

УДК 004.032.2

**МЕТОДЫ АНАЛОГОВОЙ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРАХ**

Семенов Н.Ю., аспирант гр. 233-2024, II курс,
Симонов А.В., аспирант гр. 233-2025, I курс,
Научный руководитель: Карелин А.Е., к.т.н., доцент кафедры КСУП
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники
Россия, г. Томск

Обработка сигналов во время-пролётных ультразвуковых расходомерах включает несколько последовательных этапов: аналоговую и цифровую предобработку принятого сигнала, определение времени пролёта, валидацию полученных результатов и отбраковку недостоверных измерений [1].

Каждый из этих этапов реализуется с помощью различных альтернативных методов, которые существенно различаются по вычислительной сложности, достигаемой точности, устойчивости к помехам и адаптивности к изменяющимся условиям.

Выбор конкретных методов и их комбинаций представляет собой итеративный процесс поиска компромиссов, определяемый набором системных требований и ограничений. Среди ключевых факторов, влияющих на этот выбор, выделяются:

- требуемая метрологическая точность и повторяемость измерений;
- необходимый динамический диапазон измеряемых скоростей потока;
- допустимая стоимость аппаратной реализации устройства;
- характеристики измеряемой среды (жидкость/газ, чистота среды, наличие пузырьков или взвешенных частиц, температура и давление);
- ограничения по энергопотреблению;
- требуемая скорость обновления показаний расхода.

Методы предобработки сигнала реализуются в следующей последовательности – сначала аналоговая предобработка, затем – цифровая.

Аналоговая предобработка выполняется сразу после приёма очень слабого акустического импульса пьезопреобразователями. Реальный принятый сигнал крайне слабый, зашумлённый и искажённый, а измеряемая величина – разность времени пролёта Δt – лежит в диапазоне от 10 до 800 наносекунд. Без качественной предобработки определить такую разницу с повторяемостью хотя бы 0,1-0,5% невозможно. Аналоговая предобработка решает сразу несколько задач: извлекает слабый сигнал из шума, стабилизирует амплитуду сигнала, очищает от большей части помех и защищает АЦП от алиасинга и перегрузок [2].

Цифровая предобработка сигнала выполняется сразу после оцифровки

принятого импульса высокоскоростным АЦП и служит для дальнейшего существенного повышения качества сигнала [3-5].

Основная задача цифровой предобработки – максимально сохранить полезную информацию о форме и фазе зондирующего импульса, одновременно удалив всё, что мешает надёжному определению времени пролета. Для этого применяются несколько последовательных операций (рисунок 1).

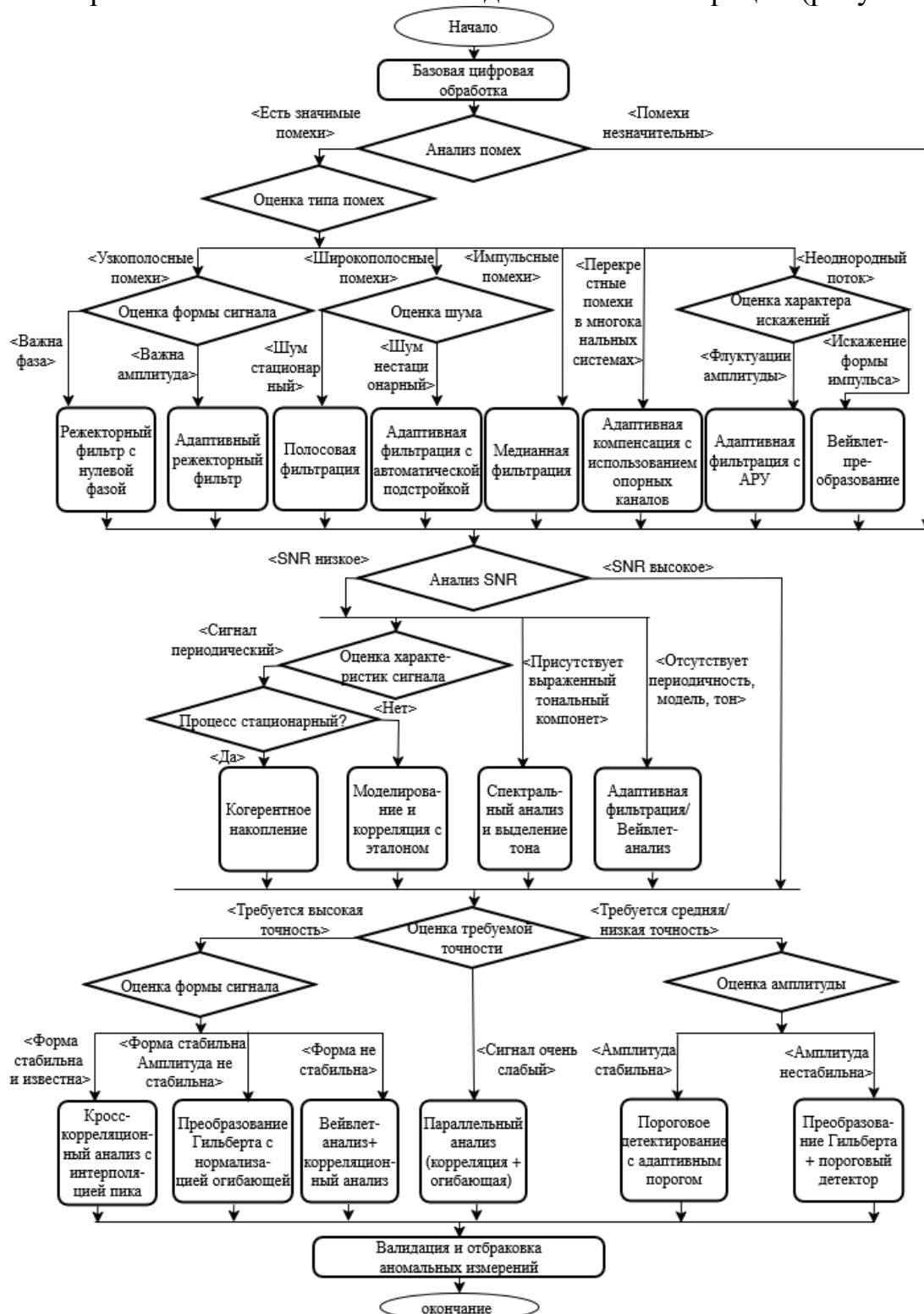


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма выбора конвейера цифровой обработки с учетом внешних условий и характеристик сигнала

Сначала проводится базовая цифровая обработка, включающая в себя удаление постоянной составляющей и коррекцию смещения нуля АЦП, поскольку даже небольшое постоянное смещение способно систематически сдвигать моменты пересечения порога или исказить позицию пика корреляционной функции на десятки пикосекунд.

На втором этапе цифровой предобработки, в зависимости от характеристик измеряемой среды, уровня помех, динамики потока и качества оцифрованного сигнала, выбирается и применяется адаптивная комбинация методов. Для очистки сигнала – один или несколько методов цифровой фильтрации: полосовая, адаптивная, вейвлет-преобразование для нестационарных помех, фильтрация с нулевой фазовой задержкой или согласованный фильтр. Для повышения отношения сигнал/шум (SNR) – когерентное накопление, корреляция с эталонным шаблоном (для сложных помех), спектральный анализ и подавление тональных помех (если присутствуют выраженные дискретные частоты).

После завершения этапов предобработки осуществляется детекция времени пролёта (ToF): вычисляется абсолютное время пролёта и/или разность времени пролёта по потоку и против потока. В зависимости от метрик качества очищенного сигнала (SNR, форма огибающей, коэффициент корреляции) применяются такие адаптивные методы, как пороговое детектирование с адаптивным уровнем порога; преобразование Гильберта для получения аналитического сигнала, огибающей и последующего пикового детектирования; кросс-корреляционный анализ с субдискретной интерполяцией пика.

После определения ToF проводится постобработка – валидация результатов и отбраковка аномальных измерений на основе анализа амплитуды, длительности импульса, SNR, формы сигнала, физической правдоподобности Δt и статистики соседних значений.

Можно выделить следующие критерии отбраковки / снижения доверия к полученному результату измерения Δt :

- SNR полученного сигнала меньше порогового значения;
- Амплитуда принятого сигнала меньше минимально допустимого значения;
- Ширина огибающей слишком большая или слишком маленькая;
- Форма сигнала сильно отличается от эталонной (корреляция с шаблоном ниже 0.7-0.85);
- Δt выходит за физически возможные пределы;
- Вычисленное значение скорости звука выходит за пределы ожидаемого на ± 5 -10%;
- Разброс нескольких измерений в одном пакете превышает стандартное отклонение Δt ;
- Количество нулей / экстремумов в сигнале не соответствует ожидаемому значению.

После отбраковки аномальных или недостоверных измерений применяются различные стратегии для обеспечения непрерывности и стабильности выходного сигнала расходомера. В простейшем случае пропущенное значение заменяется последним достоверным. Для дальнейшего сглаживания потока данных чаще всего используются медианный фильтр или экспоненциальное сглаживание, которые применяются только к прошедшим валидацию значениям, что позволяет эффективно подавлять случайные выбросы, сохраняя при этом динамику реального процесса. В более продвинутых моделях расходомеров реализуется адаптивное сглаживание – например, с использованием фильтров типа Калмана, а также методов на основе машинного обучения [6].

Список литературы:

1. Глушнев В. Д., Панов М. М. Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров //Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2018. – №. 3. – С. 94-100.
2. Гурьянова М. В., Аброскин А. С. Элементы обработки и преобразования аналоговых сигналов //Мировая наука. – 2020. – №. 7 (40). – С. 218-222.
3. Бондарев В. Н., Трестер Г., Чернега В. С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства //Севастополь: СевГТУ. – 1999.
4. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – БХВ-Петербург, 2011.
5. Гадзиковский В. И. Цифровая обработка сигналов // М.: Солон-пресс. – 2013.
6. Гаврилин П. А. Исследование методов обработки сигналов ультразвуковых расходомеров с использованием алгоритмов машинного обучения: магистерская диссертация : дис. – б. и., 2024.