

УДК 556.5

СИСТЕМА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ НА ВОДОМЕРНЫХ ПОСТАХ

И.В. Брякин, К.А. Пресняков, Г.К. Керимкулова

Рассматриваются общие вопросы гидрометрии открытых водотоков. Обосновывается новый корреляционный способ измерения поверхностной скорости открытого водотока.

Ключевые слова: водоканал; гидрометрия; метод; MEMS-акселерометры; скорость; сенсорные сети; технология Zigbee; ускорение; флуктуации.

SYSTEM OF HYDROLOGICAL SUPERVISION ON HYDROMETRIC STATION

I.V. Bryakin, K.A. Presnyakov, G.K. Kerimkulova

The paper regards the general questions of the hydrometry of open waterways. The new correlated method of measurement of superficial speed of an open waterway is proved.

Keywords: water utility; hydrometry; method; MEMS-akselerometry; speed; sensory networks; Zigbee technology; acceleration; fluctuations.

Для проектирования, строительства и эксплуатации различных промышленных, коммунально-жилищных, гидротехнических транспортных сооружений и объектов водного хозяйства необходимы знания законов равновесия и движения жидкостей, а также методов применения этих законов в различных областях инженерной практики. Поэтому измерение скоростей течения, традиционно связанное с определением расходов воды, является одной из основных гидрометрических операций и имеет большое самостоятельное значение.

В настоящее время для измерения скорости движения водной среды широкое распространение в основном нашли две группы приборов, функционирование которых соответственно основано: 1 – на метках (индикации) течения в виде поплавков или вносимых в поток веществ («меточный способ»); 2 – на гидродинамическом взаимодействии с потоком воды, так называемый «корреляционный метод» [1, 2].

При использовании приборов первой группы в поток вводится метка, и преобразователи вырабатывают дискретные сигналы при проходе потоком контрольного участка, а в случае применения приборов второй группы вырабатываются непрерывные сигналы, соответствующие характеру изменения случайных процессов в контролируемых сечениях [3]. В том и другом варианте на

концах некоторого участка длиной L устанавливаются преобразователи, служащие для определения параметра τ – времени прохода потоком этого участка.

Предлагается вариант системы гидрологического наблюдения на водомерных постах, реализующий новый «корреляционный» способ измерения поверхностной скорости водотока, который выгодно отличается по отдельным характеристикам от своих прототипов.

Известно, что корреляционные методы применимы для измерения параметров движения любых поверхностей и сред, являющихся носителями информации. Физический характер носителя информации не имеет особого значения, важно лишь, чтобы информация могла быть воспринята каким-либо датчиком. Принципиально важным в этом случае является выбор такого информативного параметра, изменения которого представляли бы собой случайный процесс с нормальным законом распределения. Для этого необходимо рассмотреть отдельные физические свойства движущейся воды в открытых водотоках, в которых волновые явления на свободной поверхности потока воды играют огромную роль.

Общеизвестно, что вязкая жидкость приводится в движение внешними силами или движением границы соответствующего замкнутого объема самой жидкости [4]. Например, течение в реке

вызывается силой тяжести воды, которая движется по руслу под уклон с высоких мест на низкие. Неровности дна русла вызывают завихрения масс жидкости, которые, отрываясь от дна, перемещаются во всей толще потока и создают пульсации скорости около некоторого осредненного значения с относительно большим периодом времени. Поэтому ламинарно-турбулентный переход течения жидкости наступает вследствие именно неустойчивости течения жидкости к подобным возмущениям. В связи с этим движение воды в реках почти всегда турбулентное [4].

Исходя из этого, можно констатировать, что хаотический характер перемещения жидких частиц представляет собой наиболее легко обнаруживаемую особенность турбулентных течений, а само беспорядочное движение частиц приводит к перемешиванию жидкости и создает тем самым явление пульсации скорости и давления в фиксированных точках пространства рассматриваемой среды. Если граничные условия течения не меняются со временем, то колебания скорости и давления в каждой такой точке совершаются около устойчивых средних значений. Столь же устойчивы и остальные статистические характеристики колебаний, такие, например, как моменты корреляции между пульсациями в двух фиксированных точках пространства или в данной точке через фиксированный интервал времени.

Проведенные экспериментальные исследования свойств вероятностных характеристик турбулентного движения, наблюдаемого в реках и каналах, подтверждают общепринятую гипотезу о существовании эргодического свойства у турбулентных течений, что в свою очередь, позволяет использовать для их исследования временное, пространственное и смешанное (пространственно-временное) осреднение.

Возможны два способа описания движения подобных жидких частиц [4]. По первому из них (Эйлера) регистрируют скорости и ускорения частиц, которые проходят через интересующие нас фиксированные точки пространства, а по второму (Лагранжа) следят за скоростями и ускорениями, а, следовательно, и за положением в пространстве фиксированных частиц. Как показывает практика, более удобен первый способ, который преимущественно и применяется в гидродинамике.

Чтобы формализовать и обобщить все сказанное выше в аналитической форме, достаточно учесть, что вектор скорости \mathbf{v} движущейся жидкой частицы есть сложная функция времени t , зависящая от t не только явно, но и через координаты

x_1 , x_2 и x_3 . Полное ускорение частицы выразится при этом следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_1} \times \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_2} \times \frac{dx_2}{dt} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_3} \times \frac{dx_3}{dt}. \quad (1)$$

Так как $dx_i/dt = v_i$, то равенство (1) можно представить в виде:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + v_1 \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_1} + v_2 \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_2} + v_3 \times \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x_3}. \quad (2)$$

Проектируя его на оси координат, получаем

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_j \left(v_j \times \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Величина, стоящая в левой части (2) является субстанциональным или индивидуальным ускорением. Производная $\partial \mathbf{v} / \partial t$ выражает локальное ускорение, а сумма трех последних членов правой части (2) – представляет собой конвективное ускорение жидкой частицы. В идеальном случае при установившемся движении локальное ускорение равно нулю и частица может испытывать ускорение лишь вследствие пространственной неоднородности поля скоростей.

Таким образом, исходя из приведенных выше рассуждений, в качестве информативных параметров движения воды в открытом водотоке, предлагается использовать естественные пульсации скорости на фиксированных контрольных участках I и II водной поверхности рассматриваемого водотока, которые подчиняются нормальному закону распределения.

Один из наиболее простых и широко распространенных способов изучения кинематики речных потоков реализуется посредством поверхностных поплавков, за движением которых осуществляется соответствующее наблюдение. Поэтому для измерения флуктуаций скорости на каждом из фиксированных контрольных участков I и II предлагается применить соответственно поплавковые акселерометрические блоки (ПАБ) 3 (D_I) и 4 (D_{II}), расположенные в поверхностном слое 2 потока воды I открытого водотока, и ориентированные на регистрацию соответствующих флуктуаций трех компонент поверхностной скорости потока воды по трем координатным направлениям.

ПАБ 3 и 4 механически связаны между собой базовой гибкой тягой 6 длиной L , которая обеспечивает необходимое пространственное размещение акселерометров относительно друг от друга по направлению движения потока воды на фиксированном расстоянии L . Образованная таким об-

разом механическая система посредством опорной гибкой тяги 5 прикрепляется к неподвижной опоре 7.

Каждый ПАБ 3 и 4 конструктивно представляет собой сферический полый поплавок, внутри которого на монтажной плате размещена совокупность функциональных модулей (ФМ): радиомодули PM_I и PM_{II} , состоящие из высокочувствительных интегральных микроэлектромеханических акселерометров: $MЭМА_I$ и $MЭМА_{II}$; управляющие микропроцессорные блоки $УМПБ_I$ и $УМПБ_{II}$; радиоволновые передатчики $РПП_I$ и $РПП_{II}$; автономные источники питания $ИП_I$ и $ИП_{II}$ (миниатюрные батареи).

Вариант технической реализации такой системы дистанционного гидрометрического контроля, реализующий корреляционный метод измерения скорости открытого водотока, представлен на рисунке 1.

Важнейшими элементами предлагаемой системы дистанционного гидрометрического контроля являются высокочувствительные интегральные микроэлектромеханические акселерометры. Поэтому рассмотрим некоторые особенности применяемых интегральных акселерометров, которые в данной ситуации являются наиболее простым и экономически целесообразным вариантом решения существующего круга задач.

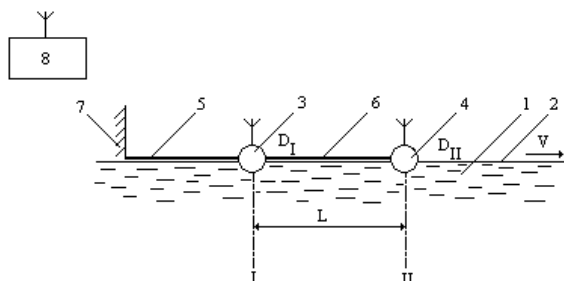


Рисунок 1 – Техническая реализация системы дистанционного гидрометрического контроля

В последнее время интенсивно разрабатываются MEMS-акселерометры (микроэлектромеханические), которые по технологии изготовления делятся на пьезопленочные, объемные и поверхностные, а по принципу действия подразделяются на два основных типа: 1 – со смещением маятниковой или поддерживаемой упругим торсионным подвесом чувствительной массы при линейном ускорении, приводящим к изменениям в емкостном или пьезоэлектрическом датчике; 2 – с изменением частоты вибрирующего элемента, вызванным растяжением упругого элемента подвеса чув-

ствительной массы вследствие нагружения под действием линейного ускорения. Акселерометры первого типа относятся к маятниковым акселерометрам, а вторые известны как резонансные акселерометры, или VBA (балочные вибрационные акселерометры).

Исходя из специфики решаемой проблемы и функциональных особенностей MEMS-акселерометров, предлагается использовать поверхностные маятниковые MEMS-акселерометры навигационного класса точности, типовая схема которых включает в себя подвижную маятниковую чувствительную массу, закрепленную на торсионах на стеклянном основании и перемещающуюся под воздействием ускорения перпендикулярного планарной плоскости устройства [5].

Одной из самых последних таких разработок, которая используется при реализации рассматриваемого способа измерения, является акселерометр ADXL330, представляющий собой трехосевой осевой датчик, располагающийся на одном кристалле со схемами преобразования сигнала. Данный тип акселерометра предполагает наличие трех чувствительных элементов с взаимно перпендикулярными осями чувствительности для измерения трех составляющих кажущегося линейного ускорения.

Акселерометр ADXL330 выпускается в пластиковом корпусе для поверхностного монтажа размером $4 \times 4 \times 1,45$ мм и содержит формирователь сигнала, генератор, демодулятор, таймер и схему автономного тестирования. Следует отметить, что применение подобного маятникового MEMS-акселерометра позволяет в целом существенно уменьшить габариты ПАБ и его массу.

Рассмотрим особенности функционирования предлагаемой гидрометрической системы дистанционного контроля, реализующей корреляционный метод измерения скорости открытого водотока.

Посредством высокочувствительных MEMS-акселерометров соответственно $MЭМА_I$ и $MЭМА_{II}$ (в составе ПАБ D_I и D_{II}) измеряются флуктуации назначенных параметров. Полученная информация в виде электрических сигналов поступает на управляющие микропроцессорные блоки $УМПБ_I$ и $УМПБ_{II}$ (в составе ПАБ D_I и D_{II} соответственно), где из анализа указанной информации определяются дифференциальные тензоры скоростей для каждого фиксированного контрольного участка (I и II), компонентами которых служат соответствующие девять скалярных производных от трех компонент скоростей v_i^I и v_i^{II} ($i=1,2,3$) по трем координатным направлениям x_1, x_2, x_3 :

$$\left\| \frac{\partial v_i^I}{\partial x_j} \right\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial v_1^I}{\partial x_1} & \frac{\partial v_1^I}{\partial x_2} & \frac{\partial v_1^I}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_2^I}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2^I}{\partial x_2} & \frac{\partial v_2^I}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_3^I}{\partial x_1} & \frac{\partial v_3^I}{\partial x_2} & \frac{\partial v_3^I}{\partial x_3} \end{vmatrix} \text{ и } \left\| \frac{\partial v_i^{II}}{\partial x_j} \right\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial v_1^{II}}{\partial x_1} & \frac{\partial v_1^{II}}{\partial x_2} & \frac{\partial v_1^{II}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_2^{II}}{\partial x_1} & \frac{\partial v_2^{II}}{\partial x_2} & \frac{\partial v_2^{II}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial v_3^{II}}{\partial x_1} & \frac{\partial v_3^{II}}{\partial x_2} & \frac{\partial v_3^{II}}{\partial x_3} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Исходя из полученных результатов (4), посредством управляющих микропроцессорных блоков УМПБ_I и УМПБ_{II} (в составе поплавковых акселерометров D_I и D_{II}) формируются соответствующие электрические сигналы

$$U_I = F_I \left(\frac{\partial v^I}{\partial x} \right) \text{ и } U_{II} = F_{II} \left(\frac{\partial v^{II}}{\partial x} \right),$$

которые затем преобразуются в цифровой телеметрический радиосигнал в соответствии с протоколом технологии беспроводных сенсорных сетей ZigBee [6], а затем и передаются посредством радиоволновых приемопередатчиков РПП_I и РПП_{II} (в составе ПАБ D_I и D_{II}) по радиоканалам в информационно-вычислительный комплекс (ИВК) 8 для последующей дистанционной обработки. ИВК активизирует ПАБ в соответствии с программой измерительных процедур и может иметь как стационарный, так и мобильный варианты конструктивного исполнения. Во втором случае ИВК ориентирован на обслуживание целой системы ПАБ, распределенной должным образом вдоль водотока на соответствующих водомерных постах.

Используемые беспроводные сенсорные сети ZigBee фактически являются многоячейковой сетью с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением узлов, ориентированной на сбор по радиочастотным каналам связи показаний от множества датчиков в следующих прикладных областях: автоматизация зданий, промышленная автоматика, безопасность и оборона, здравоохранение, сельское хозяйство и многое другое. Подобные технологии технически представляют собой распределенную, самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся, устойчивую к отказу отдельных элементов сеть из необслуживаемых и не требующих специальной установки автономных датчиков-ретрансляторов. Что касается энергопотребления, то одной небольшой батарейки достаточно для поддержания работоспособности ZigBee-оборудования в течение нескольких месяцев или даже лет. Благодаря встроенному программному обеспечению устройства стандарта

беспроводной связи ZigBee при включении питания умеют сами находить друг друга и формировать сеть, а в случае выхода из строя какого-либо из узлов умеют устанавливать новые маршруты для передачи сообщений. Сеть ZigBee содержит функциональные узлы трех основных типов: координаторы, маршрутизаторы и конечные устройства. Координатор – обязательный узел, который образует сеть, выбирая для нее номер частотного канала и идентификатор. Кроме того, к координатору подключаются маршрутизаторы и конечные устройства, количество которых можно наращивать. Скорость передачи данных вместе со служебной информацией в сетях Zigbee составляет 250 кБит/с. Технология ZigBee имеет частотные каналы в диапазонах 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц. Наибольшие скорости передачи данных и наивысшая помехоустойчивость достигаются в диапазоне 2,4 ГГц, в котором предусмотрено 16 частотных каналов с шагом 5 МГц [7]. Радиус охвата устройств Zigbee зависит от очень многих параметров, но в первую очередь – от чувствительности приемника и мощности передатчика. На открытом пространстве расстояние между узлами в сети Zigbee измеряется сотнями метров, а в помещении – десятками метров. При этом зона покрытия ZigBee значительно шире, чем расстояние между узлами, т. к. за счет ретрансляции сообщений осуществляется наращивание сети. Стандарт беспроводной связи ZigBee отличается малым энергопотреблением, надежностью передачи данных, защитой информации, совместимостью устройств различных производителей. Кроме того, среди прочих достоинств стандарта следует упомянуть хорошую масштабируемость и простоту настройки.

Применение для создания Zigbee-сети в рассматриваемой гидрометрической системе готовых ZigBee-модемов позволяет организовать техническую реализацию данной системы любой конфигурации и в кратчайшие сроки, т. к. при этом не требуется тратить время на разработку высокочастотных цепей и значительно упрощается разработка программного обеспечения.

Рассматриваемая система гидрологического наблюдения на водомерных постах, реализующая новый корреляционный метод измерения скорости открытого водотока, может быть использована при экологическом мониторинге рек и их прибрежных ландшафтов, в частности, при изучении динамики поверхностной скорости водотока реки в зависимости от её ширины, максимальной глубины и уклона по гидрометрическим створам; при гидрологических наблюдениях, в частности, при подсчете расходов воды реки или в водоканалах, например, на водомерных постах.

Литература

1. Железняков Г.В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Г.В. Железняков, Т.А. Неговская и др. М.: Колос, 1984. 205 с.
2. Невский В.В. Гидравлика, гидрология, гидрометрия / В.В. Невский, Л.Н. Копац и др. М.: Транспорт, 1988. 231 с.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 2 / П.П. Кремлевский. СПб.: Политехника, 2004. 412 с.
4. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков / К.В. Гришанин. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 311 с.
5. Распопов В.Я. Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
6. Брякин И.В. Система мониторинга технического состояния зданий / И.В. Брякин // Проблемы автоматизации и управления. Бишкек: Илим, 2014. С. 144–155.
7. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник и др. Киев: ЕКМО, 2009. 672 с.