)$; $\theta(t)$ — случайный сдвиг фазы, $N_1 = |(t2 - t1)/T_1|$ — количество выборок огибающей $A(t)$.

Такой подход, в отличие от суммирования квадратов выборочных значений $S^2(n \cdot T_2)$ процесса $S(t)$ позволяет значительно сократить объем необходимых вычислений и улучшить соотношение (сигнал-шум) при наличии полезного сигнала на интервале $(t1, t2)$.

Здесь T_2 — интервал дискретизации, определяемый полосой частот исходного процесса $S(t)$, причем $T_2 \ll T_1$.

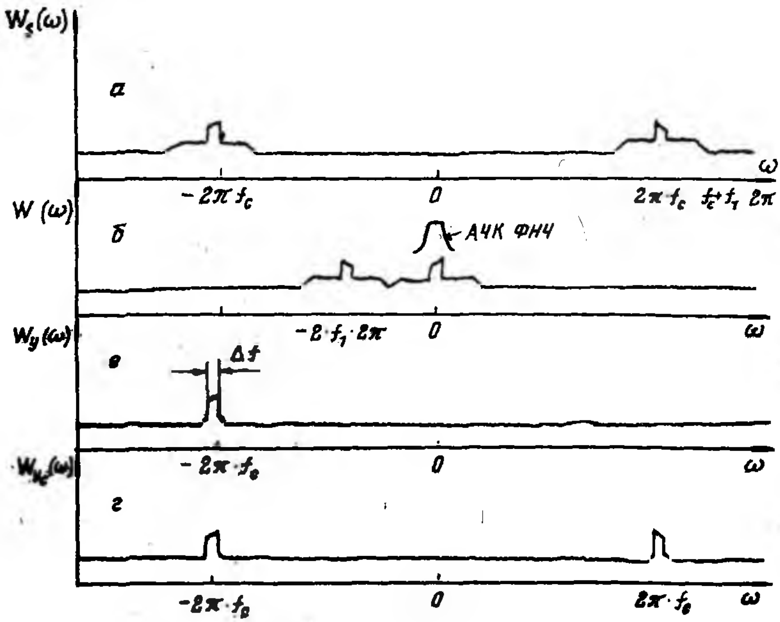
Поэтому можно говорить о задаче фильтрации энергии в узкой полосе частот Δf широкополосного процесса $S(t)$.

Покажем, что использование свойств функций комплексной переменной позволяет совместить дискретные операции узкополосной фильтрации и определения значений квадратов огибающей отфильтрованного сигнала. Проведем дискретизацию с частотой $F_\partial = 2(f_c + f_1)$ исходного полосового процесса $S(t)$, где f_1 — некоторая добавка к частоте дискретизации, определяемой в соответствии с теоремой отчетов. Соответственно $T_\partial = 1/F_\partial$.

Рассмотрим операцию предобработки*, которая заключается в домножении каждой n-й дискреты $S(n \cdot T_\partial)$ на дискретную комплексную экспоненту $\exp(j \cdot n \cdot 2\pi \cdot f_c \cdot T_\partial)$,

$$\xi(n \cdot T_\partial) = S(n \cdot T_\partial) \cdot \exp(j \cdot n \cdot \omega_c \cdot T_\partial). \tag{2}$$

На рисунке (позиции *а, б*) показаны условный спектр $W_s(\omega)$ исходного процесса $S(t)$ и спектр $W_\xi(\omega)$ комплексного сигнала



* *Ахмед Н., Уэбстер А., Амстронг Б.* Об одном классе полосовых и режекторных фильтров Баттерворта//Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1987. Т. 75. № 11. С. 115—117.

$\xi(n \cdot T_\partial)$ соответственно. Как видно, основной смысл операции (2) заключается в перемещении спектральных составляющих $S(t)$, близких к $-f_c$, в область нулевых частот. При этом участок исходного спектра $W_s(\omega)$, примыкающий к f_c, перемещается в область частоты $-2 \cdot f_1$.

Подадим последовательность $\xi(n \cdot T_\partial)$ на фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза $f_{cp} = \Delta f/2$. Тогда на выходе ФНЧ будет сформирована последовательность $g(n \cdot T_\partial)$, определяемая спектральными составляющими $W_s(\omega)$, взятыми в узкой полосе частот Δf в области частоты $-f_c$. Сигнал $g(n \cdot T_\partial)$ в общем случае — комплексный за счет несимметричности исходного спектра $W_s(\omega)$ относительно частоты $-f_c$:

$$g(n \cdot T_\partial) = g_c(n \cdot T_\partial) + j \cdot g_s(n \cdot T_\partial). \tag{3}$$

Применим к последовательности $g(n \cdot T_\partial)$ операцию постобработки*, которая заключается в умножении дискретов $g(n \cdot T_g)$, на комплексную экспоненту $\exp(-j \cdot n \cdot \omega_c \cdot T_\partial)$:

$$Y(n \cdot T_\partial) = g(n \cdot T_\partial) \cdot \exp(-j \cdot n \cdot \omega_c \cdot T_\partial). \tag{4}$$

Сигнал $Y(n \cdot T_\partial)$ — комплексный, $Y(n \cdot T_\partial) = Y_c(n \cdot T_\partial) + j \cdot Y_s(n \cdot T_\partial)$, где

$$Y_s(n \cdot T_\partial) = g_s(n \cdot T_\partial) \cdot \cos(n \cdot \omega_c \cdot T_\partial) - g_c(n \cdot T_\partial) \cdot \sin(n\omega_c \cdot T_\partial);$$

$$Y_c(n \cdot T_\partial) = g_c(n \cdot T_\partial) \cdot \cos(n \cdot \omega_c \cdot T_\partial) + g_s(n \cdot T_\partial) \cdot \sin(n \cdot \omega_c \cdot T_\partial). \tag{5}$$

В результате операции постобработки отфильтрованный участок спектра $W_s(\omega)$ полосой Δf перемещается из области нулевых частот в область частоты $-f_c$ (рисунок, позиция *в*). Таким образом, достигается асимметричная узкополосная фильтрация произвольного полосового процесса $S(t)$. Причем реализуется условие $f_c \gg \Delta f$, которое сложно обеспечить средствами аналоговой схемотехники.

Для рассмотренных операций симметричная полосовая фильтрация реализуется простой операцией взятия действительной части от последовательности $Y(n \cdot T_\partial)^*$, т. е. сигналу $Y_c(n \cdot T_\partial)$ соответствует спектр, показанный на рисунке, *г*.

Последовательности $Y_c(n \cdot T_\partial)$, $Y_s(n \cdot T_\partial)$ можно рассматривать как выборочные значения сигналов, сопряженных по Гильберту. Следовательно, квадрат огибающей $A^2(n \cdot T_\partial)$ узкополосного процесса в полосе частот Δf с центральной частотой f_c можно определить так:

$$A^2(n \cdot T_\partial) = Y_c^2(n \cdot T_\partial) + Y_s^2(n \cdot T_\partial). \tag{6}$$

При аппаратурной реализации процедуры отыскания оценок $A^2(n \cdot T_\partial)$ нет необходимости производить операцию постобработки. Действительно, подставляя в (6) значения для $Y_c(n \cdot T_\partial)$ и $Y_s(n \cdot T_\partial)$, взятые из (5), получим

$$A^2(n \cdot T_\partial) = g_c^2(n \cdot T_\partial) + g_s^2(n \cdot T_\partial). \tag{7}$$

Таким образом, фильтрацию энергии произвольного полосового процесса $S(t)$ можно заканчивать на этапе обработки фильтром нижних частот последовательностей

$$\xi_c(n \cdot T_\partial) = S(n \cdot T_\partial) \cdot \cos(n \cdot \omega_c \cdot T_\partial);$$

$$\xi_s(n \cdot T_\partial) = S(n \cdot T_\partial) \cdot \sin(n \cdot \omega_c \cdot T_\partial)$$

и суммирования квадратов выборочных значений сигналов ФНЧ.

Период дискретизации T_1 выходных сигналов ФНЧ определяется полосой Δf. Поэтому $T_1 \gg T_2$. Последнее условие позволяет использовать в качестве ФНЧ либо многосекционный цифровой фильтр, либо аналоговый фильтр высокого порядка, нагруженный на АЦП низкого или среднего быстродействия

Поступила в редколлегию 7.03.89