

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ АЗИМУТАЛЬНОГО КАНАЛА ПЕШЕХОДНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. Ю. КАПЛИН, М. Г. СТЕПАНОВ

ОАО „Радиоавионика“, 190005, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: smg099@mail.ru

Рассматривается задача обеспечения высокой точности определения текущего азимута в пешеходной навигационной системе. Сформирована корректная модель азимутального канала системы, состоящей из цифрового магнитного компаса, модуля спутниковой навигации и датчика угловых скоростей. Предложен алгоритм комплексной обработки информации канала с использованием базового варианта фильтра Калмана. Особое внимание при определении значения азимута уделено процедуре оценивания и компенсации систематической ошибки магнитного компаса. Предложения и выводы подтверждаются результатами априорной оценки точности обработки информации азимутального канала при различных магнитных искажениях и точностных характеристиках датчиков.

Ключевые слова: пешеходная навигационная система, азимутальный канал, калмановский алгоритм обработки, датчик угловых скоростей, цифровой магнитный компас, модуль спутниковой навигации

Введение. В практике навигационного обеспечения подвижных наземных объектов широкое распространение получают комплексные системы, сочетающие в себе методы и средства бесплатформенной инерциальной навигации и спутниковой радионавигации, а также использование магнитных компасов [1, 2]. Среди таких систем в силу специфики выделяются индивидуальные пешеходные системы, предназначенные для наземной навигации различных вариантов движения человека (например, спортсмена, незрячего человека, путешественника, офисного работника внутри помещения и др.) [3]. Особый интерес представляют пешеходные навигационные системы специального применения (для отдельных военнослужащих, сотрудников МЧС и т.д.) [4].

Основными каналами пешеходной навигационной системы (ПНС) являются взаимосвязанные канал счисления пройденного пути и азимутальный канал [5], совместная обработка информации которых дает текущие координаты пешехода.

В настоящей статье представлены результаты создания несложной модели азимутального канала и разработки на ее основе наглядного и простого в реализации алгоритма комплексной обработки измерений, формируемых входящими в состав канала компонентами (датчиками). Это позволяет расчетным путем произвести априорную оценку точности определения азимута движения пешехода и предложить рациональное сочетание доступных, приемлемых по точностным характеристикам компонентов.

Модель азимутального канала. Основными компонентами азимутального канала ПНС являются трехосевые соосные датчик угловых скоростей (ДУС) и цифровой магнитный компас (ЦМК), а также модуль спутниковой навигации (МСН), определяющий путевой угол (аналог азимута). Важным компонентом ПНС является инклинометр (например, акселерометрический), фиксирующий начальную угловую ориентацию компонентов системы. В дальнейшем наличие инклинометра учитывается, но подробно не анализируется.

Введем в рассмотрение связанную систему координат $o\xi\eta\zeta$ с началом в центре масс ПНС. Оси $o\xi$, $o\eta$ лежат в плоскости местного горизонта, причем ось $o\eta$ совпадает с направлением движения пешехода, а ось $o\zeta$ — с местной вертикалью. При использовании данной системы координат предполагается совпадение осей чувствительности ДУС и ЦМК с соответствующими осями $o\xi$, $o\eta$, $o\zeta$. На практике приведение системы в горизонтальное положение (компенсация углов тангажа и крена, возникающих при движении пешехода) обеспечивается пересчетом текущих данных ДУС и ЦМК по измерениям угловых скоростей $\omega_{\xi}^{\text{ДУС}}$, $\omega_{\eta}^{\text{ДУС}}$ с учетом начальных углов ориентации ПНС.

В рамках сделанных допущений измерения, формируемые азимутальным каналом, можно представить совокупностью приведенных к горизонтальной плоскости дискретных отсчетов (k) азимута $\alpha_k^{\text{ЦМК}}$, $\alpha_k^{\text{МСН}}$ и угловой скорости $\omega_{\zeta,k}^{\text{ДУС}}$, формируемых ЦМК, МСН и ДУС соответственно. До начала комплексной обработки измерений осуществляются ввод калибровочных и расчетных поправок (магнитного склонения и др.), независимое по измеряемым параметрам предварительное сглаживание и сжатие результатов и их привязка к единой временной шкале с одинаковым шагом $T = t_k - t_{k-1}$. Поскольку частота поступления данных, формируемых ЦМК и ДУС, в большинстве случаев превышает частоту поступления данных МСН, целесообразно в качестве единого выбрать шаг $T = T_{\text{МСН}}$ модуля (обычно это 0,1—1 с, что вполне достаточно для пешеходной навигации).

Текущее измерение азимута $\alpha_k^{\text{ЦМК}}$ представим суммой

$$\alpha_k^{\text{ЦМК}} = \alpha_k + \Delta\alpha_k + v_k, \quad k=1, 2, \dots, \quad (1)$$

где α_k — истинное значение азимута; $\Delta\alpha_k$ — систематическая ошибка; $v_k \sim N(0, \sigma_{\text{ЦМК}})$ — дискретная некоррелированная нормально распределенная ошибка с нулевым математическим ожиданием и СКО $\sigma_{\text{ЦМК}}$.

Измерение $\alpha_k^{\text{МСН}}$ осуществляется по формуле

$$\alpha_k^{\text{МСН}} = \alpha_k + \mu_k, \quad (2)$$

где $\mu_k \sim N(0, \sigma_{\text{МСН}})$.

Угловая скорость $\omega_{\zeta,k}^{\text{ДУС}}$ определяется как

$$\omega_{\zeta,k}^{\text{ДУС}} = \omega_{\zeta,k} + \varepsilon_{\zeta,k}, \quad (3)$$

где $\omega_{\zeta,k}$ — истинное значение угловой скорости; $\varepsilon_{\zeta,k} \sim N(0, \sigma_{\omega})$.

Наличие систематической ошибки $\Delta\alpha_k$ только в измерительных отсчетах $\alpha_k^{\text{ЦМК}}$ объясняется определяющим вкладом ЦМК в общую сумму систематических погрешностей канала [6, 7]. Ошибка $\Delta\alpha_k$ складывается из значительных по величине составляющих, таких как инструментальные и конструктивные ошибки, остаточные погрешности калибровки, и, главное, ошибки, вызванной различного рода искажениями магнитного поля (магнитной аномалией). (Более подробно этот вопрос рассматривается далее.)

В то же время при использовании современных МЭМС-гироскопов промышленного, тактического и, тем более, навигационного типов [8] вкладом погрешностей дрейфа, традиционно считающихся значимыми, на интервале навигации объектов, по сравнению с погрешностями ЦМК, можно пренебречь. Что касается МСН, где путевой угол определяется отношением приращений текущих координат, систематическая ошибка обычно невелика и снижается с увеличением длины пройденного пути.

Выражения (1)—(3) являются исходными для комплексной обработки измерений, результатом которой должны стать оценки $\hat{\alpha}_k$, $\Delta\hat{\alpha}_k$ текущих значений параметров α_k , $\Delta\alpha_k$. Очевидно, что при формировании оценки $\hat{\alpha}_k$ требуется одновременное раздельное определение оценки $\Delta\hat{\alpha}_k$ и ее устранение из состава $\hat{\alpha}_k$.

Обратимся к статистической динамике оцениваемых параметров.

Анализ динамики азимута α проведем с использованием предложенного в работе [9] метода замены неизвестного управления измерением. Этот метод применяется при решении широкого круга прикладных задач навигации (см., например, работу [5]).

Между азимутом α и угловой скоростью ω_ζ существует очевидная дифференциальная связь

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \omega_\zeta(t) \quad \text{при} \quad \alpha_0 = \alpha(t_0), \quad (4)$$

где t_0 — начальный момент времени.

При известной функции $\omega_\zeta(t)$ (известном управлении) соотношение (4) может быть исходным для составления исчерпывающей динамической модели процесса $\alpha(t)$. Поскольку реально значение $\omega_\zeta(t)$ не известно, то в соответствии с теоремой разделения [10] и принципом распределения информации [9] оно заменяется на значение $\omega_\zeta^{\text{ДУС}}(t)$, измеренное ДУС, с последующим учетом присущей ему ошибки $\varepsilon_\zeta(t)$ (см. выражение (3)).

Тогда уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \omega_\zeta^{\text{ДУС}}(t) - \varepsilon_\zeta(t), \quad (5)$$

откуда при переходе к конечным разностям получим

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} - T\varepsilon_{\zeta,k-1} \quad \text{при} \quad \alpha_0 = \alpha(t_0).$$

При анализе ошибки $\Delta\alpha_k$ возможны два варианта. Первый соответствует ситуации, когда инструментальная, конструктивная и калибровочная составляющие постоянны, а ориентация ЦМК относительно внешнего постоянного источника магнитного искажения (искажение „твердого железа“) неизменна. В этом случае $\Delta\alpha_k$ — величина постоянная, т.е. $\Delta\alpha_k = \Delta\alpha_{k-1} = \Delta\alpha$.

Более сложная ситуация наблюдается при относительном перемещении ЦМК и источника искажения (что характерно для специальных применений) и наличии посторонних предметов, не являющихся источником собственного магнитного поля (никель, пермаллой и т.п.), но искажающих имеющееся (искажение „мягкого железа“). Анализ результатов практического применения ЦМК показывает, что в подобных условиях ошибка $\Delta\alpha_k$ не постоянна, а ее динамика корректно описывается моделью винеровского процесса [11]

$$\Delta\alpha_k = \Delta\alpha_{k-1} + \delta_{k-1},$$

представляющего собой однородный гауссов процесс с независимыми приращениями $\delta_k \sim N(0, \sigma_{\Delta\alpha}^2)$, дисперсия $\sigma_{\Delta\alpha}^2$ которого прямо пропорциональна интервалу $T = t_k - t_{k-1}$ ($\sigma_{\Delta\alpha}^2 = \lambda T$, где λ — коэффициент пропорциональности). Очевидно, что первый вариант является частным случаем второго при $\sigma_{\Delta\alpha} = 0$.

Переходя к принятому в оптимальной фильтрации описанию процессов в переменных состояния, объединим приведенные выше соотношения, представив модель азимутального канала в виде уравнений состояния и наблюдения (измерения).

Уравнение состояния запишем следующим образом:

$$x_k = \Phi x_{k-1} + D u_{k-1} + \Gamma v_{k-1} \text{ при } x_0 = x(t_0), \quad (6)$$

где $x_k = [\alpha_k, \Delta\alpha_k]^T$ — вектор оцениваемых параметров (вектор состояния); $u_k = [\omega_{\zeta,k}^{\text{ДУС}}, 0]^T$ — известный вектор управления; $v_k = [\varepsilon_{\zeta,k}, \delta_k]^T$ — вектор шумов возмущения; Φ, D, Γ — матрицы состояния:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} -T & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение наблюдения имеет вид

$$y_k = H x_k + n_k, \quad (7)$$

где $y_k = [\alpha_k^{\text{ЦМК}}, \alpha_k^{\text{МСН}}]^T$ — вектор наблюдения; $n_k = [v_k, \mu_k]^T$ — вектор шумов наблюдения; H — матрица наблюдения:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Модель (6), (7) является основой представленного далее алгоритма комплексной обработки информации азимутального канала ПНС.

Алгоритм комплексной обработки. При выводе алгоритма воспользуемся базовым вариантом фильтра Калмана [10, 12], конкретизировав его применительно к модели (6), (7). Опуская стандартные промежуточные преобразования, приведем конечный вид оптимального калмановского алгоритма обработки в простой и наглядной скалярной форме:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_k &= \hat{\alpha}_{k-1} + K_{11,k} \left(\alpha_k^{\text{ЦМК}} - \hat{\alpha}_{k-1} - \Delta\hat{\alpha}_{k-1} - T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} \right) + \\ &+ K_{12,k} \left(\alpha_k^{\text{МСН}} - \hat{\alpha}_{k-1} - T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} \right) + T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} \text{ при } \hat{\alpha}_0 = \hat{\alpha}(t_0); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\alpha}_k &= \Delta\hat{\alpha}_{k-1} + K_{21,k} \left(\alpha_k^{\text{ЦМК}} - \hat{\alpha}_{k-1} - \Delta\hat{\alpha}_{k-1} - T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} \right) + \\ &+ K_{22,k} \left(\alpha_k^{\text{МСН}} - \hat{\alpha}_{k-1} - T\omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}} \right) \text{ при } \Delta\hat{\alpha}_0 = \Delta\hat{\alpha}(t_0), \end{aligned} \quad (10)$$

где $K_{11,k}, \dots, K_{22,k}$ — весовые коэффициенты, являющиеся элементами матрицы

$$K_k = \begin{bmatrix} K_{11,k} & K_{12,k} \\ K_{21,k} & K_{22,k} \end{bmatrix},$$

рассчитываемой по формуле

$$K_k = P_k H^T R^{-1}. \quad (11)$$

Здесь

$$P_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{\alpha},k}^2 & P_{12,k}^2 \\ P_{12,k}^2 & \sigma_{\Delta\hat{\alpha},k}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

— симметрическая ковариационная матрица ошибок оценок $\hat{\alpha}_k, \Delta\hat{\alpha}_k$;

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{\text{ЦМК}}^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{\text{МСН}}^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

— матрица, обратная матрице дисперсий случайных ошибок измерений азимута $\alpha_k^{\text{ЦМК}}, \alpha_k^{\text{МСН}}$.

Подставив выражения (12), (8), (13) в формулу (11), получим

$$K_{11,k} = \frac{\sigma_{\hat{\alpha},k}^2 + P_{12,k}^2}{\sigma_{\text{ЦМК}}^2}; K_{12,k} = \frac{\sigma_{\hat{\alpha},k}^2}{\sigma_{\text{МСН}}^2}; K_{21,k} = \frac{\sigma_{\Delta\hat{\alpha},k}^2 + P_{12,k}^2}{\sigma_{\text{ЦМК}}^2}, K_{22,k} = \frac{P_{12,k}^2}{\sigma_{\text{МСН}}^2}. \quad (14)$$

Матрица P_k рассчитывается как

$$P_k = (P_{k/k-1}^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} \text{ при } P_0 = P(t_0), \quad (15)$$

где

$$P_{k/k-1} = P_{k-1} + Q, \quad Q = \begin{bmatrix} T^2 \sigma_{\omega}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta\alpha}^2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

здесь $T^2 \sigma_{\omega}^2$ — дисперсия ошибки пошагового расчета приращения азимута по измерениям, производимым ДУС.

Очевидно (см. формулу (16)), что

$$P_{k/k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{\alpha},k-1}^2 + T^2 \sigma_{\omega}^2 & P_{12,k-1}^2 \\ P_{12,k-1}^2 & \sigma_{\Delta\hat{\alpha},k-1}^2 + \sigma_{\Delta\alpha}^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Обозначим

$$P_{k/k-1}^{-1} = \begin{bmatrix} a_{k/k-1} & b_{k/k-1} \\ b_{k/k-1} & c_{k/k-1} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Тогда с учетом выражений (8), (12), (13) и (18) формула (15) принимает вид

$$P_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{\alpha},k}^2 & P_{12,k}^2 \\ P_{12,k}^2 & \sigma_{\Delta\hat{\alpha},k}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{k/k-1} + \frac{\sigma_{\text{МСН}}^2 + \sigma_{\text{ЦМК}}^2}{\sigma_{\text{МСН}}^2 \sigma_{\text{ЦМК}}^2} & b_{k/k-1} + \frac{1}{\sigma_{\text{ЦМК}}^2} \\ b_{k/k-1} + \frac{1}{\sigma_{\text{ЦМК}}^2} & c_{k/k-1} + \frac{1}{\sigma_{\text{ЦМК}}^2} \end{bmatrix}^{-1} \text{ при } P_0 = P(t_0). \quad (19)$$

Последовательно (начиная с P_0) реализуя процедуры (17), (18), (19), (14), получаем текущие значения дисперсий $\sigma_{\hat{\alpha},k}^2$, $\sigma_{\Delta\hat{\alpha},k}^2$, ковариации $P_{12,k}^2$ и весовых коэффициентов $K_{11,k}, \dots, K_{22,k}$.

Начальные условия в выражениях (9), (10), (19) целесообразно назначать следующим образом. При наличии к моменту t_0 измеренных значений $\alpha_0^{\text{МСН}}$, $\alpha_0^{\text{ЦМК}}$ условия таковы: $\hat{\alpha}_0 = \alpha_0^{\text{МСН}}$, $\Delta\hat{\alpha}_0 = \alpha_0^{\text{ЦМК}} - \alpha_0^{\text{МСН}}$. Тогда $P_0 = \text{diag}(\sigma_{\hat{\alpha},0}^2, \sigma_{\Delta\hat{\alpha},0}^2) = \text{diag}(\sigma_{\text{МСН}}^2, \sigma_{\text{ЦМК}}^2 + \sigma_{\text{МСН}}^2)$. Возможен вариант назначения $\Delta\hat{\alpha}_0 = 0$.

Соотношения (9), (10) имеют наглядную физическую интерпретацию.

Оценку $\hat{\alpha}_k$ в k -й момент времени можно представить суммой оценки $\hat{\alpha}_{k-1}$ в предшествующий $(k-1)$ -й момент и оценки углового приращения $\alpha_k - \alpha_{k-1}$ за интервал $T = t_k - t_{k-1}$. Тогда выражение (9) преобразуется к виду

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k-1} + K_{11,k} (\alpha_k^{\text{ЦМК}} - \hat{\alpha}_{k-1} - \Delta\hat{\alpha}_{k-1}) + K_{12,k} (\alpha_k^{\text{МСН}} - \hat{\alpha}_{k-1}) + (1 - K_{11,k} - K_{12,k}) T \omega_{\zeta,k-1}^{\text{ДУС}},$$

откуда следует, что оценка $\hat{\alpha}_k$, помимо $\hat{\alpha}_{k-1}$, включает сбалансированную сумму оптимально взвешенных оценок приращения азимута по результатам измерений, сформированных ЦМК,

МСН и ДУС. При этом во втором слагаемом измерение $\alpha_k^{\text{ЦМК}}$ корректируется путем вычитания полученной на предыдущем шаге оценки $\hat{\Delta\alpha}_{k-1}$ систематической ошибки ЦМК.

Аналогичная интерпретация возможна для соотношения (10).

Выражения (17)–(19) при начальных условиях, заданных для (19), позволяют расчетным путем произвести априорную оценку точности определения азимута движения пешехода.

Результаты расчетов. Практический интерес представляют расчеты для типовых характеристик точности компонентов (датчиков), входящих в состав азимутального канала ПНС. В качестве таковых использовались характеристики более доступных и недорогих низкоточных (по классификации „низкая, средняя и высокая точность“) датчиков промышленного типа.

Были заданы следующие значения: $\sigma_{\text{ЦМК}} = 0,00873$ рад (соответствует $0,5^\circ$); $\sigma_{\text{МСН}} = 0,00873$ рад; $\sigma_\omega = 5 \cdot 10^{-5}$ рад/с (соответствует $10^\circ/\text{ч}$), $\sigma_\omega = 5 \cdot 10^{-4}$ рад/с ($100^\circ/\text{ч}$) и $\sigma_\omega = 10^{-3}$ рад/с ($200^\circ/\text{ч}$). Также использовались величины $T = 1$ с, $\sigma_{\Delta\alpha} = 0$ и $\sigma_{\Delta\alpha} = 0,0873$ рад (5°) (последнее значение типично для СКО приращения δ_k систематической ошибки ЦМК типа „мягкое железо“). Скорость пешехода задавалась равной $1,4$ м/с (5 км/ч).

На рис. 1, 2 приведены графики зависимостей от времени (номера текущего шага фильтрации k) относительных погрешностей оценивания азимута $r_1 = \sigma_{\hat{\alpha},k} / \sigma_{\hat{\alpha},0}$ и систематической ошибки ЦМК $r_2 = \sigma_{\Delta\hat{\alpha},k} / \sigma_{\Delta\hat{\alpha},0}$ при $\sigma_{\Delta\alpha} = 0$, $\sigma_{\Delta\alpha} = 0,0873$ рад и различных значениях σ_ω .

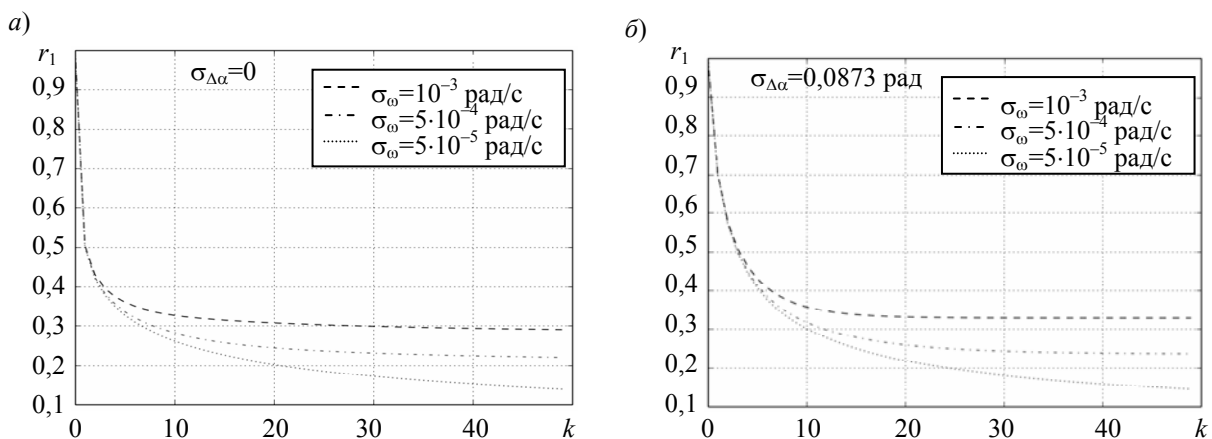


Рис. 1

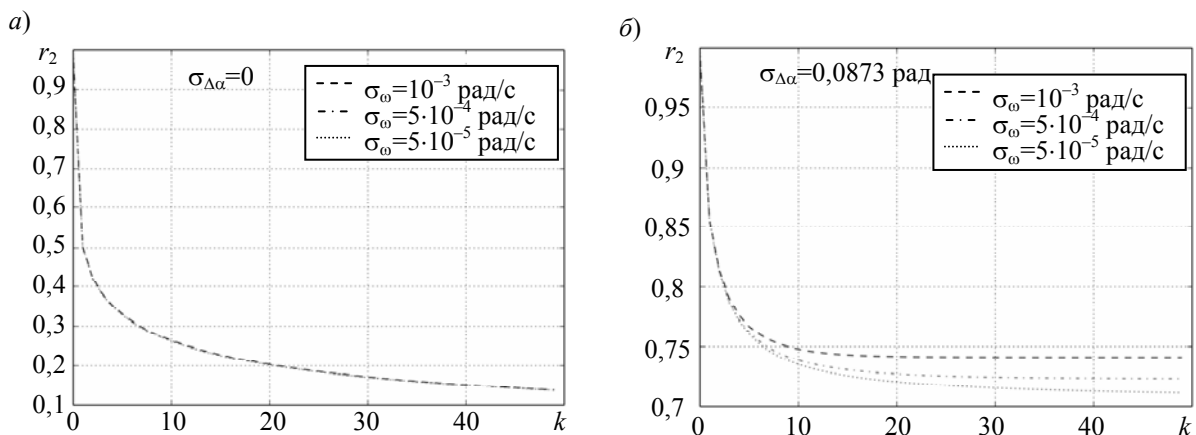


Рис. 2

Анализ рисунков показывает, что общим для всех зависимостей является быстрое достижение установившегося уровня (практически к 50-му шагу). На практике это означает, что при различных точностных характеристиках датчиков, характере и интенсивности магнит-

ных искажений ПНС одинаково оперативно достигает устойчивого режима работы. Последнее особенно важно для специальных применений системы.

Анализ рис. 1, *а*, *б* показывает, что оценка $\hat{\alpha}_k$ при изменяющейся ошибке $\Delta\alpha_k$ ЦМК ($\sigma_{\Delta\alpha} = 0,0873$ рад) лишь незначительно уступает по точности оценке $\hat{\alpha}_k$ при $\Delta\alpha = \text{const}$ ($\sigma_{\Delta\alpha} = 0$). Этот результат свидетельствует о слабой зависимости (что, очевидно, является плюсом) предлагаемого алгоритма обработки (относительно оценки азимута) от характера и интенсивности магнитных искажений. Как отмечалось ранее, это обеспечивается при одно-временной с определением азимута оценкой и компенсацией систематической ошибки ЦМК.

Важно подчеркнуть, что в обоих случаях достигается высокая точность оценивания азимута. Также следует отметить, что существенное повышение точности обеспечивается для широкого диапазона значений σ_ω . (Заметим, что кривые r_1 при $\sigma_\omega = 5 \cdot 10^{-5}$ рад/с практически сливаются с соответствующими кривыми для идеального, „абсолютно точного“ ДУС, т.е. при $\sigma_\omega = 0$.)

Представляют интерес также результаты, приведенные на рис. 2, *а*, *б*. Видно (см. рис. 2, *а*), что при постоянной ошибке $\Delta\alpha$ ($\sigma_{\Delta\alpha} = 0$) достигается высокая точность ее оценивания, не зависящая от точности ДУС (кривые r_2 для трех значений σ_ω совпадают). Это объясняется отсутствием наблюдаемости постоянной азимутальной составляющей $\Delta\alpha$ при измерении скорости $\omega_\zeta^{\text{ДУС}}$ изменения (производной) азимута. В то же время при $\sigma_{\Delta\alpha} = 0,0873$ рад (см. рис. 2, *б*) точность оценки переменной величины $\Delta\alpha_k$ растет незначительно и зависит от точностных характеристик ДУС. Однако применительно к основной задаче — достижения высокой точности оценки азимута — этот факт является второстепенным.

Заключение. Предложенные модель и алгоритм комплексной обработки информации могут быть легко и наглядно реализованы в азимутальном канале систем навигации подвижных наземных объектов. Расчеты, проведенные применительно к пешеходной навигационной системе, свидетельствуют о возможности достижения приемлемой точности определения текущего азимута при использовании в ПНС широкодоступных датчиков угловых скоростей, цифровых магнитных компасов и модулей спутниковой навигации невысокой точности. По результатам исследований можно сделать вывод о целесообразности и эффективности совместной с определением азимута оценки и компенсации различной по изменению во времени и интенсивности систематической ошибки ЦМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов // Радиотехника. 2010. № 5.
2. Нурелдин А., Эбертс М., Джонстон С., Эль-Шейми Н., Берд Дж. Последние достижения в повышении точности блоков инерциальных измерений на основе МЭМС для навигационных систем: Пер. с англ. Пенза: Науч.-исслед. ин-т физических измерений (НИИФИ), 2009.
3. Дэвидсон П., Такала Я. Разработка алгоритмов инерциальной навигационной системы с учетом особенностей походки человека // Гироскопия и навигация. 2013. № 1(80).
4. Каплин А. Ю. Результаты разработки и направления модернизации комплекса разведки, управления и связи „Стрелец“ // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: Сб. науч. тр. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2011.
5. Иванов А. В. Навигационные системы подвижных наземных объектов. Алгоритмы обработки информации в угломерном канале // Радиотехника. 2013. № 4.
6. Ladetto Q., Merminod B. Digital magnetic compass and gyroscope integration for pedestrian navigation // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems, 27—29 May, 2002, St. Petersburg.

7. Пат. 2503923 РФ. Способ калибровки магнитного компаса пешехода / А. Ю. Каплин, Ю. Б. Гомон, Г. Г. Калинина. 01.08.2012.
8. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. 2014. № 6.
9. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.
10. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. М.: Наука, 1966. 176 с.
11. Математическая энциклопедия / Гл. ред. И. М. Виноградов. М.: Сов. энциклопедия, 1977. Т. 1.
12. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.

Сведения об авторах

Александр Юрьевич Каплин — канд. техн. наук; ОАО „Радиоавионика“; E-mail: a.kaplin@radioavionica.ru
Михаил Георгиевич Степанов — д-р техн. наук, профессор; ОАО „Радиоавионика“;
 E-mail: smg099@mail.ru

Рекомендована
 ОАО „Радиоавионика“

Поступила в редакцию
 08.12.15 г.

Ссылка для цитирования: Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Модель и алгоритм комплексной обработки информации азимутального канала пешеходной навигационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 181—188.

MODEL AND ALGORITHM OF COMPLEX INFORMATION PROCESSING IN AZIMUTHAL CHANNEL OF PEDESTRIAN NAVIGATION SYSTEM

A. Yu. Kaplin, M. G. Stepanov

Radioavionica Corporation, 190005, St. Petersburg, Russia
 E-mail: smg099@mail.ru

The problem of high-precision evaluation of current azimuth in pedestrian navigation system is considered. A well-defined model of azimuthal channel is formulated for navigation system consisting of digital magnetic compass, satellite navigation unit, and angular velocity sensor. An algorithm of complex processing of the channel information with the use of the basic variant of Kalman filter is proposed. The procedure of assessment and compensation for systematic error of magnetic compass is given special attention when azimuth value is determined. Results of a priori estimating of accuracy of azimuth channel information processing for various magnetic distortions and the sensors precision characteristics confirm the proposed approach.

Keywords: pedestrian navigation system, azimuthal channel, Kalman processing algorithm, angular velocity sensor, digital magnetic compass, satellite navigation unit

Data on authors

Alexander Yu. Kaplin — PhD; Radioavionica Corporation; E-mail: a.kaplin@radioavionica.ru
Mikhail G. Stepanov — Dr. Sci., Professor; Radioavionica Corporation;
 E-mail: smg099@mail.ru

For citation: Kaplin A. Yu., Stepanov M. G. Model and algorithm of complex information processing in azimuthal channel of pedestrian navigation system // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 3. P. 181—188 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-3-181-188