

Высокопроизводительная система идентификации параметров потока жидкости

Е.С. Карлин¹, В.С. Бут¹, В.А. Фурсов²

¹КРОНЕ-Автоматика, пос. Верхняя Подстепновка 2, Самара, Россия, 443004

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Работа посвящена проблеме восстановления трехмерных моделей профилей потока в каналах гидродинамических систем. Исследуется многоканальный ультразвуковой расходомер, построенный на основе время-импульсного метода измерения скорости и визуализации структуры потоков жидкости и газа. Прибор, определяет время пролёта ультразвукового импульса по течению и против течения в трёх каналах и преобразует сначала в скорость потока, а затем в объёмный расход. Система реализована на микроконтроллере. Для организации стабильной работы микроконтроллера используется технология, которая позволяет синхронизировать параллельные задачи. Основными проблемами реализации этой технологии являются большой объём занимаемой памяти и низкая «прозрачность» происходящих процессов. Решена задача оптимизации используемой памяти и минимизации энергопотребления

1. Введение

В настоящее время существует множество методов, обеспечивающих измерение скорости потока жидкости, которые основаны на преобразовании скорости потока в физическую величину, удобную для измерения. Выбор метода зависит от области применения, допустимой погрешности, допустимой стоимости средств измерений. В работах [1,2] описаны наиболее распространённые методы измерения скорости потока жидкостей и газов, в частности, метод переменного перепада давления, тахометрические методы, вихревой метод, ультразвуковые методы на основе эффекта Доплера и измерения времени пролёта излученного импульса.

При создании приборов для измерения скорости потока жидкости одной из важных является проблема минимизации энергопотребления. Современные расходомеры должны быть автономными, удобными для размещения в труднодоступных местах и способными легко встраиваться в существующие вычислительные сети.

В настоящей работе решается задача минимизации энергопотребления ультразвукового трёхканального расходомера, предназначенного для определения скорости потока жидкости с использованием свойств распространения акустических волн.

2. Методы измерения скорости потока

Методы измерения скорости потока, основанные на особенностях распространения акустических волн в исследуемых средах, являются наиболее универсальными. Они способны работать в большом диапазоне вязкости исследуемых сред. В настоящее время активно

применяются методы, основанные на эффекте Доплера, корреляционные методы и методы, основанные на измерении времени пролёта излученного импульса.

Ультразвуковые доплеровские расходомеры осуществляют преобразование смещения частотного спектра сигнала, отраженного от движущейся в потоке неоднородности, в скорость. Пример подобного способа измерений и система основанная на данном способе детально описаны в патентах [3] и [4]. Основными недостатками данного метода являются низкая точность (2-3%) [3] и необходимость наличия неоднородностей и загрязнений в исследуемой среде [1]. В задачах медицины, например для измерения скорости кровотока, используются оптические доплеровские методы [5]. Подобный расходомер описан в патенте [6].

В обзорной статье [2] рассматриваются корреляционные методы измерения расхода. Общий принцип данных методов основан на преобразовании времени перемещения случайной местной неоднородности потока по участку трубопровода между преобразователями [7]. Время пролёта неоднородности τ_{max} определяется как

$$\tau_{max}: \quad R(\tau_{max}) = \frac{\max}{\forall \tau} \frac{1}{t_{измер}} \int_0^{t_{измер}} \varphi_1(t) \varphi_2(t + \tau) dt, \quad (1)$$

где $R(\tau)$ – взаимная корреляционная функция сигналов $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, полученных с двух преобразователей.

При использовании описанного метода во время импульсных ультразвуковых расходомерах погрешность измерений не превышает 1% [8]. Основы применения времяимпульсных методов описаны также в статьях [9], [10]. В частности, в работе [9] рассматривается возможность создания измерительных систем с погрешностью менее 0,15%. Данный метод основан на преобразовании разности времени пролёта импульса ультразвукового сигнала «вниз» и «вверх» по течению исследуемой среды. При распространении акустической волны в среде с течением скорость звука определяется как

$$c = c_0 + V \cos(\alpha), \quad (2)$$

где c_0 – скорость звука в среде, V – скорость потока в системе, α – угол направления распространения волны относительно направления потока жидкости, а скорость потока

$$V = \frac{l_p}{2 \cos(\alpha) t_{up} t_{dn}} \frac{\Delta t}{t_{up} t_{dn}}. \quad (3)$$

В формуле (3) l_p – длина пути между приёмником и передатчиком, $t_{up} t_{dn}$ – время распространения акустической волны против течения и по течению соответственно.

Известен также фазовый метод измерения расхода [11][12], в котором разность фаз сигналов, распространяющихся вверх и вниз по течению, соответствует определённой скорости потока. Пример системы, в которой реализуется данный метод, представлен на рисунке 1. Измерение скорости потока на основе акустических методов применяется также в океанологии для исследования течений и волн [13][14][15]. В частности, в [13] рассматривается связь течений с распространением звуковых волн в рамках модели геометрической акустики.

В большинстве методов определяется средняя скорость в сечении расположения сенсоров. Однако часто необходимо определение векторного поля течений в среде. Для восстановления профиля потоков используют многоканальные системы [9], метод PIV (Particle Image Velocimetry) [16], а также методы, основанные на обработке изображений распределения частиц, введённых в поток жидкости или газа.

При разработке системы, позволяющей визуализировать профили потоков, возможно комбинировать несколько методов, описанных выше. Так, например в [8] успешно комбинируют времяимпульсный и корреляционный методы. На рисунке 2 приведена схема измерений, в которой возможно использовать времяимпульсный, фазовый, доплеровский и корреляционный методы. Используя методы, описанные в [17], можно восстановить трехмерное изображение неоднородностей среды, например, пузырьков газа в исследуемой жидкости. Полученные изображения далее можно использовать для визуализации профилей потока, применив методы PIV.

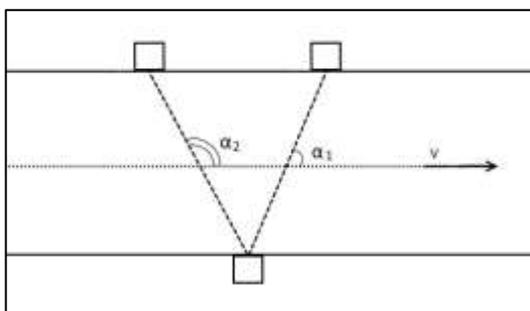


Рисунок 1. Пример системы в которой можно реализовать фазовый или времяимпульсный метод.

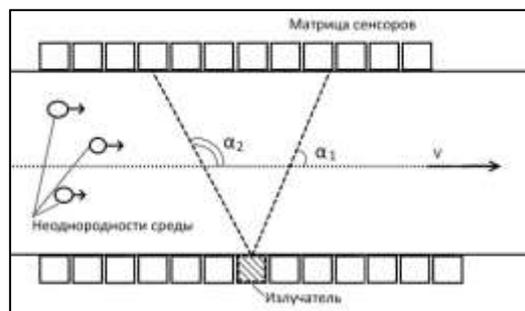


Рисунок 2. Система, реализующая несколько методов определения скорости потока.

3. Технология измерений на основе времяимпульсного метода

На основе времяимпульсного метода был разработан многоканальный ультразвуковой расходомер. Прибор определяет время пролёта ультразвукового импульса по течению и против течения в трёх каналах. Данные о времени пролёта прибор преобразует сначала в скорость потока, а затем, в зависимости от заданных настроек, в объёмный расход. Полученные данные передаются по радиоканалу для дальнейшего сохранения и обработки на сервер.

Система основана на микроконтроллере с ядром CortexM3 и специализированной микросхеме, позволяющей осуществить преобразование время-код. Микросхема измеряет время пролёта по каналам и передаёт накопленные данные на основной микроконтроллер, на котором осуществляется обработка данных. Полученные результаты сохраняются и передаются по радиоканалу на сервер. Для передачи данных по радиоканалу используются протоколы BLE и LoRaWAN. Применение данных протоколов позволяет снизить энергопотребление системы при передаче данных.

Для работы с микроконтроллером выбрана технология RTOS. Эта технология позволяет синхронизировать параллельные задачи, эффективно управлять режимами энергопотребления и работой внутренней периферии микроконтроллера. Для синхронизации задач используется способ синхронизации по событиям. Основными проблемами рассматриваемой технологии RTOS являются большой объём занимаемой памяти и низкая «прозрачность» протекающих в системе процессов.

Далее рассматривается модернизация технологии, направленная на оптимизацию алгоритмов и кода программы с целью минимизации используемой памяти, а также обеспечивающая снижение энергопотребления.

Таблица 1. Сравнение требуемых объемов памяти.

Реализация технологии	Память (байт)
Без оптимизации	76 057
Оптимизация только алгоритмов	69 625
Оптимизация алгоритмов и таймеров	68 028

4. Оптимизация системы по объему требуемой памяти

Оптимизация алгоритмов программы заключалась в многократном использовании повторяющихся фрагментов, что позволило уменьшить количество независимых задач, работающих параллельно. В результате объём используемой памяти программ уменьшился на 8,46%. Далее была произведена оптимизация переменных, массивов и структур. Кроме того, было принято решение отказаться от использования некоторых таймеров. Обработчик таймера требует 200-300 байт памяти для хранения программ. При исключении некоторых таймеров из

схемы обработки объём используемой памяти для хранения программ уменьшился на 10,56%. Результаты оптимизации памяти представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

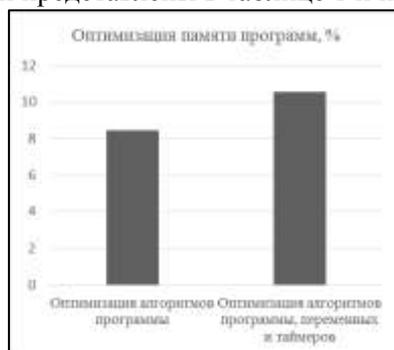


Рисунок 3. Оптимизация памяти (в % от начального значения).

5. Оптимизация по энергопотреблению

Описанная выше технология позволяет управлять режимом энергосбережения. Возможны два режима: бездействия и ожидания. В режиме бездействия системы энергопотребление снижается, но процессор остаётся полностью работоспособным. Время выхода из данного режима составляет 14 мкс., что соответствует времени переключения между задачами. В режиме ожидания энергопотребление минимально (1 мкА), но отключается значительная часть функций, при этом время выхода из режима 151 мкс. На рисунке 4 приведены соотношения энергоэффективности в разных режимах работы. Таким образом, для увеличения энергоэффективности необходимо уменьшать соотношение времени работы ко времени нахождения в энергосберегающем режиме.

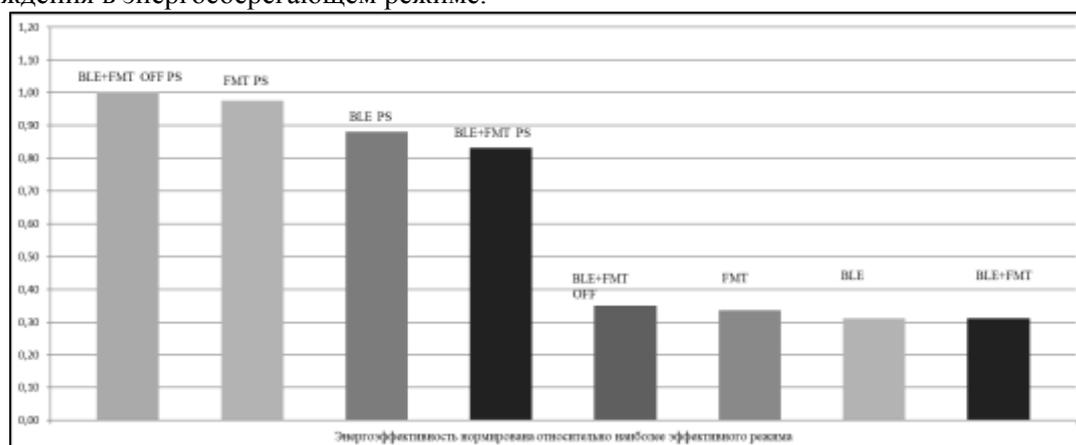


Рисунок 4. Соотношения энергоэффективности в разных режимах работы (BLE -включен радиоканал, FMT – включены измерения, PS – включен режим энергосбережения)

Для выявления возможности изменения этого соотношения проанализирует временную диаграмму работы микроконтроллера. Каждые 60 мс он считывает данные измерений и служебные данные. Передача данных занимает 2200 мкс. Если исключить служебные данные, то передача будет занимать 550 мкс. Дополнительные возможности сокращения времени вычислений появляются если отказаться от подключения специальных библиотек функций поддержки вычислений с плавающей запятой, а все вычисления производить над числами с фиксированной точкой. В таблице 2 приведены временные затраты на обработку данных при использовании описанной модернизации. В результате время работы процессора в активном режиме составляет не более 3 мс при периодичности 60 мс, т.е. более 95 % времени процессор не загружен и может находиться в режиме ожидания.

Еще одна проблема состоит в том, что некоторые процессы не позволяют перейти процессору в режим ожидания и оставляют его в режиме бездействия системы. Для того чтобы

добиться стабильного перехода в режим ожидания значительная часть таймеров была заменена на проверку времени работы чипа в цикле каждые 60 мс. Кроме того, введена опция запуска процессов только при наличии внешнего питания. Результаты оптимизации приведены на рисунке 5. В данном случае представлены графики времени работы прибора (падение напряжения 1,2 В) от конденсатора с емкостью 0,1Ф.

Таблица 2. Временные затраты на обработку данных.

Операции	Время (мкс)
Выгрузка данных по 3м каналам с служебной информацией	2200
Выгрузка данных по 3м каналам без служебной информации	550
Вычисления	120

Ещё одним потребителем энергии является передача данных по радиоканалу. Прибор с определённой периодичностью выходит в эфир, чтобы хост-устройство смогло его опознать и установить с ним канал связи. Регулируя период работы маяка (Beacon) можно уменьшить потребление. На рисунке 6 приведены графики времени работы прибора (падение напряжения 1,2 В) от конденсатора с емкостью 0,1Ф для случаев, когда период маяка настроена на 100мс, 1с и 2с.

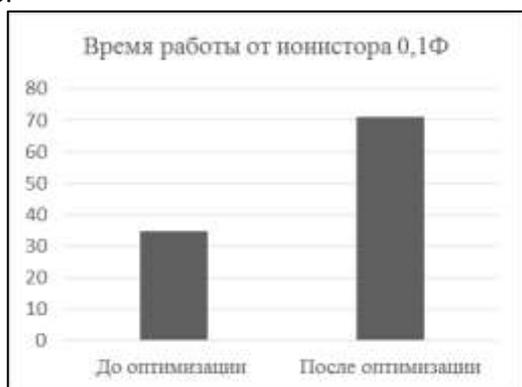


Рисунок 5. Сравнительные данные по времени включения за счет повышения стабильности перехода в режим ожидания.

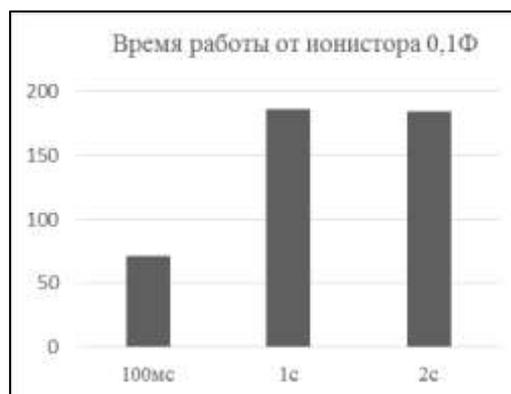


Рисунок 6. Время (в секундах) падения напряжения на 1,2 В на конденсаторе 0,1Ф для разных режимов работы маяка.

Как видно из графиков на рисунке 6 увеличение периода работы маяка (Beacon) до 1с дает значительный прирост эффективности. Увеличение периода больше 1с приводит к нестабильной работе канала связи.

6. Заключение

Используемый процессор при обработке 3х каналов после оптимизации загружен не более чем на 5%. Это открывает возможность использования микроконтроллеров данного типа для многоканальных систем с большим количеством каналов. При этом для разработки многоканальных систем могут использоваться менее мощные процессоры.

Сравнительная простота вычислительных процедур при реализации времяимпульсного метода также позволяет использовать подобные микроконтроллеры для решения задач в многоканальных системах. Необходимо отметить, что увеличение эффективности процессора возможно также за счет использования служебной информации от микросхемы, позволяющей осуществить преобразование время-код, или путем увеличения скорости передачи данных.

7. Благодарности

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проекты №17-29-03112 и 18-07-01390, и Министерства науки и высшего образования (госзадание).

8. Литература

- [1] Хлебнова, В.И. Методы и средства измерения расхода жидкости и газа: перспективы применения ультразвуковых преобразователей с широким измерительным лучом / В.И. Хлебнова // Известия вузов. Машиностроение. – 2016. – № 9 – С. 678.
- [2] Громов, Г.В. Бесконтактные методы измерения расхода жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах/ Г.В. Громов, А.В. Озеров, М.Н. Шафрановский // Мир измерений. – 2004. – № 1 – С. 4-8.
- [3] Исмаилов, М.М. Способ измерения расхода жидкости и газа доплеровским расходомером: пат. 2014567 Рос. Федерация: МПК⁵ G01F 1/66 / М.М. Исмаилов, Ю.М. Ким, Г.В. Мун, И.А. Арипов, А.А. Петренко // заявитель Малое многопрофильное предприятие «ЛДА»; патентообладатель Исмаилов М.М. – № 5020577/10; заявл. 18.09.1991; опубл. 15.06.1994. – 5 с.
- [4] Мельников, В.И. Ультразвуковой доплеровский расходомер многокомпонентной жидкости: пат. 2689250 Рос. Федерация: МПК G01F 1/66, G01F 1/74 / В.И. Мельников // заявитель и патентообладатель Мельников В.И. – № 2018105070; заявл. 09.02.2018; опубл. 24.05.2019, Бюл. № 15. – 12 с.
- [5] Проскурин, С.Г. Оптические доплеровские методы для измерения скорости потоков биологических жидкостей / С.Г. Проскурин, Н.А. Кускова, Т.И. Авсиевич // Известия саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2017. – № 4. – С. 269-280.
- [6] Алексеев, К.О. Устройство для измерения скорости мутной жидкости на основе когерентного источника излучения: пат. 98886 Рос. Федерация: МПК А61В 5/026 / К.О. Алексеев, В.С. Лугиня, И.А. Киселев // заявитель и патентообладатель общество с ограниченной ответственностью «Научнопроизводственное предприятие «Лазерные системы»». – № 2010114752/14; заявл. 14.04.2010; опубл. 10.11.2010. – 5 с.
- [7] Ватин, Н.И. Корреляционные методы измерения расхода жидкости: Автореферат на соискание учёной степени доктора технических наук: 05.23.16. – СПб., 2000. – 35 с.
- [8] Никитин, Е.Г. Применение корреляционного метода для измерения расхода жидкости в ультразвуковых расходомерах / Е.Г. Никитин, В.К. Сырчин // Интеллектуальные системы и микросистемная техника. Научно-практическая конференция. Сборник трудов. – 2019. – С. 112-120.
- [9] Mandard, E. Methodology for developing a high-precision ultrasound flow meter and fluid velocity profile reconstruction / E. Mandard, D. Kouame, R. Battault, J.P. Remenieras, F. Patat // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2008. – Vol. 55(1). – P. 161-172.
- [10] Sunol, F. High-precision time-of-flight determination algorithm for ultrasonic flow measurement. / F. Sunol, D.A. Ochoa, J.E. Garcia // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 68(8). – P. 2724-2732.
- [11] Осокин, Г.Р. Ультразвуковой фазовый метод измерения расхода среды (варианты): пат. 2243509 Рос. Федерация: МПК G01F 1/66 / Г.Р. Осокин// заявитель и патентообладатель ЗАО «ВЗЛЕТ» –заявл. 27.11.2003; опубл. 27.12.2004. – 2 с.
- [12] Кузнецов, С.А. Ультразвуковой способ измерения расхода жидких и газообразных сред и устройство для его осуществления: пат. 2447406 Рос. Федерация: МПК G01F 1/66 / С.А. Кузнецов, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова // заявитель и патентообладатель Кузнецов С.А. – № 2010131774/28; заявл.: 28.07.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 10 с.
- [13] Михин, Д.Ю. Прямые и обратные задачи лучевой акустики движущейся среды: Автореферат на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук : 01.04.06. – М., 1994. – 22 с.
- [14] Луньков, А.А. Интерференционная структура низкочастотных реверберационных сигналов в мелком море // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 5. – С. 596-604.
- [15] Казначеев, И.В. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником / И.В. Казначеев, Г.Н. Кузнецов, В.М. Кузькин, С.А. Пересёлков //Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 1. – С. 33-45.

- [16] Raffel, M. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide / M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 980 p.
- [17] Завьялова, К.В. Трёхмерное радиовидение на основе измерения амплитуды поля интерференции: Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.: 01.04. – Томск, 2014. – 25 с.

High performance fluid flow identification system.

E.S. Karlin¹, V.S. But¹, V.A. Fursov²

¹KROHNE-Automatika LLC, settlement Verkhnyaya Podstepnovka2, Samara Region, Russia, 443004

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The work is devoted to the problem of reconstructing three-dimensional models of flow profiles in the channels of hydrodynamic systems. A multichannel ultrasonic flowmeter is investigated, built on the basis of the time-pulse method of measuring velocity and visualizing the structure of liquid and gas flows. The apparatus determines the time of flight of the ultrasonic pulse with the flow and against the flow in the three channels and converts a first flow velocity and then to flow rate. The system is implemented on a microcontroller. To organize the stable operation of the microcontroller, technology is used that allows you to synchronize parallel tasks. The main problems in implementing this technology are the large amount of occupied memory and the low "transparency" of the processes taking place. Solved the problem of optimizing the used memory and minimizing power consumption