

К.т.н. М.В. Лапшин, к.т.н. Л.И. Лушпин  
**Процессор первичной цифровой обработки радиолокационных сигналов**  
M.V.Lapshin, L.I.Lushpin  
**Primary processor for digital processing of radar signals**

Ключевые слова: ПРОЦЕССОР, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА, РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ  
Keywords: PROCESSOR, DIGITAL SIGNAL PROCESSING, PRIMARY PROCESSING, RADAR SIGNALS

В статье описывается принцип реализации в ОАО «НИИВК им. М.А.Карцева» процессора первичной обработки радиолокационных сигналов на основе модуля ADP201cP5 российской фирмы «Инструментальные системы» [1], выполненного в конструктиве CompactPCI 6U. Модуль содержит пять процессоров ADSP-TS201 фирмы Analog Device и две ПЛИС серии Virtex 4 и одну ПЛИС серии Spartan 3 фирмы Xilinx. На модуль устанавливается submodule, содержащий 4-канальный АЦП.

Процессор является 4-канальным устройством, содержащим основной канал суммарного сигнала и три дополнительных канала. В функциональном отношении эти каналы идентичны и отличаются лишь рядом параметров. В отличие от суммарного канала дополнительные каналы имеют один подканал дальности, что требует выполнения Фурье-анализа только для одного канала дальности. Кроме того, значения функций табличного гетеродина, а также выборки весовой функции являются одинаковыми для всех каналов без исключения. Процессор реализован в двух ПЛИС XC4VLX60-10FF668 серии Virtex 4.

Третья ПЛИС серии Spartan 3 решает задачи интерфейса между процессорами ADSP-TS201 модуля и внешними устройствами.

Процессор предназначен для решения следующих задач:

- Приёма оцифрованных в АЦП отсчётных значений (выборок) действительного сигнала;
- Цифровой полосовой фильтрации сигнала;
- Синтеза квадратурной составляющей сигнала;
- Преобразования частоты комплексного сигнала путём умножения на опорное колебание, считываемое из хранимой в памяти ПЛИС таблицы;
- Распределения отсчётов сигнала по каналам дальности;
- Весовой временной обработки сигналов в каналах дальности;

- Расчёта комплексных спектров сигнала в каждом канале дальности;
- Выдачи амплитудных и комплексных спектров для дальнейшей обработки.

Укрупнённая структурная схема предварительной обработки сигналов показана на рисунке 1.

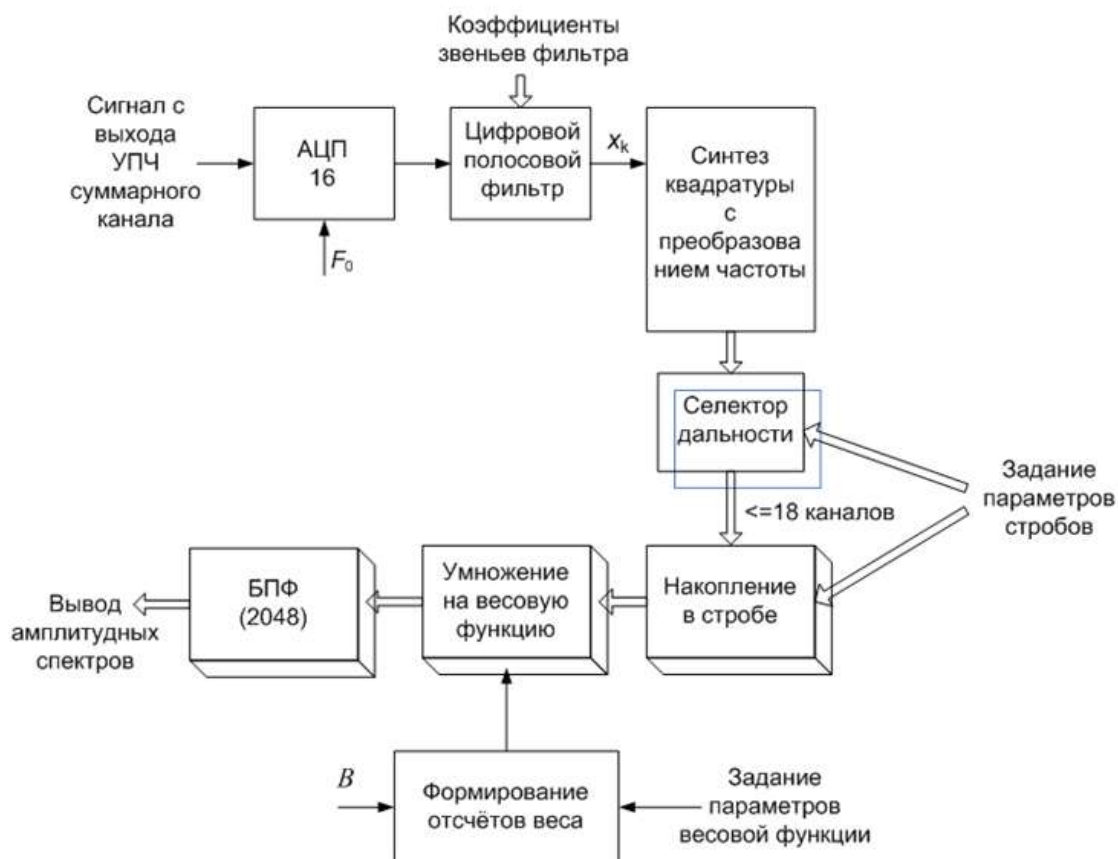


Рисунок 1. Структурная схема предварительной обработки сигналов.

В состав схемы входят:

1. **Аналого-цифровой преобразователь** (АЦП), разрядность которого равна 14, частота дискретизации сигналов постоянна и равна  $F_1$ ; сигнал на вход АЦП подаётся на промежуточной частоте  $F_2$ ; оцифрованный сигнал оказывается преобразованным на разностную частоту, равную  $F_1 - F_2 = F_3$ .
2. **Цифровой полосовой фильтр** (ЦПФ) 12-го порядка; он выполнен в виде 6 параллельно включенных рекурсивных звеньев второго порядка и обводящего звена; коэффициенты ЦПФ остаются неизменными в процессе работы процессора и не зависят от режима работы.

Цифровая фильтрация осуществляется непрерывно в течение всей длительности пачки импульсов. Перед началом обработки очередной пачки все регистры звеньев ЦПФ обнуляются.

3. **Синтезатор квадратурной составляющей сигнала**; алгоритм синтеза заключается в формировании текущего выборочного значения квадратурной составляющей в соответствии с выражением

$$y_k = -x_{k+1}, \quad (1)$$

где  $x_k$  – отсчёты сигнала на выходе ЦПФ.

4. **Преобразователь частоты**, назначение которого состоит в перенесении сигнала с первой цифровой промежуточной частоты F3 на нулевую промежуточную частоту (видеочастоту); эта операция реализуется путём умножения комплексных отсчётов сигнала на комплексно-сопряжённые отсчёты табличного генератора, в котором хранятся значения синусной и косинусной составляющих:

$$(x_k + jy_k) \cdot (u_k - jv_k) = +x_k \cdot u_k + y_k \cdot v_k + +j(y_k \cdot u_k - x_k \cdot v_k). \quad (2)$$

Отметим особенность преобразования частоты сигнала. Так как номинальное значение первой цифровой частоты сигнала равно F3, а частота дискретизации составляет F1, то вещественная  $u_k$  (косинусная) и мнимая  $v_k$  (синусная) составляющие содержат всего по 4 отсчётных значения: +1; 0; -1; 0 и 0; +1; 0; -1 соответственно.

Преобразование частоты осуществляется непрерывно в течение всей импульсной пачки. В качестве начальных значений принимаются первые табличные значения –  $u_0 = 1$  и  $v_0 = 0$ . При обработке очередной пачки восстанавливаются начальные условия.

5. **Селектор дальности**, алгоритм которого даёт возможность распределить отсчётные значения входных сигналов по нескольким каналам дальности; Стробы дальности могут быть расположены в течение каждого периода повторения импульсов фиксированным образом в режиме обнаружения и подвижным образом в режиме сопровождения. Условно последовательность стробов можно подразделить на два ряда, причём второй ряд смещён в сторону запаздывания на определённое количество тактов. Обычно задержка

составляет половину длительности строба. Способ размещения стробов и значения их параметров задаются в соответствующих полях Формуляра. Следует иметь в виду, что такты внутри периода, совпадающие во времени с очередным излучаемым импульсом и в течение следующих за ним нескольких тактовых интервалов, являются тактами бланка, поэтому в этих временных интервалах отсчёты входного воздействия игнорируются. Правая граница тактов бланка в начале периода задаётся в Формуляре. Аналогичным образом в конце периода также имеются такты бланка, и положение первого из них задаётся в Формуляре. Данные о длительности стробов, количестве каналов дальности в верхнем и нижнем рядах передаются в процессор с помощью Формуляра.

6. **Формирователь сигналов каналов дальности** осуществляет суммирование задаваемого в Формуляре количества отсчётов сигнала в каждом из стробов. Результаты накопления в стробах дальности, относящихся к различным периодам пачки импульсов, составляют последовательность квадратурных отсчётов сигнала, подлежащих весовой обработке и спектральному анализу.
7. **Формирование весовой временной функции** происходит в соответствии со следующей системой разностных уравнений:

$$\begin{aligned}\sin(\varphi_0 + \Phi) &= \sin(\varphi_0) \cos(\Phi) + \cos(\varphi_0) \sin(\Phi) \\ \cos(\varphi_0 + \Phi) &= \cos(\varphi_0) \cos(\Phi) - \sin(\varphi_0) \sin(\Phi).\end{aligned}\quad (3)$$

Введём следующие обозначения:

$$\sin(\varphi_0) \equiv x_k, \cos(\varphi_0) \equiv y_k, \cos(\Phi) \equiv C, \sin(\Phi) \equiv S \quad (4)$$

тогда получим

$$\begin{aligned}x_k &= x_{k-1} \cdot C + y_{k-1} \cdot S, \\ y_k &= y_{k-1} \cdot C - x_{k-1} \cdot S.\end{aligned}\quad (5)$$

Отсчётные значения весовой функции  $w_k$  выражаются через функцию  $x_k$  путём возведения её в соответствующую степень  $K_w$  (обычно используется 2 или 3 степень), т.е.

$$w_k = x_k^{K_w} . \quad (6)$$

Начальные значения указанных функций задаются в виде

$$x_0 = 0, y_0 = 1, 0; C = \cos\left(\frac{\pi}{M_A}\right), S = \sin\left(\frac{\pi}{M_A}\right), \quad (7)$$

где  $M_A$  – количество обрабатываемых периодов пачки.

8. **Умножитель на временную весовую функцию** квадратурных составляющих каждого из каналов дальности, формируемую в процессе обработки пачки импульсов. Далее массив сигналов в каждом канале дальности дополняется нулевыми отсчётами до полного объёма преобразования Фурье (2048).
9. **Программный спектроанализатор** (узел БПФ на рисунке 1), на выходе которого формируются комплексные спектры сигналов всех каналов дальности в результате применения одной из процедур быстрого преобразования Фурье (БПФ); для каналов дальности, образующих матричный отклик, рассчитываются амплитудные спектры.

При выдаче из процессора данные имеют представление с плавающей точкой в соответствии со стандартом IEEE754. Отсчет квадрата модуля спектра представляется одним словом в стандарте IEEE754. Комплексный спектральный отсчет состоит из двух слов, каждое из них представлено в стандарте IEEE754, одно соответствует действительной составляющей, другое – мнимой.

Управление процессором первичной обработки сигналов осуществляется с помощью Формуляра, содержащем информацию, в соответствии с которой происходит конфигурирование структуры обработки в зависимости от режима работы РЛС – обнаружение, сопровождение, пассивный режим, а также в режиме калибровки каналов по пилот-сигналу. Сначала задаётся режим работы процессора. Далее активизируются структуры, отвечающие за работу канала суммарного сигнала в режимах обнаружения и сопровождения и трёх дальномерных каналов, являющихся составной частью дискриминатора задержки системы автоматического сопровождения по дальности. Кроме того, в режиме сопровождения начинают функционировать два канала разностных угломерных сигналов. Последние имеют только один канал дальности. В пассивном

режиме в канале суммарного сигнала образуется только один канал дальности, так же, как и в каналах разностных сигналов.

Наряду с информацией о режиме работы задаются значения параметров всей структуры обработки сигналов. К их числу относятся:

- период повторения импульсов пачки;
- количество пропускаемых при обработке периодов;
- количество обрабатываемых периодов;
- количество каналов дальности;
- задержки и длительности стробов дальности во всех каналах процессора;
- параметры весовой функции;
- постоянная, нормирующая уровень шума;
- параметры фрагментации спектров сигналов всех каналов.

#### Заключение

Внешний вид модуля без submodule представлен на рисунке 2.



Рисунок 2. Внешний вид модуля ADP201cP5

Процессор цифровой обработки сигналов, разработанный в ОАО «НИИВК им. М.А.Карцева», является первой и одной из важнейших ступеней обработки радиолокационной информации в новейших современных РЛС.

#### Литература.

1. <http://www.insys.ru> – ЗАО «Инструментальные системы».