004.21/681.12

Семенов Н.Ю., аспирант кафедры КСУП
(ТУСУР, г. Томск)
Semenov N.Yu., postgraduate at the Department of KSUP
(TUSUR, Tomsk)

ФОРМАТЫ СИГНАЛОВ НА ВХОДАХ И ВЫХОДАХ ЭТАПОВ ЦОС В УЗР

SIGNAL FORMATS AT THE INPUTS AND OUTPUTS OF DSP STAGES IN ULTRASONIC FLOWMETERS

Аннотация: Рассматривается проблема построения адаптивного конвейера цифровой обработки сигналов в ультразвуковых времяпролетных расходомерах. Предложена четырехэтапная модель преобразования акустического сигнала, в которой границы этапов определяются форматом выходных данных. Показана роль метаданных и трех контрольных точек в обеспечении метрологической надежности измерений при работе в широком классе эксплуатационных условий.

Abstract: This paper addresses the problem of developing an adaptive digital signal processing pipeline for ultrasonic time-of-flight flowmeters. We propose a four-stage model of acoustic signal transformation, in which the output data format determines the boundaries between stages. The study also demonstrates the role of metadata and three control points in ensuring the metrological reliability of measurements under a wide range of operating conditions.

Применение времяпролетных ультразвуковых расходомеров (УЗР) в промышленных условиях сопряжено с необходимостью обработки акустических сигналов при воздействии большого количества внешних факторов [1-3], к которым следует отнести перепады температуры и давления, турбулентность, аэрацию, низкую (менее 0,5 м/с) скорость потока, наличие примесей, отложения на стенках трубы и др. Условия работы УЗР варьируются в широком диапазоне: от идеальных (чистая жидкость) до сложных (аэрированные и загрязненные среды, высокий уровень помех). Получение достоверных результатов измерений расхода во всем диапазоне условий эксплуатации УЗР требует использования гибкого конвейера цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Основная сложность проектирования подобного конвейера заключается в выборе его архитектуры. Жестко фиксированная последовательность алгоритмов, используемых в ЦОС УЗР, не способна

адаптироваться к изменению условий эксплуатации. При использовании произвольных комбинаций алгоритмов ЦОС число возможных конфигураций огромно, что приводит к невозможности оценить метрологическую точность каждой конфигурации и УЗР будет выдавать измерения без гарантии достоверности.

Таким образом, архитектура конвейера должна сохранять инвариантную топологию и обеспечивать адаптивность за счет выбора последовательности алгоритмов ЦОС из ограниченного проверенного набора. Инвариантная топология предполагает наличие для всех условий эксплуатации УЗР одинакового количества этапов, на каждом из которых акустический сигнал претерпевает определенные изменения. Каждый этап определяется форматом входных и выходных данных. Рассмотрим блоки конвейера ЦОС в порядке прохождения сигнала (рисунок 1).

Исходный сигнал, поступающий с аналого-цифрового преобразователя (АЦП), проходит через блок базовой цифровой обработки. Алгоритмы данного блока – удаление постоянной составляющей (DC-смещения), автоматическая регулировка усиления (АРУ) и базовая синхронизация – вынесены за рамки четырехэтапной архитектуры. Они не изменяют физический формат сигнала и выполняют функцию общей предобработки для всех условий эксплуатации УЗР. Выходом блока цифровой обработки является нормализованный высокочастотный (ВЧ) сигнал, поступающий на этап А конвейера ЦОС.

Этап А решает задачу очистки сигнала от помех и повышения отношения сигнал/шум. В зависимости от текущих условий классификатор $КТ_0$ выбирает один из N заданных алгоритмов – от полосовых фильтров Баттерворта для стабильного потока до когерентного накопления и вейвлет-фильтрации для сред с высоким уровнем помех. При этом все алгоритмы этапа А подчиняются единому требованию к формату выходных данных – результатом является очищенный ВЧ-сигнал с сохраненной несущей частотой.

Этап В переносит сигнал в базовую полосу, формируя либо комплексную огибающую (содержит амплитуду и фазовую информацию несущей), либо амплитудную огибающую. Фазовая составляющая сохраняется в алгоритмах на основе преобразования Гильберта, в корреляционном анализе при условии вычисления корреляции с эталоном в комплексной форме. Амплитудную огибающую формирует амплитудный детектор. Дополнительно на данном этапе формируются метаданные, содержащие информацию о форме огибающей (амплитуда, симметрия, ширина).

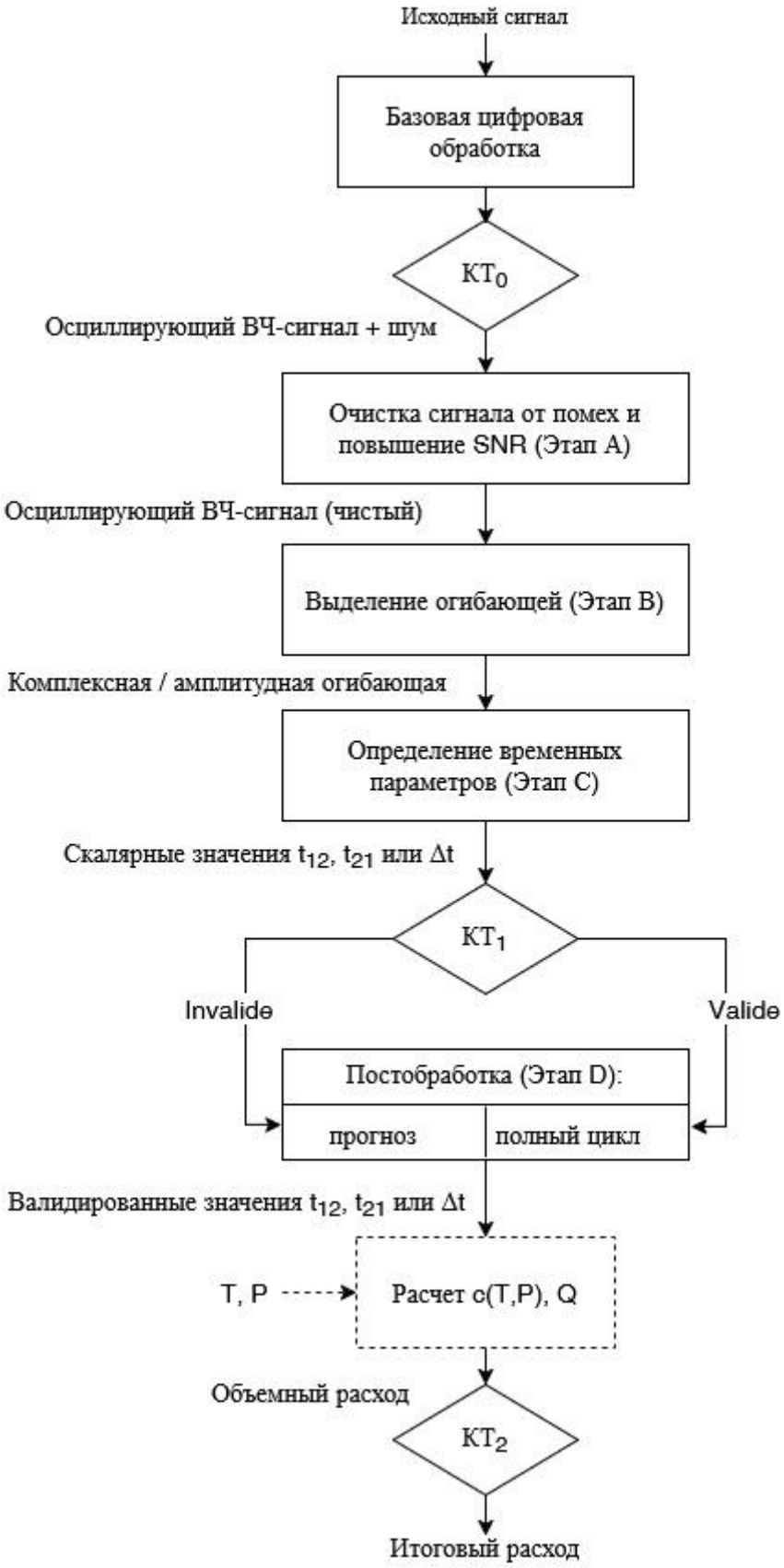

Рисунок 1 – Архитектура конвейера ЦОС

Этап C выполняет извлечение абсолютного времени пролета по потоку t_{12}, против потока t_{21} или разность времен пролета Δt из комплексной/амплитудной огибающей. На данном этапе формируются метаданные о качестве детектирования (высота пика огибающей или корреляционной функции, крутизна фронта в точке срабатывания, оценка уверенности интерполяции).

Этап D завершает обработку, выдавая финальное валидированное значение времени пролета или последовательность значений времен пролета (некоторые алгоритмы данного этапа работают с потоком/пакетом измерений, а не с одиночным отсчетом). В отличие от предыдущих этапов, этап D работает не с формой сигнала, а с потоком результатов измерений. Задача этапа – превратить последовательность одиночных оценок t_{12}, t_{21} или Δt, прошедших $КТ_1$, в надежный выходной поток: подавить остаточные выбросы, сгладить оценку, сохранить непрерывность выходного потока при временной потере акустического сигнала.

В архитектуру конвейера ЦОС добавлены три контрольные точки ($КТ_0$, $КТ_1$, $КТ_2$), которые предназначены для маршрутизации и валидации потока измерений.

Первая контрольная точка ($КТ_0$) находится перед этапом A. В $КТ_0$ проводится анализ характеристик исходного сигнала (отношение сигнал/шум, форма огибающей и др.) и на его основании определяется класс, к которому относятся текущие условия эксплуатации. Для каждого класса условий эксплуатации определены алгоритмические конвейеры ЦОС, различающиеся вычислительной сложностью и устойчивостью к определенным внешним воздействиям. $КТ_0$ переключает систему на нужный конвейер цифровой обработки.

Между этапами C и D располагается $КТ_1$, предназначенная для отсечения недостоверных измерений t_{12}, t_{21} или Δt. $КТ_1$ анализирует метаданные, накопленные на предыдущих этапах: отношение сигнал/шум, симметрию импульса, крутизну фронта, отношение главного пика к побочным. $КТ_1$ выдает два результата – индекс качества сигнала и бинарный флаг валидности измерения (Valide/Invalide на рис. 1). Индекс качества сигнала используется рекурсивными фильтрами (в частности, фильтром Калмана) для адаптивной подстройки коэффициента усиления на этапе D. Бинарный флаг валидности измерения предотвращает обновление состояния фильтра этапа D при получении данных с критически низким качеством.

Вторая контрольная точка ($КТ_2$) размещается после вычисления объемного расхода. В $КТ_2$ проверяется корректность итогового физического результата: не выходит ли измеренное значение расхода за допустимые физические пределы, логично ли измеренное значение в сравнении с предыдущим.

Следует заметить, что некоторые алгоритмы способны выполнять действия, которые в представленной архитектуре разделены на несколько этапов. Например, вейвлет-преобразование или согласованная фильтрация могут подавлять шум (этап А) и выделять огибающую (этап В). В данной архитектуре объединение этапов не предусмотрено: выходные данные каждого алгоритма усекаются до стандартного формата, определенного для конкретного этапа. Получается, что любой алгоритм этапа А используется только для подавления шума (хотя для некоторых алгоритмов технически возможно выполнить действия следующего этапа – извлечь огибающую), любой алгоритм этапа В – только для выделения огибающей и т.д.

Аналогично, существуют алгоритмы, которые могут принимать на вход сигнал не предыдущего, а более раннего этапа. Например, алгоритм сопоставления шаблонов этапа С ищет совпадения сигнала с заданным эталоном. Данный алгоритм мог бы взять «сырой» осциллирующий ВЧ-сигнал с выхода этапа А, и, минуя этап В, сравнить его с эталоном. В данной архитектуре это также невозможно: каждый этап принимает данные только в том формате, который установлен в качестве выходного для предыдущего этапа.

Таким образом, строгое соблюдение форматов на входе и выходе каждого этапа обеспечивает единообразие интерфейсов и позволяет гибко комбинировать алгоритмы в пределах заранее определенного перечня конфигураций, каждая из которых имеет подтвержденные значения погрешности.

Дальнейшая работа предполагает создание банка алгоритмов каждого этапа, формирование из них алгоритмических конвейеров для всех диапазонов условий эксплуатации УЗР, экспериментальную валидацию полученных конфигураций на эталонном стенде.

Список литературы

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов : учебник для вузов. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
2. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. – 3-е изд. – Москва : Техносфера, 2012. – 1048 с.
3. Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1985. – 312 с.