

УДК 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.89

АНАЛИЗ АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ УГЛОМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

А. Ю. Каплин^а, канд. техн. наукМ. Г. Степанов^а, доктор техн. наук, профессор^аОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при комплексировании инерциальных датчиков, входящих в состав системы навигации подвижного объекта, с навигационными датчиками других типов: цифровым магнитным компасом, модулем спутниковой навигации, другими приборами, — последние используются в качестве внешнего дополнительного источника информации для выделения и оценки по алгоритму калмановской фильтрации систематических (медленно меняющихся) ошибок инерциальных датчиков с их последующей коррекцией по разомкнутой или замкнутой схеме. В результате точность навигационной системы объекта определяется точностью оценок указанных ошибок и слабо зависит от информационного вклада измерений других датчиков. **Цель:** разработать и проанализировать алгоритм комплексной обработки угломерной информации в навигационной системе подвижного объекта. **Результаты:** применительно к угломерному каналу навигационной системы подвижного объекта предложен и проанализирован алгоритм комплексной обработки полного объема измерительной информации, построенный на основе фильтра Калмана. Рассмотрен и обоснован вклад отдельных компонентов алгоритма в общий процесс обработки. Продемонстрирована работа механизма весового суммирования, реализуемая калмановским алгоритмом фильтрации угломерных данных. Описаны варианты практического задания начальных условий для фильтра. **Практическая значимость:** сформулированный алгоритм комплексной обработки может использоваться как основа специального программного обеспечения навигационной системы подвижных наземных и околоземных объектов. С методической точки зрения полученные результаты полезны молодым специалистам для понимания и освоения прикладных аспектов калмановской фильтрации.

Ключевые слова — комплексная обработка, фильтр Калмана, угломерный канал, навигационная система, подвижный объект.

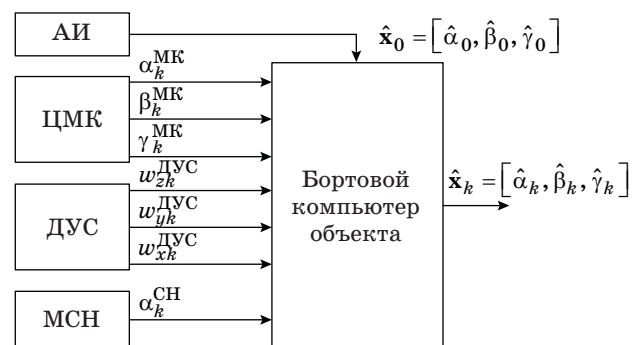
Введение

Статья опирается на принципы и алгоритмы, изложенные в основополагающих работах [1–4], а также прикладных статьях [5–8]. По замыслу и содержанию статья является обобщением результатов работы [9]. В доступной форме в ней применительно к конкретной прикладной задаче анализируется механизм комплексной весовой обработки данных различных угломерных датчиков, реализуемый алгоритмом калмановской фильтрации.

Объектом рассмотрения является угломерный канал навигационной системы подвижного наземного (околоземного) объекта, распространенный состав датчиков которого включает трехосевой цифровой магнитный компас (ЦМК), трехосевой датчик угловых скоростей (ДУС) и модуль спутниковой навигации (МСН) [5, 10]. Датчики обеспечивают измерение углов ориентации объекта — азимута $\alpha_k^{МК}$, тангажа $\beta_k^{МК}$ и крена $\gamma_k^{МК}$, соответствующих угловых скоростей $w_{zk}^{ДУС}$, $w_{yk}^{ДУС}$, $w_{xk}^{ДУС}$ и путевого угла $\alpha_k^{СН}$. В состав канала обычно также входит трехосевой акселерометрический инклинометр (АИ), определяющий значения начальных (статических) углов ориентации объекта α_0 , β_0 , γ_0 , в отсчете от которых проводятся дальнейшие угловые измерения в ходе его движения. Функциональная схема

комплексной обработки приведена на рисунке (обозначения $\hat{\alpha}_0$, $\hat{\alpha}_k$ раскрываются далее).

Предполагается, что перед комплексной обработкой текущие измерения проходят предварительную обработку, обеспечивающую ввод систематических поправок (в частности, на магнитное склонение), независимое по измеряемым параметрам сглаживание и сжатие результатов и их привязку к единой шкале времени с одинаковым шагом $T_k = t_k - t_{k-1}$. Считается также, что предварительно проводится высокоточная калибровка ДУС, ЦМК и АИ [10, 11], позволяющая при обработке компенсировать смещения и асимметрию коэффициентов передачи чувствительных осей датчиков.



■ Функциональная схема комплексной обработки

Обоснование алгоритма комплексной обработки

В соответствии с положениями теории оптимальной линейной фильтрации в процессе обработки измерений оценке подлежит текущий вектор состояния \mathbf{x}_k линейной динамической системы, описываемой уравнением (динамической моделью) вида

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{D} \mathbf{w}_{k-1} + \Gamma \mathbf{n}_{k-1},$$

н. у. $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0), k = 1, 2, \dots,$ (1)

где \mathbf{n}_{k-1} — стандартный векторный гауссов белый шум с нулевым средним и единичной интенсивностью, $\mathbf{n}_{k-1} \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{I})$; \mathbf{w}_{k-1} — известный вектор управления; Φ, \mathbf{D} — переходные матрицы состояния; Γ — матрица интенсивности шума $\Gamma \mathbf{n}_{k-1}$.

Измерения описываются уравнением

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \Gamma_y \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}_k \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{I})$ — стандартный векторный шум измерения; Γ_y — матрица интенсивности шума $\Gamma_y \mathbf{v}_k$; \mathbf{H} — матрица измерения.

В этих условиях оптимальной по минимуму среднего квадрата ошибки оценивания (минимуму ковариационной матрицы ошибок) является рекуррентная процедура (фильтр Калмана)

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T (\Gamma_y \Gamma_y^T)^{-1} (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \Phi \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) + \mathbf{P}_k \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{w}_{k-1}, \text{ н. у. } \hat{\mathbf{x}}_0, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \Gamma \Gamma^T;$$

$$\mathbf{P}_k = \left[\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + \mathbf{H}^T (\Gamma_y \Gamma_y^T)^{-1} \mathbf{H} \right]^{-1} =$$

$$= \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T + \Gamma_y \Gamma_y^T)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1},$$

н. у. $\mathbf{P}_0,$

где \mathbf{P}_k — ковариационная матрица ошибок оценивания; $\mathbf{P}_{k/k-1}$ — экстраполированное на шаг значение этой матрицы.

Применительно к рассматриваемой прикладной проблеме алгоритм комплексной обработки угломерной информации решает задачу формирования по данным ЦМК, ДУС и МСН текущей калмановской оценки углов ориентации подвижного объекта.

В основу комплексирования положены следующие соображения (рассмотрение начнем с непрерывного времени t с последующим возвратом к дискретному времени t_k).

Между текущими значениями углов и угловых скоростей существует очевидная аналитическая зависимость

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = w_z(t), \quad \alpha_0 = \alpha(t_0);$$

$$\frac{d\beta(t)}{dt} = w_y(t), \quad \beta_0 = \beta(t_0);$$

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = w_x(t), \quad \gamma_0 = \gamma(t_0). \quad (4)$$

При известных функциях времени $w_z(t), w_y(t), w_x(t)$ (известном управлении) эти соотношения могли бы быть исходными для составления исчерпывающей динамической модели изменения углов $\alpha(t), \beta(t), \gamma(t)$. Однако, поскольку на практике истинные значения угловых скоростей $w_z(t), w_y(t), w_x(t)$ не известны, в соответствии с фундаментальной теоремой разделения и принципом распределения информации они заменяются на измеренные ДУС значения $w_z^{\text{ДУС}}(t), w_y^{\text{ДУС}}(t), w_x^{\text{ДУС}}(t)$ с последующим корректным учетом присущих им ошибок измерений.

Измеренные значения угловых скоростей представим в виде сумм

$$w_z^{\text{ДУС}}(t) = w_z(t) + \varepsilon_{wz}(t);$$

$$w_y^{\text{ДУС}}(t) = w_y(t) + \varepsilon_{wy}(t); \quad (5)$$

$$w_x^{\text{ДУС}}(t) = w_x(t) + \varepsilon_{wx}(t)$$

неизвестных истинных значений w_z, w_y, w_x и ошибок измерений $\varepsilon_{wz}, \varepsilon_{wy}, \varepsilon_{wx}$. В свою очередь, ошибки измерений запишем в виде

$$\varepsilon_{wx}(t) = \sigma_{wx} n_{wx}(t), \quad \varepsilon_{wy}(t) = \sigma_{wy} n_{wy}(t),$$

$$\varepsilon_{wz}(t) = \sigma_{wz} n_{wz}(t), \quad (6)$$

где n_{wz}, n_{wy}, n_{wx} — стандартные независимые белые гауссовы шумы, $\mathbf{n}_w \sim \mathbf{N}(0, \mathbf{I})$; $\sigma_{wx} = \sigma_{wy} = \sigma_{wz} = \sigma_w$ — среднеквадратические ошибки измерения угловых скоростей (полагаются равными для всех трех каналов ДУС).

Соотношения (4) с учетом (5) и (6) можно переписать в виде

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = w_z^{\text{ДУС}}(t) - \sigma_w n_{wz}(t);$$

$$\frac{d\beta(t)}{dt} = w_y^{\text{ДУС}}(t) - \sigma_w n_{wy}(t); \quad (7)$$

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = w_x^{\text{ДУС}}(t) - \sigma_w n_{wx}(t).$$

Переходя в (7) к конечным разностям, получим

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} + T w_{z,k-1}^{\text{ДУС}} - T \sigma_w n_{wz,k-1};$$

$$\beta_k = \beta_{k-1} + T w_{y,k-1}^{\text{ДУС}} - T \sigma_w n_{wy,k-1}; \quad (8)$$

$$\gamma_k = \gamma_{k-1} + T w_{x,k-1}^{\text{ДУС}} - T \sigma_w n_{wx,k-1},$$

где $T = t_k - t_{k-1}$.

Сравнивая (1) и (8), убеждаемся, что они совпадают при введении следующих обозначений:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \alpha_k \\ \beta_k \\ \gamma_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix} w_{z,k-1}^{ДУС} \\ w_{y,k-1}^{ДУС} \\ w_{x,k-1}^{ДУС} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{n}_{k-1} = \begin{bmatrix} n_{wz,k-1} \\ n_{wy,k-1} \\ n_{wx,k-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} -T\sigma_w & 0 & 0 \\ 0 & -T\sigma_w & 0 \\ 0 & 0 & -T\sigma_w \end{bmatrix}.$$

Обозначая

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \alpha_k^{МК} \\ \beta_k^{МК} \\ \gamma_k^{МК} \\ \alpha_k^{СН} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_{\alpha,k}^{МК} \\ v_{\beta,k}^{МК} \\ v_{\gamma,k}^{МК} \\ v_{\alpha,k}^{СН} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{\Gamma}_y = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha}^{МК} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^{МК} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^{МК} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^{СН} \end{bmatrix},$$

где $v_{\alpha,k}^{МК}, \dots, v_{\alpha,k}^{СН}$ — стандартные независимые белые гауссовы шумы угломерных каналов ЦМК и азимутального канала МСН соответственно; $\sigma_{\alpha}^{МК}, \dots, \sigma_{\alpha}^{СН}$ — среднеквадратическая ошибка измерений в каналах, и приходим к уравнению измерения (2).

С учетом принятых обозначений соотношения (3) переписываются в виде

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) + \mathbf{P}_k \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{w}_{k-1}, \quad \text{н. у. } \hat{\mathbf{x}}_0, \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q};$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1},$$

н. у. \mathbf{P}_0 ,

где

$$\mathbf{Q} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{\Gamma}^T = \begin{bmatrix} T^2 \sigma_w^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^2 \sigma_w^2 & 0 \\ 0 & 0 & T^2 \sigma_w^2 \end{bmatrix}$$

— ковариационная матрица (матрица дисперсий) возмущающего шума;

$$\mathbf{R} = \mathbf{\Gamma}_y \mathbf{\Gamma}_y^T = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha}^{2МК} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^{2МК} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^{2МК} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^{2СН} \end{bmatrix}$$

— ковариационная матрица измерительного шума.

После простых промежуточных преобразований

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{\alpha}^{2МК} & 0 & 0 & 1/\sigma_{\alpha}^{2СН} \\ 0 & 1/\sigma_{\beta}^{2МК} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{\gamma}^{2МК} & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} = \mathbf{A} \mathbf{H} =$$

$$= \begin{bmatrix} (1/\sigma_{\alpha}^{2МК} + 1/\sigma_{\alpha}^{2СН}) & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{\beta}^{2МК} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{\gamma}^{2МК} \end{bmatrix}$$

соотношения (9) принимают окончательный вид

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{P}_k \mathbf{A} (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) + \mathbf{P}_k \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{w}_{k-1}, \quad \text{н. у. } \hat{\mathbf{x}}_0; \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{Q}; \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1},$$

н. у. \mathbf{P}_0 . (12)

Выражения (10)–(12) могут служить основой моделирования и практической реализации алгоритма комплексной обработки информации угломерного канала навигационной системы подвижного объекта.

Отметим, что здесь симметрическая матрица

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{\alpha},k}^2 & P_{\hat{\alpha}\hat{\beta},k} & P_{\hat{\alpha}\hat{\gamma},k} \\ P_{\hat{\beta}\hat{\alpha},k} & \sigma_{\hat{\beta},k}^2 & P_{\hat{\beta}\hat{\gamma},k} \\ P_{\hat{\gamma}\hat{\alpha},k} & P_{\hat{\gamma}\hat{\beta},k} & \sigma_{\hat{\gamma},k}^2 \end{bmatrix}$$

есть текущая ковариационная матрица ошибок оценивания, диагональные элементы которой $\sigma_{\hat{\alpha},k}^2, \sigma_{\hat{\beta},k}^2, \sigma_{\hat{\gamma},k}^2$ — дисперсии ошибок оценок $\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k$, а $P_{\hat{\alpha}\hat{\beta},k} = P_{\hat{\beta}\hat{\alpha},k}$, $P_{\hat{\alpha}\hat{\gamma},k} = P_{\hat{\gamma}\hat{\alpha},k}$, $P_{\hat{\beta}\hat{\gamma},k} = P_{\hat{\gamma}\hat{\beta},k}$ — моменты взаимной корреляции (ковариации) ошибок.

Анализ компонентов алгоритма

1. Рассмотрим второе слагаемое в (10). После несложных преобразований получим

$$\mathbf{P}_k \mathbf{A}(\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) = \mathbf{P}_k \mathbf{A} \begin{bmatrix} \alpha_k^{\text{МК}} - \hat{\alpha}_{k-1} \\ \beta_k^{\text{МК}} - \hat{\beta}_{k-1} \\ \gamma_k^{\text{МК}} - \hat{\gamma}_{k-1} \\ \alpha_k^{\text{СН}} - \hat{\alpha}_{k-1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_k \begin{bmatrix} \left(\frac{\alpha_k^{\text{МК}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{МК}}} + \frac{\alpha_k^{\text{СН}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{СН}}} \right) \\ \frac{\beta_k^{\text{МК}} - \hat{\beta}_{k-1}}{\sigma_\beta^{2\text{МК}}} \\ \frac{\gamma_k^{\text{МК}} - \hat{\gamma}_{k-1}}{\sigma_\gamma^{2\text{МК}}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{\alpha},k}^2 \left(\frac{\alpha_k^{\text{МК}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{МК}}} + \frac{\alpha_k^{\text{СН}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{СН}}} \right) + P_{\hat{\alpha}\hat{\beta},k} \frac{\beta_k^{\text{МК}} - \hat{\beta}_{k-1}}{\sigma_\beta^{2\text{МК}}} + P_{\hat{\alpha}\hat{\gamma},k} \frac{\gamma_k^{\text{МК}} - \hat{\gamma}_{k-1}}{\sigma_\gamma^{2\text{МК}}} \\ P_{\hat{\beta}\hat{\alpha},k} \left(\frac{\alpha_k^{\text{МК}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{МК}}} + \frac{\alpha_k^{\text{СН}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{СН}}} \right) + \sigma_{\hat{\beta},k}^2 \frac{\beta_k^{\text{МК}} - \hat{\beta}_{k-1}}{\sigma_\beta^{2\text{МК}}} + P_{\hat{\beta}\hat{\gamma},k} \frac{\gamma_k^{\text{МК}} - \hat{\gamma}_{k-1}}{\sigma_\gamma^{2\text{МК}}} \\ P_{\hat{\gamma}\hat{\alpha},k} \left(\frac{\alpha_k^{\text{МК}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{МК}}} + \frac{\alpha_k^{\text{СН}} - \hat{\alpha}_{k-1}}{\sigma_\alpha^{2\text{СН}}} \right) + P_{\hat{\gamma}\hat{\beta},k} \frac{\beta_k^{\text{МК}} - \hat{\beta}_{k-1}}{\sigma_\beta^{2\text{МК}}} + \sigma_{\hat{\gamma},k}^2 \frac{\gamma_k^{\text{МК}} - \hat{\gamma}_{k-1}}{\sigma_\gamma^{2\text{МК}}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Очевидно, что этим слагаемым обеспечивается весовая обработка невязок (разностей измеренных и оценочных значений углов), при этом веса определяются как дисперсиями ошибок измерений $\sigma_\alpha^{2\text{МК}}, \dots, \sigma_\alpha^{2\text{СН}}$, так и текущими дисперсиями $\sigma_{\hat{\alpha},k}^2, \sigma_{\hat{\beta},k}^2, \sigma_{\hat{\gamma},k}^2$ и ковариациями $P_{\hat{\alpha}\hat{\beta},k}, P_{\hat{\alpha}\hat{\gamma},k}, P_{\hat{\beta}\hat{\gamma},k}$ ошибок оценивания (последнее говорит о статической взаимосвязи оценок $\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k$).

Важно подчеркнуть, что в расчете дисперсий и ковариаций ошибок оценок участвует ковариационная матрица \mathbf{Q} измерительных ошибок ДУС [см. соотношение (11)]. Тем самым обеспечивается их корректный учет.

2. Анализ первых слагаемых элементов вектора (13) показывает, что при наличии двух измерений азимута $\alpha_k^{\text{МК}}, \alpha_k^{\text{СН}}$ больший вес в результирующей оценке придается измерению с меньшей погрешностью. Так, при $\sigma_\alpha^{2\text{СН}} < \sigma_\alpha^{2\text{МК}}$ в оценке превалирует измерение $\alpha_k^{\text{СН}}$. При $\sigma_\alpha^{2\text{СН}} \ll \sigma_\alpha^{2\text{МК}}$ вклад $\alpha_k^{\text{СН}}$ является определяющим (измерение $\alpha_k^{\text{МК}}$ в результате практически не участвует). И наоборот, при низкой точности (потере данных) азимутального канала МСН ($\sigma_\alpha^{2\text{СН}} \gg \sigma_\alpha^{2\text{МК}}$) основной вклад в результирующую оценку дает азимутальный канал ЦМК (в пределах азимутальный канал модуля при обработке просто отсекается).

3. Особо рассмотрим третье слагаемое в (10).

Наличие члена $\mathbf{Dw}_{k-1} = \left[\mathbf{Tw}_{z,k-1}^{\text{ДУС}}, \mathbf{Tw}_{y,k-1}^{\text{ДУС}}, \mathbf{Tw}_{x,k-1}^{\text{ДУС}} \right]^T$, представляющего собой вектор парциальных приращений углов на k -м шаге, вы-

звано необходимостью восполнить в текущей оценке углов $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ вычитаемый из \mathbf{y}_k вектор приращений \mathbf{Dw}_{k-2} , содержащийся в оценке $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ [см. (10) при $k-1$].

В этом состоит реализуемый в статье механизм комплексирования ДУС с другими датчиками углов. Множитель $\mathbf{P}_k \mathbf{P}_{k-1}^{-1}$ служит здесь для пересчета слагаемого \mathbf{Dw}_{k-1} , обеспечивающего оптимальность предсказанного значения $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$, в соответствующее слагаемое для оптимальной оценки $\hat{\mathbf{x}}_k$. (Заметим, что в большинстве работ по комплексной фильтрации этот момент неадекватно опускается.)

Задание начальных условий

На практике возможны различные варианты задания начальных условий в уравнениях (10) и (12), связанные с тем или иным набором измерительных данных, привлекаемых для их формирования на первом (нескольких первых) шаге поступления и обработки измерений. Простыми и наглядными являются следующие варианты.

Вариант 1. В качестве н. у. $\hat{\mathbf{x}}_0$ выбирается первый отсчет показаний ЦМК, т. е. $\hat{\mathbf{x}}_0^{(1)} = \left[\alpha_1^{\text{МК}}, \beta_1^{\text{МК}}, \gamma_1^{\text{МК}} \right]^T$. Дальнейший счет индекса k проводится со второго измерительного шага. Очевидно, что в этом случае

$$\mathbf{P}_0^{(1)} = \begin{bmatrix} \sigma_\alpha^{2\text{МК}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^{2\text{МК}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\gamma^{2\text{МК}} \end{bmatrix}.$$

Вариант 2. Этот вариант отличается от предыдущего тем, что вместо $\alpha_1^{\text{МК}}$ используется отсчет $\alpha_1^{\text{СН}}$ (объект движется), т. е.

$$\hat{\mathbf{x}}_0^{(2)} = [\alpha_1^{\text{СН}}, \beta_1^{\text{МК}}, \gamma_1^{\text{МК}}]^T;$$

$$\mathbf{P}_0^{(2)} = \begin{bmatrix} \sigma_\alpha^{2\text{СН}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^{2\text{МК}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\gamma^{2\text{МК}} \end{bmatrix}.$$

Вариант 3. Для формирования н. у. используются данные ДУС. Моментом времени t_0 полагается время начала очередного маневра поворота объекта относительно углов, соответствующих времени $t_{\text{ок}}$ окончания предыдущего маневра. Будем считать, что к моменту $t_{\text{ок}}$ обработка угловых измерений в ходе закончившегося маневра поворота обеспечивает высокую точность оценки начальных углов $\hat{\alpha}_{\text{ок}}, \hat{\beta}_{\text{ок}}, \hat{\gamma}_{\text{ок}}$. В этом случае

$$\hat{\mathbf{x}}_0^{(3)} = [\hat{\alpha}_{\text{ок}} + Tw_{z,1}^{\text{ДУС}}, \hat{\beta}_{\text{ок}} + Tw_{y,1}^{\text{ДУС}}, \hat{\gamma}_{\text{ок}} + Tw_{x,1}^{\text{ДУС}}]^T;$$

$$\mathbf{P}_0^{(3)} = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} T^2 \sigma_\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^2 \sigma_\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & T^2 \sigma_\omega^2 \end{bmatrix}.$$

Возможны другие, более сложные сочетания начальных измерений при формировании $\hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{P}_0$.

Заключение

Данная работа выполнена в предположении постоянства априори известных значений среднеквадратической ошибки погрешностей измерений $\sigma_w, \sigma_\alpha^{\text{МК}}, \dots, \sigma_\alpha^{\text{СН}}$. На практике требуется более детальное описание погрешностей и расчет текущих значений их среднеквадратических ошибок. Вместе с тем известные результаты теории и практики прецизионных измерений показывают, что возникающие при этом трудности в значительной мере устраняются применением к погрешностям так называемого «гарантирующего подхода» [12].

Литература

1. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. — М.: Наука, 1966. — 176 с.
2. Ярлык М. С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1985. — 344 с.
3. Ярлык М. С., Миронов М. А. Марковская теория оценивания случайных процессов. — М.: Радио и связь, 1993. — 464 с.
4. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. — М.: Машиностроение, 1982. — 216 с.
5. Иванов А. В. Навигационные системы подвижных наземных объектов. Алгоритмы обработки информации в угловом канале // Радиотехника. 2013. № 4. С. 46–54.
6. Каплин А. Ю., Степанов М. Г. Использование автономной навигационной системы высокоточного позиционирования пешехода на местности // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 86–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.86
7. Дэвидсон П., Такала Я. Разработка алгоритмов инерциальной навигационной системы с учетом

- особенностей походки человека // Гирскопия и навигация. 2013. № 1. С. 86–94.
8. Salychev O. S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. — М.: BMSTU Press, 2004. — 306 p.
9. 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.
10. Иванов Д. С. и др. Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата: препринт. — ИПМ РАН, 2010. № 28. — 30 с.
11. Пат. 2572109 РФ, МПК C1 G01C 17/38. Способ калибровки электронного магнитного компаса / А. Ю. Каплин (РФ), М. Г. Степанов (РФ), А. Ю. Веревкин (РФ). — № 2014129725/28; заявл. 18.07.14; опубл. 27.12.15, Бюл. № 1. — 2 с.
12. Бахшиян Б. Ц., Назиров Р. Р., Эльясберг П. Е. Определение и коррекция движения (гарантирующий подход). — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. — 360 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.89

Analysis of Algorithm for Complex Processing of Goniometric Information in a Moving Object Navigation SystemKaplin A. Y.^a, PhD, Tech., a.kaplin@list.ruStepanov M. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, smg099@mail.ru^aОАО «Radioavionika», 4 В, Troitskii Pr., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: For complex inertial sensors combined in mobile unit navigation systems with navigation sensors of other types (digital magnetic compass, satellite navigation module and other devices), the latter are used as an external auxiliary source of information for the selection and evaluation (using the Kalman filtering algorithm) of systematic (slowly varying) errors of inertial sensors, and their subsequent correction for an open or closed circuit. As a result, the accuracy of the navigation system of the object is determined by the accuracy of the estimates of these errors and weakly depends on the contribution of the measurements from other sensors. **Purpose:** The goal is to develop and analyze an algorithm for complex processing of goniometric information in the navigation system of a movable object. **Results:** For the azimuth channel of a movable object navigation system, an algorithm built on the basis of the Kalman filter is proposed which performs complex processing of the total volume of the measurement information. The contribution of individual components into the processing is discussed and substantiated. We have demonstrated the functioning of the weight summation mechanism implemented by the Kalman filtering algorithm for goniometric data. Options have been described for defining the filter initial conditions. **Practical relevance:** The formulated comprehensive treatment algorithm can be used as a basis for a specific software navigation system of ground-based and near-Earth mobile objects. From the methodological point of view, the results can be useful for young professionals who want to understand and master the applied aspects of Kalman filtering.

Keywords — Complex Processing, Kalman Filter, Azimuth Channel, Navigation System, Moving Object.

References

1. Li P. *Optimal'nye otsenki, opredelenie kharakteristik i upravlenie* [Optimal Assessment, Characterization and Management]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 176 p. (In Russian).
2. Yarlykov M. S. *Statisticheskaya teoriya radionavigatsii* [Statistical Theory of Navigation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 344 p. (In Russian).
3. Yarlykov M. S., Mironov M. A. *Markovskaya teoriya otsenivaniya sluchainykh protsessov* [Markov's Estimation Theory of Stochastic Processes]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1993. 464 p. (In Russian).
4. Kuzovkov N. T., Salychev O. S. *Inertsial'naya navigatsiya i optimal'naya filtratsiya* [Inertial Navigation and Optimal Filtering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (In Russian).
5. Ivanov A. V. Navigation Systems Moving Ground Targets. Algorithms of Processing of the Information in the Angular Channel. *Radiotekhnika*, 2013, no. 4, pp. 46–54 (In Russian).
6. Kaplin A. Y., Stepanov M. G. Using Autonomous Navigation System of High-precision Positioning of a Pedestrian on the Ground. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 86–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.86
7. Devidson P., Takala J. Development of Algorithms of Inertial Navigation System Based on Features of Human Gait. *Girokopiya i navigatsiya*, 2013, no. 1, pp. 86–54 (In Russian).
8. Salychev O. S. *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. Moscow, BMSTU Press, 2004. 306 p.
9. Kaplin A. Y., Stepanov M. G. Model and Algorithm of Complex Information Processing Azimuth Channel Pedestrian Navigation System. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 181–188 (In Russian).
10. Ivanov D. S., et al. *Kalibrovka datchikov dlia opredeleniya orientatsii malogo kosmicheskogo apparata* [The Calibration of Sensors to Determine the Orientation of Small Spacecraft]. Moscow, IPM RAN Publ., 2010, no. 28. 36 p. Preprint (In Russian).
11. Kaplin A. Y., Stepanov M. G., Veryovkin A. Yu., et al. *Sposob kalibrovki elektronnoy magnitnoy kompassa* [A Method of Calibrating an Electronic Magnetic Compass]. Patent RF, no. 2572109, 2014.
12. Bakhshiyar B. Ts., Nazirov R. R., Elyasberg P. E. *Opreделение i korreksiya dvizheniya (garantiruiushchii podkhod)* [Determination and Motion Compensation (guarantee approach)]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 360 p. (In Russian).