

А.М.Чухарев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИГМА-1»
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
НА ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ**

Кратко описаны основные характеристики и особенности измерительного комплекса «Сигма-1» и методика коррекции получаемых данных. Турбулентные пульсации вектора скорости, измеряемые в координатах прибора, пересчитываются в неподвижную систему отсчета. Для устранения шумов, возникающих из-за собственных движений измерительного комплекса, используется встроенная система контроля положения прибора в пространстве и последующая фильтрация данных фильтром Винера. Показано, что указанные процедуры позволяют существенно снизить влияние собственных движений прибора на измеряемые величины пульсации скорости.

Ключевые слова: *турбулиметр, натурные измерения, коррекция, фильтр Винера.*

Необходимость точно параметризовать фундаментальные процессы, которые связывают атмосферу и океан (в первую очередь это приток энергии к океану от ветра и суммарный поток тепла через поверхность) определяет актуальность комплексных экспериментальных исследований в пограничных слоях атмосферы и океана и тщательного измерения большого количества физических характеристик в обеих средах. Для установления связи турбулентных характеристик с определяющими фоновыми процессами необходимо одновременное измерение средних и пульсационных значений гидрофизических полей. При этом происходит постоянное повышение требований к качеству и скорости приема и обработки данных.

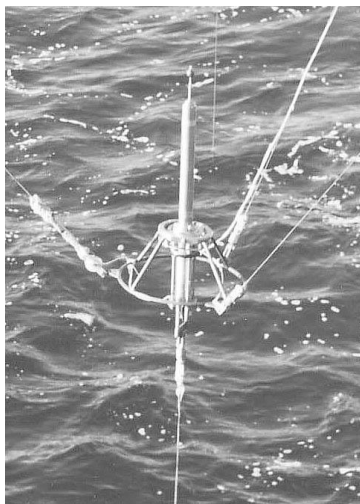


Рис. 1. Общий вид измерительного комплекса «Сигма-1». Позиционный вариант.

Целью данной работы является описание основных особенностей измерителя турбулентных пульсаций вблизи поверхности моря и методов устранения искажений, вызванных влиянием собственных движений прибора.

Измерительный комплекс «Сигма-1», предназначенный для исследования турбулентных процессов в верхних слоях моря, был разработан и изготовлен в отделе турбулентности МГИ НАН Украины [1] и соответствует современным требованиям по чувствительности и точности. Для исследований в приповерхностном слое моря был создан позиционный вариант комплекса, который предназначен для работы с неподвижного основания (платформы), общий вид его представлен на рис.1, основные технические характеристики – в табл.1.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики измерительного комплекса «Сигма-1».

измеряемые параметры	диапазон	разрешение	точность	частота измерений
3 комп. пульсаций скорости	± 2 м/с	10^{-3} м/с	$\pm 10\%$	частота измерений средних величин – 20 Гц, пульсаций – 100 Гц
температура	0 – 30 °С	0,001 °С	$\pm 5\%$	
относительная электропроводность	0 – 0,9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5\%$	
3 комп. линейных ускорений	$\pm 2g$	0,002 м/с ²	0,002 м/с ²	
крен и дифферент	$\pm 20^\circ$	0,01°	$\pm 1^\circ$	
азимут	0 – 360°	10°	$\pm 5^\circ$	
давление	0 – 1 МПа	$5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1\%$	

Чтобы свести к минимуму собственные движения прибора, была разработана конструкция подвеса, позволяющая фиксировать прибор на выбранном горизонте и при необходимости перемещать его по вертикали в диапазоне глубин 0 – 20 м. Корпус измерителя крепится в корзине в карданном подвесе и удерживается в вертикальном положении с помощью груза, расположенного на тросе в 5 м ниже прибора. Корзина подвешивается на трех оттяжках, длина которых регулируется ручными лебедками, закрепленными на палубе.

Тем не менее, вследствие активного динамического воздействия, особенно в волновом слое, прибор совершает некоторые колебания. Для коррекции измерений пульсаций вектора скорости предлагается методика, позволяющая существенно снизить искажения, возникающие из-за движений прибора. Предлагаемые методы разрабатывались для измерительного комплекса «Сигма-1», но могут применяться и для других приборов, не связанных жестко с неподвижными основаниями и снабженных системами контроля положения и акселерометрами.

Базовым элементом комплекса является электромагнитный измеритель флуктуаций трех компонент вектора скорости течения, обладающий круговой диаграммой направленности. Чувствительный элемент этого прибора имеет форму шара диаметром $a = 3$ см, на поверхности которого расположены симметрично 8 электродов, три компоненты пульсации скорости рассчитываются по разностям потенциалов соответствующих электродов [2]. Поскольку датчик ИПВСТ (измеритель пульсаций вектора скорости течения) осуществляет измерения в системе координат прибора, а последний меняет свое положение относительно земли, требуется пересчет их в неподвижную систему координат.

Измерительный комплекс в рабочем положении обладает шестью степенями свободы: движения вдоль трех осей координат и повороты вокруг осей. При наличии в измерительной системе комплекса полного набора высокоточных датчиков, учитывающих все движения прибора, коррекция может производиться прямым учетом собственных движений [3]. Поскольку измерительный комплекс «Сигма-1» оснащен только системой контроля положения (измеряются углы крена θ и дифферента ψ отклонения условной оси прибора от вертикали и угол поворота относительно меридиана φ) и

датчиками линейных ускорений (акселерометрами), полной информации о движении прибора получить не удастся. С учетом этого, коррекция измеренных компонент пульсаций скорости производится в два этапа.

1. *Коррекция положения и ориентации комплекса.* Данные о величинах углов θ , ψ , φ , полученных с той же дискретностью 100 Гц дают возможность результаты измерений пульсаций вектора скорости течения привести к неподвижной системе координат при помощи соответствующих преобразований [1, 3]. В данном случае представляется наиболее удобным использование системы координат и углов Эйлера, предложенных С.Н.Благовещенским [4]. Такой выбор углов позволяет соответствующим изменением их величины придать прибору любое положение в пространстве, причем изменение одного угла не влияет на величину других углов и новое положение прибора не зависит от порядка изменения углов [4]. Схематично прибор и система координат изображены на рис.2.

Перевод в неподвижную систему отсчета производится с помощью матрицы преобразований

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{V}', \quad (1)$$

где $\mathbf{V}'$ – вектор скорости в координатах прибора, $\mathbf{V}$ – в неподвижной системе координат,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi & \sin \theta \sin \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \psi \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \varphi & \sin \theta \sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \psi \sin \varphi - \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

2. *Коррекция колебаний.* Оснащение комплекса датчиками ускорений – акселерометрами – дает возможность соответствующей обработкой данных существенно уменьшить влияние собственных движений прибора на измеренные пульсации скорости. Для этой цели применяется фильтрация исходных данных фильтром Винера, идея которого состоит в следующем.

Предположим, что исходный сигнал и аддитивный шум – стационарные, линейные стохастические процессы с известными спектральными характеристиками или известными автокорреляционной и кросс-корреляционной функциями. Стоит задача применить линейную фильтрацию к зашумленным данным, чтобы получить на выходе фильтра сигнал, в котором шум минимизирован в соответствии с неким статистическим критерием. В данном случае используется критерий минимальной среднеквадратичной ошибки, которая определяется как разность между неким желаемым откликом и фактическим сигналом на выходе фильтра. Для стационарного случая это решение известно как фильтр Винера [5], блок-схема которого представлена на рис.3.

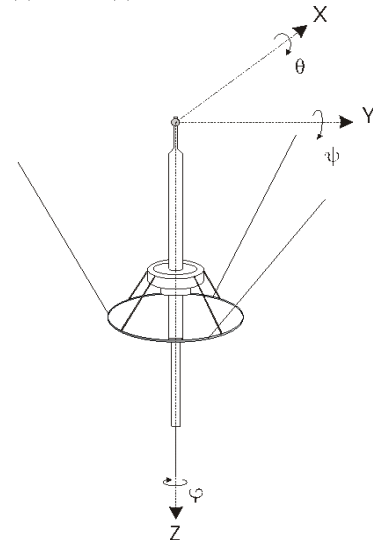
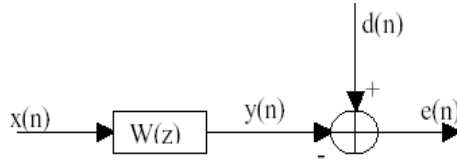


Рис. 2. Схематичное изображение измерительного комплекса «Сигма-1» и связанная с ним система координат.



Р и с . 3 . Блок-схема линейного дискретного по времени фильтра $W(z)$ для оценки искомого сигнала $d(n)$, основанной на исходном сигнале $x(n)$, $y(n)$ – выходной сигнал фильтра, $e(n)$ – оценка ошибки.

Мы предполагаем, что исходный сигнал $x(n)$ и искомым сигнал $d(n)$ – случайные процессы (дискретные во времени сигналы), $y(n)$ – выходной сигнал фильтра, $e(n)$ – оценка ошибки. Чтобы найти оптимальные параметры фильтра, требуется выбрать характеристическую функцию. При выборе нужно учитывать, что характеристическая функция должна:

- 1) быть математически трактуема;
- 2) иметь предпочтительно один минимум, чтобы параметры оптимального фильтра можно было выбрать однозначно.

В фильтре Винера характеристическая функция выбирается как

$$\xi = E[e(n)]^2. \quad (3)$$

Это так называемый критерий среднеквадратичной ошибки. Схема применения фильтра Винера приведена на рис.4.

Обозначим

$$\bar{W} = [w_0 \ w_1 \dots \ w_{N-1}]^T, \quad \bar{X}(n) = [x_n \ x_{n-1} \dots \ x_{n-N+1}]^T. \quad (4)$$

Выходной сигнал

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \cdot x(n-i) = \bar{W}^T \cdot \bar{X}(n) = \bar{X}^T(n) \cdot \bar{W}. \quad (5)$$

Таким образом, мы можем записать

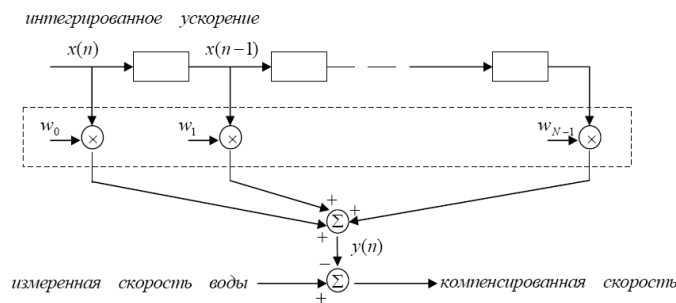
$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \bar{X}^T(n) \cdot \bar{W}. \quad (6)$$

Тогда характеристическая функция

$$\begin{aligned} \xi &= E[e^2(n)] = E[(d(n) - \bar{W}^T \bar{X}(n))(d(n) - \bar{X}^T(n) \bar{W})] = \\ &= E[d^2(n)] - \bar{W}^T E[\bar{X}(n)d(n)] - E[\bar{X}^T(n)d(n)] \bar{W} + \bar{W}^T E[\bar{X}(n)\bar{X}^T(n)] \bar{W}. \end{aligned} \quad (7)$$

Определим взаимно-корреляционный вектор как

$$\bar{P} \equiv E[\bar{X}(n)d(n)] = [p_0 \ p_1 \ \dots \ p_{N-1}]^T. \quad (8)$$



Р и с . 4 . Применение фильтра Винера N-го порядка для компенсации собственных движений прибора.

и $N \times N$ автокорреляционную матрицу

$$R \equiv E[\bar{X}(n)\bar{X}^T(n)] = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & \cdots & r_{0,N-1} \\ r_{10} & r_{11} & & r_{1,N-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{N-1,0} & r_{N-1,1} & \cdots & r_{N-1,N-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Отметим, что

$$E[d(n)\bar{X}^T(n)] = \bar{P}^T, \\ \bar{W}^T \bar{P} = \bar{P}^T \bar{W}$$

Тогда мы получим

$$\xi = E[d^2(n)] - 2\bar{W}^T \bar{P} + \bar{W}^T R \bar{W}. \quad (10)$$

Уравнение (10) является квадратичной функцией вектора $\bar{W}$ с одним глобальным минимумом. R должна быть положительно определенной матрицей, для того чтобы иметь единственную точку минимума в w -пространстве.

Чтобы получить набор весов в векторе $\bar{W}$, который минимизирует характеристическую функцию, приравняем производную от (10) нулю:

$$\frac{\partial \xi}{\partial w_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (11)$$

Уравнение (10) может быть переписано в виде

$$\xi = E\left[d^2(n) - 2\sum_{l=0}^{N-1} p_l w_l + \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_l w_m r_{lm}\right]. \quad (12)$$

В свою очередь последний член в правой части (12) может быть расписан как

$$\sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_l w_m r_{lm} = \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{N-1} \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq i}}^{N-1} w_l w_m r_{lm} + w_i \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq i}}^{N-1} w_m r_{im} + w_i^2 r_{ii}. \quad (13)$$

Тогда мы получим

$$\frac{\partial \xi}{\partial w_i} = -2p_i + \sum_{l=0}^{N-1} w_l (r_{li} + r_{il}), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (14)$$

Приравнявая $\frac{\partial \xi}{\partial w_i} = 0$, будем иметь

$$\sum_{l=0}^{N-1} w_l (r_{li} + r_{il}) = 2p_i. \quad (15)$$

Учитывая свойство симметричности автокорреляционной матрицы действительного сигнала, т.е. $r_{li} = r_{il}$, уравнение (15) приведет к виду

$$\sum_{l=0}^{N-1} r_{il} w_l = p_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

В матричной записи $R\bar{W}_{op} = \bar{P}$, (16)

где $\bar{W}_{op}$ – оптимальный вектор весовых коэффициентов. Уравнение (16) известно как уравнение Винера-Хопфа, которое имеет решение

$$\bar{W}_{op} = R^{-1} \bar{P}. \quad (17)$$

Предполагается, что R имеет обратную матрицу. Минимальная величина ошибки

$$\xi_{\min} = E[d^2(n)] - \bar{W}_{op}^T \bar{P} = E[d^2(n)] - \bar{W}_{op}^T R \bar{W}_{op} \quad (18)$$

или
$$\xi_{\min} = E[d^2(n)] - \bar{P}^T R^{-1} \bar{P}. \quad (19)$$

В частотной области фильтрация будет происходить следующим образом. Пусть $x(t)$ – сигнал, содержащий искажения $a(t)$, $u(t)$ – искомый сигнал, так что

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t - \tau) u(\tau) d\tau \quad \text{или} \quad X(f) = A(f) \cdot U(f), \quad (20)$$

где X, A, U – Фурье преобразования x, a и u .

Кроме искажения сигнала в измерениях содержится неизвестный шум $n(t)$:

$$c(t) = x(t) + n(t). \quad (21)$$

В отсутствии шумов $U(f) = X(f)/A(f)$. Чтобы восстановить сигнал (обратить свертку $c(t)$) необходимо найти оптимальный фильтр $w(t)$ или $W(f)$ такой, чтобы оценка сигнала $\tilde{u}(t)$ как можно меньше отличалась от искомого сигнала $u(t)$:

$$\tilde{U}(f) = \frac{C(f)W(f)}{A(f)}, \quad (22)$$

т.е.
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{U}(f) - U(f)|^2 df \rightarrow \min. \quad (23)$$

Подставляя в (23) выражения из (20) – (22), получим

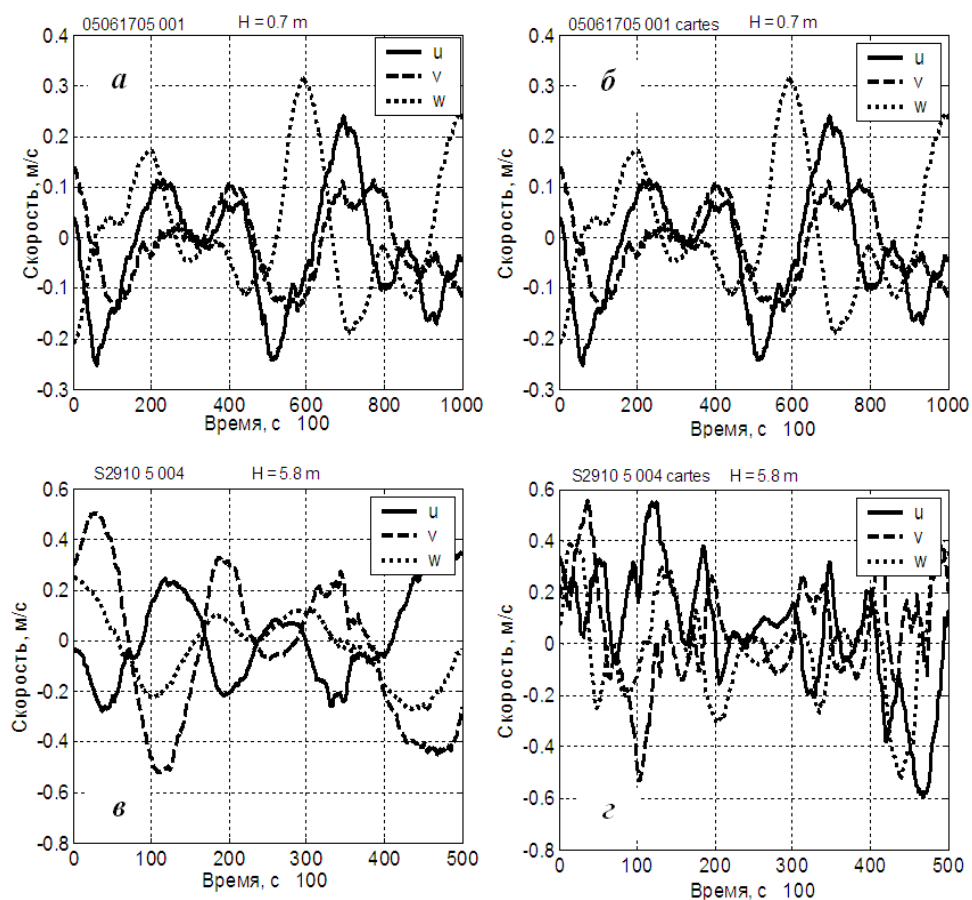
$$\int_{-\infty}^{\infty} |A(f)|^{-2} |X(f)|^2 |1 - W(f)|^2 + |N(f)|^2 |W(f)|^2 df. \quad (24)$$

Отсюда оптимальный фильтр определится как

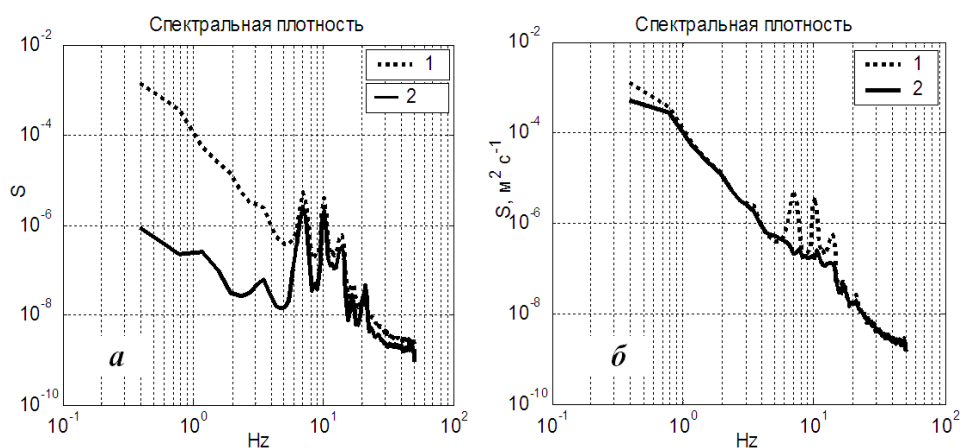
$$W(f) = \frac{|X(f)|^2}{|X(f)|^2 + |N(f)|^2}. \quad (25)$$

Здесь $|X(f)|^2 + |N(f)|^2 \approx |C(f)|^2$, где $|X(f)|^2$, $|N(f)|^2$ и $|C(f)|^2$ – спектры мощности $x(t)$, $n(t)$ и $c(t)$ соответственно.

Применение процедур коррекции. Применение к данным измерительного комплекса «Сигма-1» процедуры пересчета компонент пульсаций скорости в неподвижную систему координат показало, что различие начинает проявляться, когда углы наклона (крен и дифферент) прибора превышают 2 – 3°. Такие отклонения от вертикали обычно наблюдаются только в самом верхнем слое на глубинах, где ощутимо влияние поверхностных волн. На рис.5



Р и с . 5 . Пример пересчета величин пульсаций скорости в неподвижную систему координат по формуле (1): до и после пересчета при малых (а, б) и больших (в, г) углах отклонения прибора от вертикали.



Р и с . 6 . Спектральная плотность горизонтальной компоненты пульсации скорости и интегрированного ускорения: (а) 1 – скорость, 2 – интегрированное ускорение; (б) 1 – исходная скорость, 2 – после применения фильтра Винера.

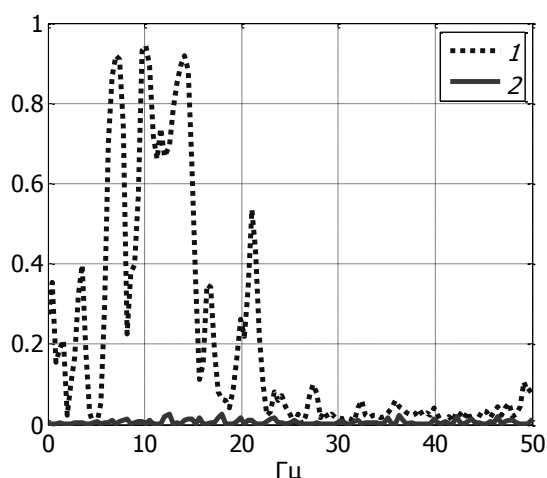


Рис. 7. Функция когерентности между компонентой скорости и интегрированным ускорением до (1) и после (2) фильтрации.

изображены фрагменты записи компоненты скорости вдоль оси x до и после перевода в неподвижную систему координат. При малых углах отклонения (стандартные отклонения $0,9$ и $0,3^\circ$ для крена и дифферента соответственно) кривые неотличимы (рис.5, а, б). При больших углах (стандартные отклонения $2,3^\circ$ и $2,6^\circ$ для крена и дифферента соответственно) уже наблюдаются

расхождения (рис.5, в, г).

Применение фильтра Винера в частотной области к данным, полученным комплексом «Сигма-1», продемонстрировано на рис.6 и 7. На рис.6 представлены спектры одной компоненты пульсации скорости (в данном случае — вдоль оси x) до и после применения фильтрации. Хорошо видно, что пики, вызванные собственными колебаниями прибора на частотах 7, 10 и 10,5 Гц почти полностью устраняются после фильтрации.

На рис.7 показана когерентность этой же компоненты скорости с интегрированным ускорением до и после фильтрации. Как видно из рисунка, когерентность между измеренной компонентой скорости и интегрированным ускорением в исходных данных весьма высокая, фильтрация же приводит к тому, что когерентность между компенсированной скоростью и интегрированным ускорением практически исчезает.

Таким образом, можно сделать вывод, что описанная процедура обработки измеренных величин пульсаций вектора скорости позволяет существенно снизить влияние собственных движений измерительного комплекса и в результате получить достаточно «чистые» данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самодуров А.С. и др. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря // Морской гидрофизический журнал.— 2005.— № 5.— С.60-71.
2. Дыкман В.З., Ефремов О.И. Электромагнитный датчик для измерения флуктуаций вектора скорости течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.— С.318-324.
3. Anctil F., Donelan M.A., Drennan W.M., Graber H.C. Eddy-correlation measurements of air-sea fluxes from a discus buoy // J. Atm. and Ocean. Techn.— 1994.— 11, № 6.— P.1144-1150.

4. *Справочник* по теории корабля / Под ред. Я.И. Войткунского. Т. 2.– Л.: Судостроение, 1985.– 440 с.
5. *Farhang-Boroujeny B.* Adaptive filters, theory and applications.– Wiley, 1999.– 321 p.

Материал поступил в редакцию 6.10.2010 г.