

УДК 656.61.052

Васьков Анатолий Семенович

ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова»
Россия, Новороссийск¹
Профессор кафедры судовождения
Доктор технических наук
E-Mail: as.vaskov@mail.ru

Мельник Виктор Григорьевич

ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова»
Россия, Новороссийск
Аспирант кафедры Судовождения
E-Mail: viktor-melnik71@yandex.ru

Весовое сглаживание навигационных данных с переменными интервалами измерений

Аннотация. Рассмотрены методы адаптации весового скользящего среднего сглаживания временных рядов навигационных данных с переменными интервалами измерений. Целью сглаживания является компенсация погрешностей и влияния внешних факторов на движение судна. Скользящий интервал сглаживания включает три измерения, что обеспечивает сохранения малых изменений во временных рядах. Предложен новый подход определения коэффициентов весового сглаживания, который сводится к их настройке обратно пропорционально переменным интервалам измерений (времени - для угловых движений или пройденного расстояния - для линейных перемещений). В результате будет меньше влияние измерений на оцениваемое среднее значение параметра процесса для больших интервалов измерений. Постоянные составляющие весовых коэффициентов сглаживания определяются по текущим измерениям методом наименьших квадратов. Результаты моделирования показывают хорошую сходимость скользящего весового среднего сглаживания с переменными коэффициентами для рядов навигационных данных о движении судна (курса, скорости). Наилучшая работоспособность наблюдается для выражений весового сглаживания, представленных с общим множителем из весовых коэффициентов.

Ключевые слова: навигационные данные; курс; скорость; весовое среднее сглаживание; интервал измерений; интервал сглаживания; метод наименьших квадратов.

Идентификационный номер статьи в журнале 60TVN414

¹ 353918, Краснодарский край, г.Новороссийск, пр.Ленина 93, ГМУ имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, Васьков А.С. ,
Тел. +79183616026

Введение

Анализ исследований [1-17] показывает, что предварительная обработка временного ряда навигационных данных методами сглаживания компенсирует погрешности измерений и влияние различных факторов, повышает вероятность их значений, дает возможность определять и использовать закономерности данных для оценивания характеристик процесса в будущем (прогнозирования) и при решении задач идентификации моделей процессов.

Для рядов с нелинейной тенденцией развития, к которым относятся ряды навигационных данных о движении судна, целесообразно применять метод взвешенной скользящей средней, представленный в общем виде [1, 7-17]

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_{j=i-k}^{j=i+k} p_j x_j}{\sum_{j=i-k}^{j=i+k} p_j}, \quad (1)$$

где i - порядковый номер скользящего среднего;

\hat{x}_i - значение скользящего среднего в момент для порядкового номера i ;

x_j - фактическое j -е значение в интервале сглаживания;

p_j - весовые коэффициенты измерений в интервале сглаживания.

Значения весовых коэффициентов для разных длин интервалов сглаживания ($2k+1$) и порядков полиномов определены и представлены в различных источниках [1, 5, 8 - 11, 14-17] и табл.1. Значения весовых коэффициентов симметричны относительно срединной точки интервала сглаживания и предназначены для рядов с равномерными интервалами измерений, сумма весовых коэффициентов является общим множителем. Метод взвешенной скользящей средней (1) по пяти и семи точкам апробирован для сглаживания равномерных траекторных измерений движения судна в исследованиях [3] и показал хорошие результаты.

Таблица 1

Значения весовых коэффициентов для разных длин интервалов сглаживания ($2k+1$) и порядков полиномов

Длина интервала сглаживания (количество точек)	Значения весовых коэффициентов	Сумма весовых коэффициентов
3 (Хемминг)	0,25 0,5 0,25	1
3 (судовождение)	1, 2, 1	4
5 (судовождение)	1, 4, 6, 4, 1	16
5	-3, 12, 17, 12, -3	35
7	-2, 3, 6, 7, 6, 3, -2	21
9	-21, 14, 39, 54, 59, 54, 39, 14, -21	231

На практике часто используется самый простой вариант взвешенного скользящего среднего по трем точкам ряда (1) - *сглаживающий фильтр Хэмминга* [14], т.е. без общего множителя

$$\hat{x}_i = (0,25x_{i-1} + 0,5x_i + 0,25x_{i+1}). \quad (2)$$

Подобный метод осреднения традиционно используется в судовождении при расчетах, связанных с определением скорости и поправки лага на мерной линии при трех пробегах в противоположных направлениях [4]. Формула для сглаживания при этом записывается с

общим множителем, т.е. в виде, который наиболее часто используется при сглаживании [1, 7-12, 14-17]

$$\hat{x}_i = \frac{1}{4}(x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1}). \quad (3)$$

В данной работе предлагаются методы адаптации весового сглаживания нелинейных рядов навигационных измерений с разными интервалами.

Принципы весового сглаживания рядов навигационных данных с переменными интервалами измерений

Предварительные результаты моделирования [5] показывают, что интервал сглаживания по трем измерениям позволяет сохранить малые изменения данных временных рядов. Поэтому выражения (2) или (3) могут быть использованы в качестве исходной модели совершенствования весового сглаживания (1) путем дополнительной настройки весовых коэффициентов. При решении этих задач, т.е. оптимальном выборе весовых коэффициентов сглаживания (1) различных параметров, необходимо учитывать режимы движения судна.

На основе принципов декомпозиции задач управления [2, 6], структуру движений судна можно разделить на два основных типа: быстрые движения, к которым относятся угловые (курс, угловая скорость поворота), и медленные движения, к которым относятся поступательные (линейная скорость, координаты траектории). Следует также отметить, что ряды навигационных данных [5, 6] (реальные данные движения судов с сайта <http://www.marinetraffic.com>) имеют неравномерности и нерегулярности измерений (по времени и координатам). На основе этого можно сделать следующие важные выводы о выборе подходов сглаживания:

1. Угловые движения судна (курс) могут изменяться только во времени без изменения водного пространства (пройденного расстояния). Например, съёмка судна с якоря, разворот судна на месте с помощью собственных вспомогательных средств управления или буксиров.

2. Изменение линейной скорости движения и соответственно координат траектории судна, обладающего значительной инерционностью, может происходить во времени, но только при изменении пространства (пройденного судном расстояния).

Указанные обстоятельства позволяют выдвинуть важное предложение принципов настройки весовых коэффициентов скользящего среднего сглаживания (1) в функциональной зависимости от переменных интервалов измерений. Для сглаживания угловых движений судна аргументами функциональных зависимостей весовых коэффициентов следует использовать интервалы времени между измерениями. Для сглаживания элементов поступательных перемещений аргументами функциональных зависимостей весовых коэффициентов следует использовать интервалы между измерениями в виде пройденного расстояния, на котором изменяются значения элементов перемещения (скорость, координаты).

Тогда выражения весового скользящего среднего сглаживания (1) для измеряемых параметров по трем точкам можно записать в форме сглаживающего фильтра Хэмминга (2)

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-1}}{t_{-1}}x_{i-1} + p_0x_i + \frac{p_{+1}}{t_{+1}}x_{i+1}, \quad (4)$$

где t_{i-1} , t_{i+1} – интервалы измерений (время или расстояние) относительно среднего измерения в интервале сглаживания;

p_0, p_{-1}, p_{+1} – определяемые постоянные составляющие весовых коэффициентов измерений в интервале сглаживания.

Если постоянные составляющие весовых коэффициентов выбирать из табл.1, то при их постоянстве и симметрии относительно среднего измерения в выражении (4) общее значение весовых коэффициентов в совокупности будут переменными и уменьшаться на величину интервалов измерений. Таким образом, чем больше значение интервала измерений, тем меньше будет влияние данного измерения на оцениваемое среднее значение в (4).

Если в выражениях (2)-(4) коэффициент сглаживания (p_0) текущей (i -той) переменной взять как общий множитель суммы правых частей или принять равным единице, то останется только два коэффициента подлежащих определению, т.е. выражение (4) примет вид:

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1}. \quad (5)$$

Если в выражениях (4), (5) вместо исходного измерения использовать результат предыдущего сглаженного значения, то получаются новые варианты фильтров, по принципам подобные процессу экспоненциального сглаживания [11]

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} + p_0 x_i; \quad (6)$$

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1}. \quad (7)$$

Анализ исследований [5] показывает, что выбором весовых коэффициентов выражение весового скользящего среднего сглаживания (1) можно привести к последнему результату в интервале сглаживания и для измеряемых параметров по трем точкам, соответствующие сглаживающие фильтры аналогично выражениям (4), (5) запишутся в следующем виде

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-2}}{t_{i-2}} x_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + p_0 x_i; \quad (8)$$

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-2}}{t_{i-2}} x_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + x_i, \quad (9)$$

где t_{i-1}, t_{i-2} – интервалы измерений (время или расстояние) относительно последнего значения в интервале сглаживания;

p_0, p_{-1}, p_{-2} – определяемые постоянные составляющие весовых коэффициентов измерений в интервале сглаживания.

В выражениях (8), (9) одно или два предыдущих значения в интервале сглаживания можно заменить результатами предыдущего сглаживания и получить новые варианты фильтров подобных выражениям (6), (7)

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-2}}{t_{i-2}} \hat{x}_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + p_0 x_i; \quad (10)$$

$$\hat{x}_i = \frac{p_{-2}}{t_{i-2}} \hat{x}_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + x_i. \quad (11)$$

Выражения (4), (5), (11), (13) для сглаживания рядов данных в форме с общим множителем (3), равным сумме весов (см. табл.1) примут следующий вид

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + p_0 x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} \right) / \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + p_0 + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} \right); \quad (12)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} \right) / \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + 1 + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} \right); \quad (13)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + p_0 x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} \right) / \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + p_0 + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} \right); \quad (14)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} \right) / \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + 1 + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} \right); \quad (15)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} x_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + p_0 x_i \right) / \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + p_0 \right); \quad (16)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} x_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + x_i \right) / \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + 1 \right); \quad (17)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} \hat{x}_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + p_0 x_i \right) / \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + p_0 \right); \quad (18)$$

$$\hat{x}_i = \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} \hat{x}_{i-2} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + x_i \right) / \left(\frac{p_{-2}}{t_{i-2}} + \frac{p_{-1}}{t_{i-1}} + 1 \right). \quad (19)$$

Оценка коэффициентов весового сглаживания рядов навигационных данных

Постоянные составляющие весовых коэффициентов выражений (4)-(19), как неизвестные, можно оценить по результатам текущих измерений с помощью метода наименьших квадратов (МНК), т.е. минимизацией функционала в виде суммы квадратов погрешностей сглаживания, который для выражения (4) примет вид [8]:

$$Q = \sum_1^n \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + p_0 x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} - \hat{x}_i \right)^2 \rightarrow \min, \quad (20)$$

где Q - суммы квадратов погрешностей сглаживания.

Минимум функционала (20) обеспечивается при равенстве нулю его частных производных по искомым коэффициентам

$$\frac{\partial Q}{\partial p_{-1}} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial p_0} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial p_{+1}} = 0. \quad (21)$$

После нахождения частных производных (21) от выражения (20) в результате получается три нормальных уравнения для определения коэффициентов сглаживания непосредственно по совокупности n - измерений сглаживаемого ряда

$$\left. \begin{aligned} p_{-1} \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}} \right)^2 + p_0 \sum_1^n \frac{x_i x_{i-1}}{t_{i-1}} + p_{+1} \sum_1^n \frac{x_{i-1} x_{i+1}}{t_{i-1} t_{i+1}} - \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i-1}}{t_{i-1}} &= 0; \\ p_{-1} \sum_1^n \frac{x_i x_{i-1}}{t_{i-1}} + p_0 \sum_1^n x_i^2 + p_{+1} \sum_1^n \frac{x_i x_{i+1}}{t_{i+1}} - \sum_1^n \hat{x}_i x_i &= 0; \\ p_{-1} \sum_1^n \frac{x_{i-1} x_{i+1}}{t_{i-1} t_{i+1}} + p_0 \sum_1^n \frac{x_i x_{i+1}}{t_{i+1}} + p_{+1} \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}} \right)^2 - \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i+1}}{t_{i+1}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Решение системы нормальных уравнений (22) методом определителей (по правилу Крамера) дает выражения весовых коэффициентов сглаживания по результатам измеренного ряда навигационных данных

$$p_{-1} = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}; p_0 = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}; p_{+1} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}; \quad (23)$$

$$a_{11} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}}\right)^2; a_{22} = \sum_1^n x_i^2; a_{33} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}}\right)^2;$$

$$b_1 = \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i-1}}{t_{i-1}}; b_2 = \sum_1^n \hat{x}_i x_i; b_3 = \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i+1}}{t_{i+1}}; \quad (24)$$

$$a_{12} = a_{21} = \sum_1^n \frac{x_i x_{i-1}}{t_{i-1}}; a_{13} = a_{31} = \sum_1^n \frac{x_{i-1} x_{i+1}}{t_{i-1} t_{i+1}}; a_{23} = a_{32} = \sum_1^n \frac{x_i x_{i+1}}{t_{i+1}}.$$

Весовые коэффициенты сглаживания в выражениях (6) определяются аналогичным образом по МНК (20)-(24), в которых вместо предыдущего измерения (x_{i-1}) используется его сглаженное значение (\hat{x}_{i-1}).

При сглаживании измерений для конечной точки в интервале из трех (8) значения коэффициентов (24) нормальных уравнений (22) в выражениях (23) примут следующий вид

$$a_{11} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-2}}{t_{i-2}}\right)^2; a_{22} = \sum_1^n x_i^2; a_{33} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}}\right)^2;$$

$$b_1 = \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i-2}}{t_{i-2}}; b_2 = \sum_1^n \hat{x}_i x_i; b_3 = \sum_1^n \frac{\hat{x}_i x_{i-1}}{t_{i-1}}; \quad (25)$$

$$a_{12} = a_{21} = \sum_1^n \frac{x_i x_{i-2}}{t_{i-2}}; a_{13} = a_{31} = \sum_1^n \frac{x_{i-2} x_{i-1}}{t_{i-2} t_{i-1}}; a_{23} = a_{32} = \sum_1^n \frac{x_i x_{i-1}}{t_{i-1}}.$$

Весовые коэффициенты сглаживания в выражении (10) определяются аналогичным образом по МНК (20)-(24), а в выражениях (25) вместо предыдущих измерений (x_{i-1}, x_{i-2}) используются их сглаженные значения ($\hat{x}_{i-1}, \hat{x}_{i-2}$), соответственно.

Для выражений (5), (7), (9), (11) с двумя искомыми значениями коэффициентов сглаживания функционал (20) примет явный вид минимизации суммы квадратов погрешностей сглаживания, результат которой сводится к решению двух нормальных уравнений

$$Q = \sum_1^n \left(\frac{p_{-1}}{t_{i-1}} x_{i-1} + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1} + (x_i - \hat{x}_i)\right)^2 \rightarrow \min; \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{-1} \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}}\right)^2 + p_{+1} \sum_1^n \frac{x_{i-1} x_{i+1}}{t_{i-1} t_{i+1}} + \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i) x_{i-1}}{t_{i-1}} &= 0; \\ p_{-1} \sum_1^n \frac{x_{i-1} x_{i+1}}{t_{i-1} t_{i+1}} + p_{+1} \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}}\right)^2 + \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i) x_{i+1}}{t_{i+1}} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Решение системы нормальных уравнений (27) методом определителей (по правилу Крамера) дает выражения весовых коэффициентов сглаживания по результатам измеренного ряда навигационных данных

$$p_{-1} = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} \\ b_2 & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}; \quad p_{+1} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & b_1 \\ a_{21} & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}; \quad (28)$$

$$a_{11} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}} \right)^2; \quad a_{22} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}} \right)^2; \quad a_{12} = a_{21} = \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}}; \quad (29)$$

$$b_1 = \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}}; \quad b_2 = \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i+1}}{t_{i+1}}.$$

Весовые коэффициенты сглаживания в выражении (7) определяются аналогичным образом по МНК (20)-(24), а в выражениях (29) вместо предыдущих измерений (x_{i-1}) используются их сглаженные значения (\hat{x}_{i-1}).

Для сглаживающего фильтра (9) выражения (29) примут вид

$$a_{11} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}} \right)^2; \quad a_{22} = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-2}}{t_{i-2}} \right)^2; \quad a_{12} = a_{21} = \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i-2}}{t_{i-1}t_{i-2}}; \quad (30)$$

$$b_1 = \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}}; \quad b_2 = \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i-2}}{t_{i-2}}.$$

Для сглаживающего фильтра (11) в выражениях (30) вместо предыдущих измерений (x_{i-1} , x_{i-2}) используются их сглаженные значения (\hat{x}_{i-1} , \hat{x}_{i-2}).

Результаты весового сглаживания рядов навигационных данных

Результаты оценки значений постоянных составляющих весовых коэффициентов сглаживания различными методами для измерений скорости судна по натурным данным (<http://www.marinetraffic.com>) с переменным интервалом измерений в виде расстояния приведены в табл.2.

Сравнительные результаты сглаживания значений скорости судна скользящей весовой средней по выражениям (4)-(11), (14), (15), (19) с полученными весовыми коэффициентами в табл.2 представлены на рис.1 и в увеличенном масштабе на нелинейном участке начала разгона судна на рис.2, в скобках указаны номера выражений сглаживания. В табл.2 также приведены средние квадратические отклонения (СКО) измеренных и сглаженных данных.

Таблица 2

Средние квадратические отклонения (СКО) измеренных и сглаженных данных

Выражения сглаживания (номер)	Значения весовых коэффициентов сглаживания				СКО, уз.
	p_0	p_{-1}	p_{+1}	p_{-2}	
(4)	0,982	0,003	0,003	-	0,1
(5)	1	0,003	0,003	-	0,07
(6)	0,983	0,003	0,003	-	0,1
(7)	1	0,001	0,001	-	0,09
(8)	0,98	0,004	-	0,02	0,09
(9)	1	0,004	-	0,01	0,09
(10)	0,98	0,004	-	0,01	0,12
(11)	1	0,002	-	0,01	0,06
(14)	0,982	0,04	0,04	-	0,09
(15)	1	0,04	0,04	-	0,09
(19)	1	0,002	-	0,02	0,06

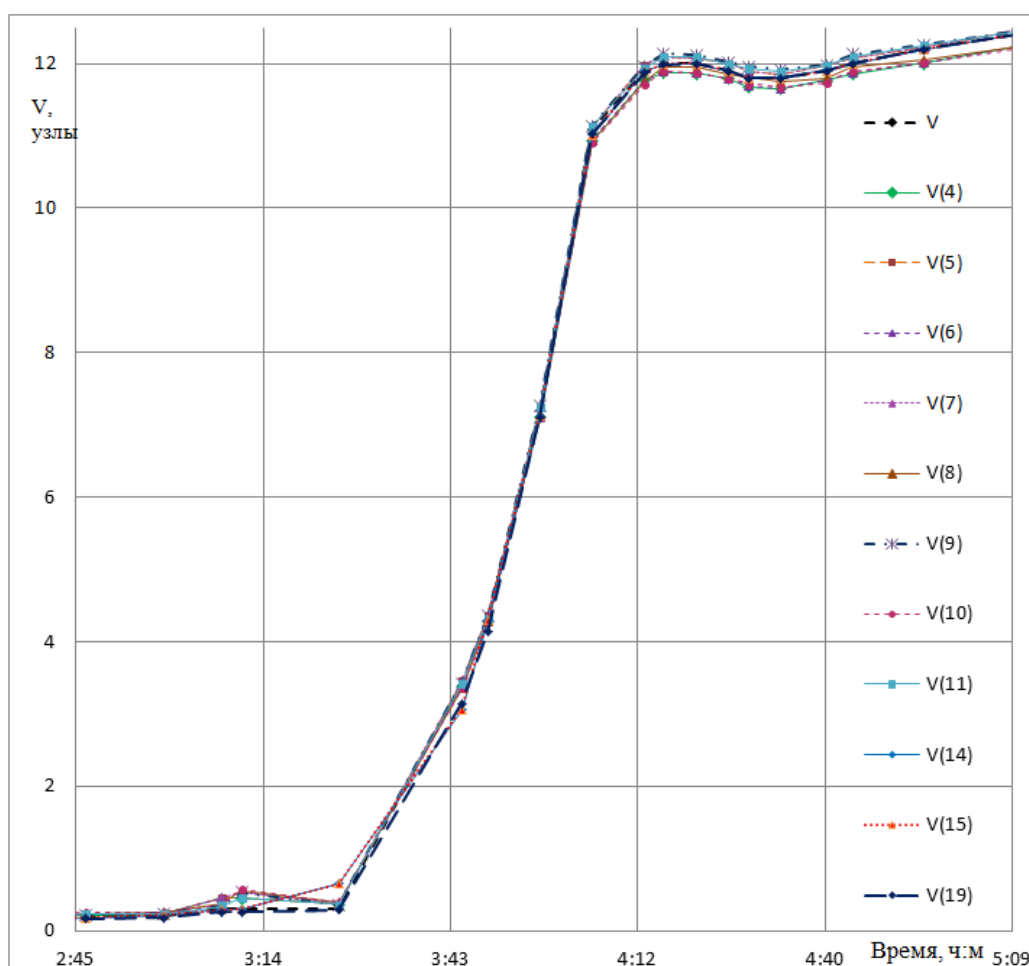


Рис.1. Сглаживание скользящей весовой средней скорости судна с переменным интервалом измерений в виде расстояния: V – измерения скорости (в узлах)

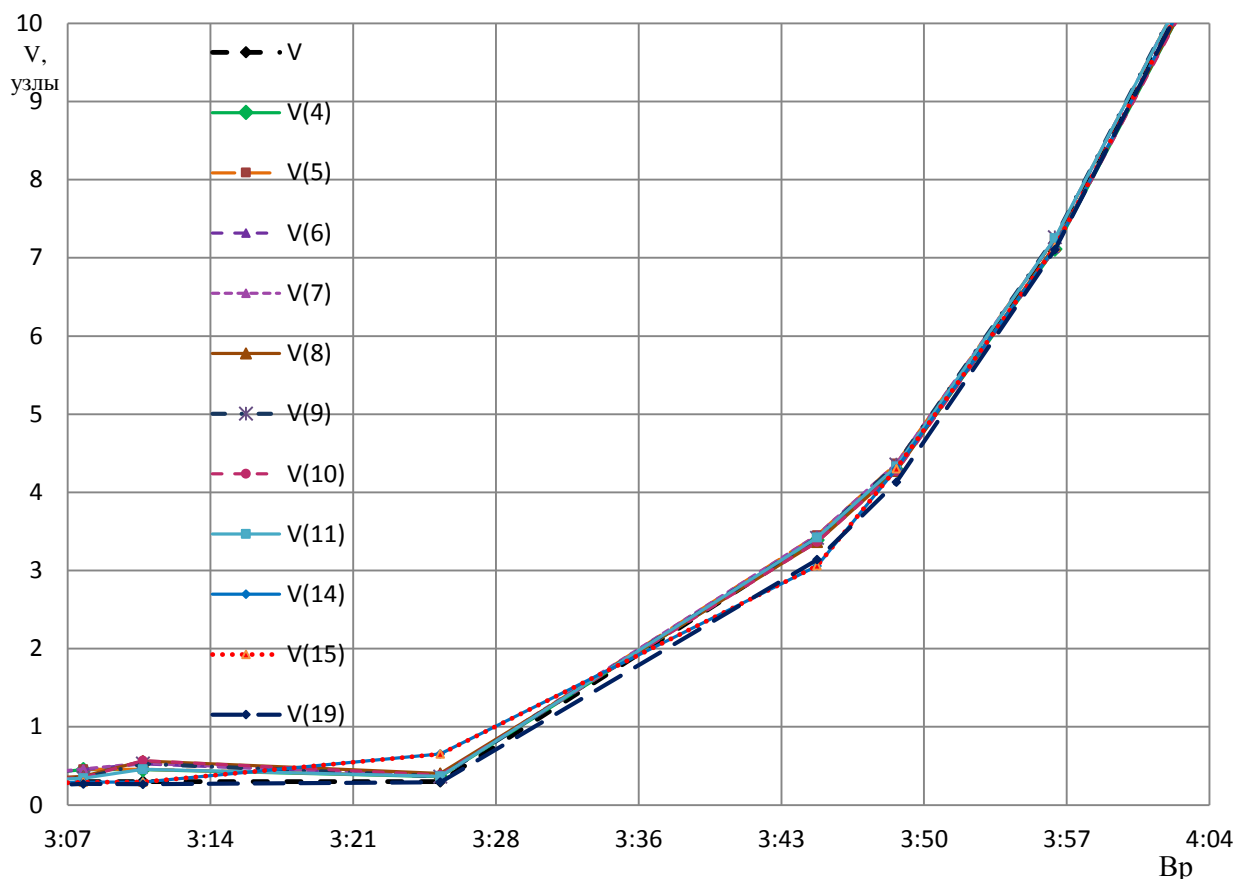


Рис.2. Сглаживание скользящей весовой средней скорости судна в начале разгона с переменным интервалом измерений в виде расстояния: V – измерения скорости (в узлах)

Оцененные значения постоянных составляющих весовых коэффициентов сглаживания для измерений курса судна по натурным данным (<http://www.marinetraffic.com>) с переменным интервалом измерений в виде времени приведены в табл.3.

Таблица 3

Оцененные значения постоянных составляющих весовых коэффициентов сглаживания для измерений курса судна по натурным данным (<http://www.marinetraffic.com>) с переменным интервалом измерений в виде времени

Выражения сглаживания (номер)	Значения весовых коэффициентов сглаживания				СКО, град.
	p_0	p_{-1}	p_{+1}	p_{-2}	
(4)	0,98	0,001	0,001	-	2,5
(5)	1	0,0003	0,0003	-	2,0
(6)	0,98	0,001	0,001	-	2,5
(7)	1	0,0003	0,0003	-	2,0
(8)	0,98	0,001	-	0,001	3,0
(10)	0,98	0,001	-	0,001	3,3
(11)	1	0,0005	-	0,0005	2,1
(15)	1	0,04	0,04	-	3,4
(19)	1	0,02	-	0,04	3,8

Сравнительные результаты сглаживания значений курса судна скользящей весовой средней по выражениям (4), (10), (11), (15)-(19) с полученными весовыми коэффициентами в табл.3 представлены на рис.3 (в скобках указаны номера выражений сглаживания).

На линейных участках изменений скорости и курса данные сглаживания всеми методами практически совпадают со средними квадратическими отклонениями $0,06 \div 0,12$ уз. и $2^\circ \div 4^\circ$, соответственно (см. табл. 2, 3). На нелинейных участках изменений скорости и курса данные сглаживания лучше по выражениям (5), (11), (14), (15), (19). Кроме того, из рис.1, 2, 3 видно, что выражения для сглаживания (14), (15), (19), представленные с общим множителем, реально обладают свойствами сглаживающих фильтров. Они дают плавные изменения значений сглаживаемых данных при тех же СКО (см. рис.2).

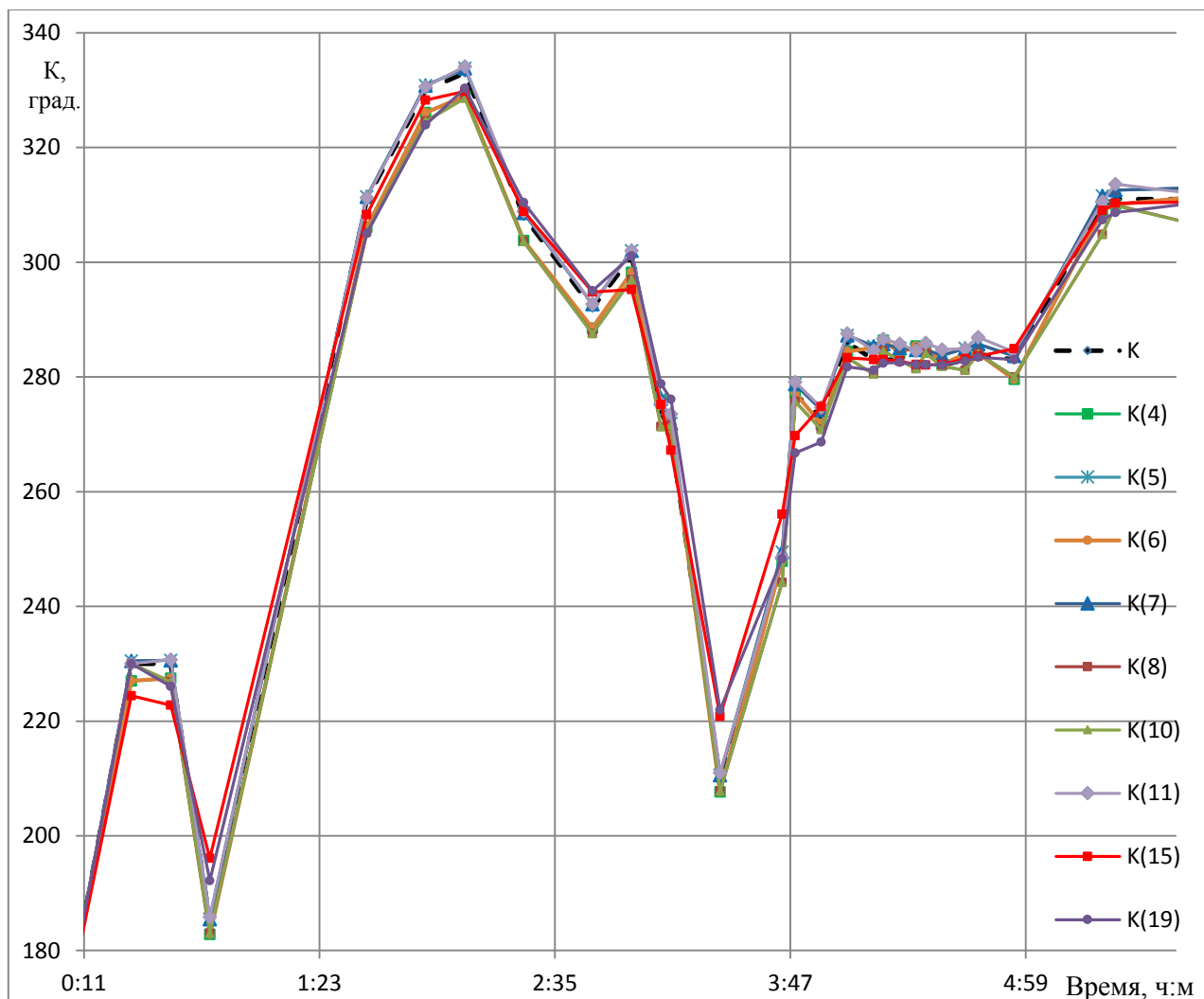


Рис.3. Сглаживание скользящей весовой средней значений курса судна с переменным интервалом измерений в виде времени: *K* – измерения курса (в градусах)

Дальнейшее совершенствование качества сглаживания рядов навигационных данных может осуществляться текущей адаптацией значений весовых коэффициентов в процессе сглаживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов [Текст].- М.: Мир, 1976.- 757 с.
2. Васьков А.А. Разделение задач управления движением судна [Текст]/ А.А.Васьков, А.С.Васьков// Изв.вузов Сев.Кавк. рег. Техн.науки, 2002.- Спецвыпуск.- С.51-54.
3. Васьков А.С. Исследование линейной модели движения и адаптивного управления судном по траектории/ Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н.- Л.: ЛВИМУ, 1982.- 24 с.
4. Васьков А.С. Оценка погрешностей измерений и вычислений в судовождении: Лабораторный практикум [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник, А.А.Мироненко, С.В.Скороходов.- Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2010.- 68 с.
5. Васьков А.С. Обзор методов сглаживания навигационных данных [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Вестник ГМУ им.адм.Ф.Ф. Ушакова.-2013.-№2(3).- с.21-24.
6. Васьков В.А. Поэтапная аппроксимация уравнений задания траектории движения судна [Текст]/ В.А.Васьков, А.А.Мироненко// Эксплуатация морского транспорта, 2010.- № 3(61).- С.21 – 26.
7. Дронов С.В. Многомерный статистический анализ [Текст].- Барнаул: Алт.гос. ун-т, 2003.- 246 с.
8. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования в экономике [Текст]/ Т.А.Дуброва, М.Ю.Архипова. — М.: МГУЭСИ, 2004. — 136 с.
9. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды [Текст]/ М.Кендалл, А.Стьюарт.- М.: Наука, 1976.- 736 с.
10. Куприенко Н.В. Статистика. Анализ рядов динамики [Текст]/ Н.В.Куприенко, О.А.Пономарева, Д.В.Тихонов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 204 с.
11. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов [Текст]. - М.: Финансы и статистика, 2003.- 416 с.
12. Миненко А.С. Метод построения взвешенных временных рядов для решения задачи прогнозирования [Текст]/ А.С.Миненко, Е.В.Волченко, С.А.Шишкин// Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2012.- №2/4 (56).- С.4-10.
13. Мироновский Л.А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений [Текст]/ Л.А.Мироновский, В.А.Слаев. — СПб.: Професионал, 2010. — 192 с.
14. Розенберг Г.С. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов) [Текст]/ Г.С.Розенберг, В.К.Шитиков, П.М.Брусиловский.- Тольятти, 1994. - 182 с.
15. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст].- М.: Наука, 1971.- 192 с.
16. Христиановский В.В. Анализ временных рядов в экономике: практика применения [Текст]/ В.В. Христиановский, В.П. Щербина. – Донецк: ДонНУ, 2011. – 125 с.
17. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования [Текст]. – М.: Статистика, 1977.- 200 с.

Рецензент: Самойленко Анатолий Юрьевич, профессор кафедры «Эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации», д.т.н., ФГБОУ ВПО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова», Россия, Новороссийск.

Anatoliy Vaskov

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education
«Admiral Ushakov Maritime State University»
Russia, Novorossiysk
E-Mail: as.vaskov@mail.ru

Viktor Melnik

Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education
«Admiral Ushakov Maritime State University»
Russia, Novorossiysk
E-Mail: viktor-melnik71@yandex.ru

Weight smoothing of navigational data with variable intervals of measurements

Abstract. Methods of adaptation are observed for weight sliding average smoothing of time series of navigational data with variable intervals of measurements. The smoothing purpose is compensation of errors and effect of external factors on vessel's motions. The sliding interval of smoothing includes three measurements, it ensures conservation of small changes in time series. The new approach is offered for definition coefficients of weight smoothing, which is reduced to their tuning in inverse proportion to variable intervals of measurements (a time – for angular motion, a pass distance - for linear motion). As a result there will be less effect of measurements on a estimated process average for the big intervals of measurements. Constant components of weight coefficients of smoothing are defined on current measurements by a least squares method. Outcomes of modeling show good convergence of sliding weight average smoothing with floating coefficients for time series of navigational data about vessel's motion (a heading, a speed). The best working capacity is observed for the formulas of weight smoothing presented with the common multiplier from weight coefficients.

Keywords: navigational data; heading; speed; weight average smoothing; interval of measurements; smoothing interval; least squares method.

Identification number of article 60TVN414

REFERENCES

1. Anderson T. Statisticheskij analiz vremennyh rjadov [Tekst].- M.: Mir, 1976.- 757 s.
2. Vas'kov A.A. Razdelenie zadach upravlenija dvizheniem sudna [Tekst]/ A.A.Vas'kov, A.S.Vas'kov// Izv.vuzov Sev.Kavk. reg. Tehn.nauki, 2002.- Specvypusk.- S.51-54.
3. Vas'kov A.S. Issledovanie linejnoy modeli dvizhenija i adaptivnogo upravlenija sudnom po traektorii/ Avtoref. diss. na soisk. uch. st. k.t.n.- L.: LVIMU, 1982.- 24 s.
4. Vas'kov A.S. Ocenka pogreshnostej izmerenij i vychislenij v sudovozhdenii: Laboratornyj praktikum [Tekst]/ A.S.Vas'kov, V.G.Mel'nik, A.A.Mironenko, S.V.Skorohodov.– Novorossijsk: GMU im. adm. F.F.Ushakova, 2010.- 68 s.
5. Vas'kov A.S. Obzor metodov sglazhivaniya navigacionnyh dannyh [Tekst]/ A.S.Vas'kov, V.G.Mel'nik// Vestnik GMU im.adm.F.F. Ushakova.-2013.-№2(3).- s.21-24.
6. Vas'kov V.A. Pojetapnaja approksimacija uravnenij zadaniya traektorii dvizhenija sudna [Tekst]/ V.A.Vas'kov, A.A.Mironenko// Jekspluatacija morskogo transporta, 2010.- № 3(61).- S.21 – 26.
7. Dronov S.V. Mnogomernyj statisticheskij analiz [Tekst].- Barnaul: Alt.gos. un-t, 2003.- 246 s.
8. Dubrova T.A. Statisticheskie metody prognozirovaniya v jekonomike [Tekst]/ T.A.Dubrova, M.Ju.Arhipova. — M.: MGUJeSI, 2004. — 136 s.
9. Kendall M. Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye rjady [Tekst]/ M.Kendall, A.St'juart.- M.: Nauka, 1976.- 736 s.
10. Kuprienko N.V. Statistika. Analiz rjadov dinamiki [Tekst]/ N.V.Kuprienko, O.A.Ponomareva, D.V.Tihonov. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. – 204 s.
11. Lukashin Ju.P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennyh rjadov [Tekst]. - M.: Finansy i statistika, 2003.- 416 s.
12. Minenko A.S. Metod postroenija vzveshennyh vremennyh rjadov dlja reshenija zadachi prognozirovaniya [Tekst]/ A.S.Minenko, E.V.Volchenko, S.A.Shishkin// Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2012.- №2/4 (56).- S.4-10.
13. Mironovskij L.A. Algoritmy ocenivaniya rezul'tata treh izmerenij [Tekst]/ L.A.Mironovskij, V.A.Slaev. — SPb.: Professional, 2010. — 192 s.
14. Rozenberg G.S. Jekologicheskoe prognozirovanie (Funkcional'nye prediktory vremennyh rjadov) [Tekst]/ G.S.Rozenberg, V.K.Shitikov, P.M.Brusilovskij.- Tol'jatti, 1994. - 182 s.
15. Rumshinskij L.Z. Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov jeksperimenta [Tekst].- M.: Nauka, 1971.- 192 s.
16. Hristianovskij V.V. Analiz vremennyh rjadov v jekonomike: praktika primenenija [Tekst]/ V.V. Hristianovskij, V.P. Shherbina. – Doneck: DonNU, 2011. – 125 s.
17. Chetyrkin E.M. Statisticheskie metody prognozirovaniya [Tekst]. – M.: Statistika, 1977.- 200 s.