УДК 656.7.052.002.5: 681.32(045)

В. О. Рогожин, канд. техн. наук,
Хоан Ань Туан,
Ю. А. Друк

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК И МАКСИМУМА ПРАВДОПОДОБИЯ

Институт электроники и систем управления НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Рассмотрен алгоритм комплексной обработки навигационной информации при совместном использовании метода компенсации ошибок измерителей и метода максимума правдоподобия. Показано, что использование такого алгоритма позволяет существенно уменьшить ошибки оценки измеряемого навигационного параметра. Приведены результаты моделирования комплексной навигационной системы.

Вступление. Как было показано в ряде работ, в частности [1 – 3], комплексная обработка информации по определенному алгоритму от двух или более навигационных систем позволяет существенно повысить точность оценки измеряемого параметра. При этом предпочтение отдается простым и в то же время эффективным методам комплексной обработки информации. К таким методам можно отнести метод компенсации ошибок измерителей и метод максимума правдоподобия. В этой работе рассматривается усовершенствованный алгоритм комплексной обработки навигационной информации при совместном использовании указанных выше методов.

Постановка задачи. Основной целью исследований является сравнительная оценка результатов комплексной обработки навигационной информации раздельно по методу компенсации ошибок измерителей и по методу максимума правдоподобия, а также при комплексной обработке навигационной информации при совместном использовании этих методов. Результаты исследований показали, что совместное использование указанных методов позволяет существенно улучшить точностные характеристики оценок навигационных параметров.

Исследование алгоритма комплексной обработки навигационной информации при совместном использовании методов компенсации ошибок и метода максимума правдоподобия. Как известно, навигационные комплексы самолетов гражданской авиации являются информационно избыточными. Они включают в свой состав навигационные системы, использующие различные физические принципы и спектры ошибок этих систем, разнесенных в частотном диапазоне. В этом случае, как это показано в [3] представляется возможным использования простого и в тоже время эффективного метода комплексной обработки навигационной информации, каким является метод компенсации ошибок измерителей. В то же время, когда условие по разнесению спектра ошибок измерителей в частотном диапазоне не выполняется, то совместную обработку информации от различных измерительных систем целесообразно проводить с использованием метода максимума правдоподобия.

В данной работе исследуется комплексная навигационная система, включающая в свой состав инерциальную навигационную систему (ИНС), спутниковую систему навигации (ССН) и доплеровский измеритель скорости и угла сноса типа ДИСС. В качестве оцениваемого параметра принимается составляющая путевой скорости летательного аппарата. Комплексную обработку информации от трех измерителей составляющей скорости предполагается проводить в два этапа. На первом этапе используется метод компенсации ошибок, подробно рассмотренный в работе [3]. С учетом того, что спектр ошибок ИНС расположен в низкочастотном диапазоне, а спектры ошибок ССН и ДИСС – в высокочастотном диапазоне, возможна организация двух контуров обработки информации. На первом этапе обработка информации производится по методу компенсации ошибок, а

именно контура «ИНС-ССН» (инерциально-спутниковая система) и контура «ИНС–ДИСС» (инерциально-доплеровская система). Полученные по этому методу оценки $\hat{z}_1$ $\hat{Z}_1$ и $\hat{Z}_2$ на втором этапе обрабатываются по методу максимума правдоподобия. Заметим, что при решении задачи комплексной обработки информации на первом этапе основным является нахождение оптимального значения постоянной времени фильтров ($T_{\text{опт}}$), а на втором – определение весовых коэффициентов, с которыми берутся оценки параметра, полученные на первом этапе комплексной обработки. Решение этих задач и составляет цель исследований.

Структурная схема, позволяющая реализовать метод комплексной обработки информации при совместном использовании методов компенсации ошибок и максимума правдоподобия, показана на рис. 1.

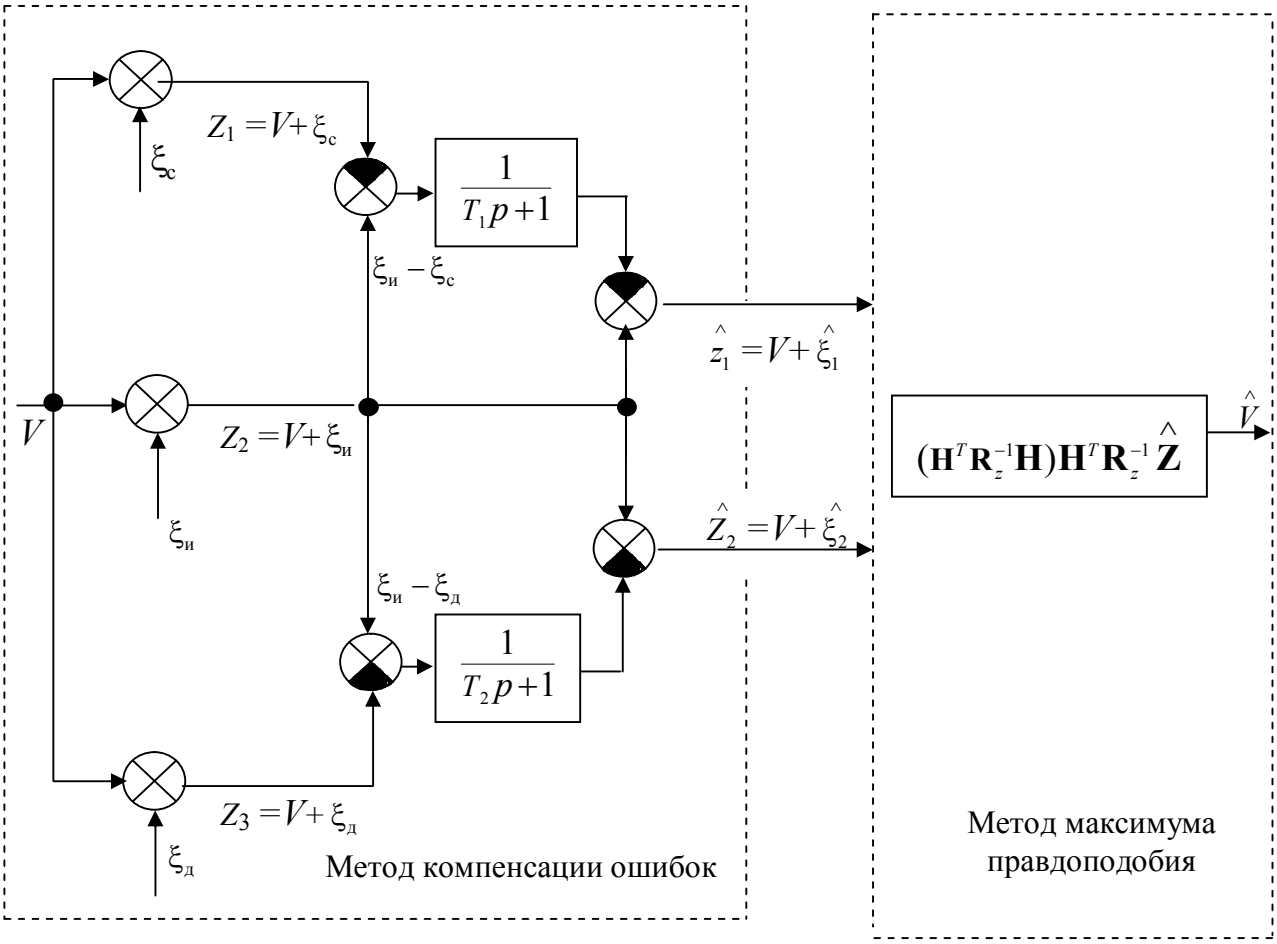


Рис. 1

При рассмотрении первого этапа комплексной обработки информации по методу компенсации ошибок будем считать, что измерители составляющих скоростей имеют стационарные флуктуационные погрешности ξ_c, $\xi_и$, $\xi_д$ для ССН, ИНС и ДИСС соответственно и описываемые корреляционными функциями вида:

$$R_c(|\tau|) = \sigma_c^2 e^{-\alpha_c |\tau|};$$

$$R_и(|\tau|) = \sigma_и^2 e^{-\alpha_и |\tau|};$$

$$R_д(|\tau|) = \sigma_д^2 e^{-\alpha_д |\tau|}.$$

При этом коэффициенты корреляции α_c и $\alpha_д$ имеют значения на несколько порядков превосходящие значение коэффициента корреляции $\alpha_и$.

Обозначим: $\frac{1}{T_1 p+1} = F_1(P)$, а $\frac{1}{T_2 p+1} = F_2(P)$, тогда в соответствие со структурной схемой ошибки оценок составляющих скоростей, полученных на первом этапе комплексной обработки информации, определяют выражениями:

$$\hat{\xi}_1 = [1 - F_1(p)]\,\xi_{\text{и}} + F_1(p)\,\xi_{\text{с}};$$

$$\hat{\xi}_2 = [1 - F_2(p)]\,\xi_{\text{и}} + F_2(p)\,\xi_{\text{д}}.$$

Если ошибки $\xi_{\text{с}}$, $\xi_{\text{и}}$, $\xi_{\text{д}}$ являются стационарными и статистически независимыми случайными функциями времени со спектральными плотностями $S_{\xi_{\text{с}}}(\omega)$, $S_{\xi_{\text{и}}}(\omega) . S_{\xi_{\text{д}}}(\omega)$, то дисперсии ошибок оценок $\hat{\xi}_1$ и $\hat{\xi}_2$ определяют выражениями:

$$\sigma^2_{\hat{\xi}_1} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\left|1 - F_1(j\omega)\right|^2 S_{\xi_{\text{и}}}(\omega) + \left|F_1(j\omega)\right|^2 S_{\xi_{\text{с}}}(\omega)\right]d\omega; \qquad (1)$$

$$\sigma^2_{\hat{\xi}_2} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\left|1 - F_2(j\omega)\right|^2 S_{\xi_{\text{и}}}(\omega) + \left|F_2(j\omega)\right|^2 S_{\xi_{\text{д}}}(\omega)\right]d\omega. \qquad (2)$$

По теореме Винера-Хинчина спектральная плотность ошибки ССН

$$S_{\xi^{\text{с}}}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{\text{с}}(\tau) e^{-j\omega|\tau|} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_{\text{с}}^2 e^{-\alpha_{\text{с}}|\tau|} e^{-j\omega} d\tau = \frac{2\sigma_{\text{с}}^2 \alpha_{\text{с}}}{\alpha_{\text{с}}^2 + \omega^2}. \qquad (3)$$

Аналогично для спектральных плотностей ошибок ИНС и ДИСС имеем:

$$S_{\xi\text{и}}(\omega) = \frac{2\sigma_{\text{и}}^2 \alpha_{\text{и}}}{\sigma_{\text{и}}^2 + \omega^2}; \qquad S_{\xi\text{д}}(\omega) = \frac{2\sigma_{\text{д}}^2 \alpha_{\text{д}}}{\sigma_{\text{д}}^2 + \omega^2} \qquad (4)$$

с учетом того, что $\alpha_{\text{с}} >> \alpha_{\text{и}}$ и $\alpha_{\text{с}} >> \alpha_{\text{и}}$, выражение для спектральной плотности ошибок ССН и ДИСС соответствуют спектральной плотности при $\omega = 0$, т. е.

$$S_{\xi_{\text{с}}}(\omega) = S_{\xi_{\text{с}}}(0) \approx \frac{2\sigma_{\text{с}}^2}{\alpha_{\text{с}}} \quad \text{и} \quad S_{\xi_{\text{д}}}(\omega) = S_{\xi_{\text{д}}}(0) \approx \frac{2\sigma_{\text{д}}^2}{\alpha_{\text{д}}}. \qquad (5)$$

Подставим уравнения (3 – 5) в выражения (1), (2), получим значения дисперсий оценок после первого этапа обработки.

Для контура «ИНС–ССН» можно записать:

$$\sigma^2_{\hat{\xi}_1} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\left|1 - \frac{1}{1 + j\omega T_1}\right|^2 \left(\frac{2\sigma_{\text{и}}^2 \alpha_{\text{и}}}{\alpha_{\text{и}}^2 + \omega^2}\right) + \left|\frac{1}{1 + j\omega T_1}\right|^2 \frac{2\sigma_{\text{с}}^2 \alpha_{\text{с}}}{\alpha_{\text{с}}^2 + \omega^2}\right]d\omega = \frac{\sigma_{\text{с}}^2}{\alpha_{\text{с}} T_1} + \frac{\sigma_{\text{и}}^2 \alpha_{\text{и}} T_1}{\alpha_{\text{и}} T_1 + 1}. \qquad (6)$$

Аналогично дисперсию оценки контура «ИНС – ДИСС» определим выражением

$$\sigma^2_{\hat{\xi}_2} = \frac{\sigma_{\text{д}}^2}{\alpha_{\text{д}} T_2} + \frac{\sigma_{\text{и}}^2 \alpha_{\text{и}} T_2}{\alpha_{\text{и}} T_2 + 1}. \qquad (7)$$

Воспользовавшись методикой, изложенной в работе [1], получим следующие выражения для постоянных времени фильтров, минимизирующих дисперсии оценок, полученных на первом этапе комплексной обработки информации:

$$T_1=\frac{1}{\alpha_{и}(m-1)},\quad T_2=\frac{1}{\alpha_{и}(n-1)},$$

где параметр m определяется из выражения $m^2=\frac{\sigma_{и}^2\alpha_{с}}{\sigma_{с}^2\alpha_{и}}$, параметр n – из выражения $n^2=\frac{\sigma_{и}^2\alpha_{д}}{\sigma_{д}^2\alpha_{и}}$.

Таким образом, после обработки информации на первом этапе по методу компенсации ошибок получаем первичные оценки $\hat{z}_1=V+\hat{\xi}_1$, (контур «ИНС–ССН») и $\hat{z}_2=V+\hat{\xi}_2$, (контур «ИНС–ДИСС»). Следовательно, вектор измерения имеет вид $\hat{\mathbf{z}}=\left|\hat{z}_1\quad \hat{z}_2\right|^T$.

Первичные оценки $\hat{z}_1$, $\hat{z}_2$ поступают на блок вторичной обработки информации по методу максимума правдоподобия. Алгоритм получения оценки по этому методу согласно [1] имеет следующий вид:

$$\hat{\mathbf{V}}=(\mathbf{H}^T\mathbf{R}_z^{-1}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}_z^{-1}\mathbf{Z}. \tag{8}$$

При этом вектор измерения определяется как

$$\hat{\mathbf{z}}=\left|\hat{z}_1\quad \hat{z}_2\right|^T=\mathbf{H}V+\mathbf{V}_z,$$

где матрица наблюдения $\mathbf{H}=\left|1\quad 1\right|^T$, а вектор ошибок $\mathbf{V}_z=\left|\hat{\xi}_1\quad \hat{\xi}_2\right|^T$.

Корреляционная матрица ошибок оценок, полученных на первом этапе обработки,

$$\mathbf{R}_z=M(\mathbf{V}_z\mathbf{V}_z^{\mathrm{T}})=M\begin{bmatrix}\hat{\xi}_1^2 & \hat{\xi}_1\hat{\xi}_2\\ \hat{\xi}_2\hat{\xi}_1 & \hat{\xi}_2^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}M\left(\hat{\xi}_1^2\right) & M\left(\hat{\xi}_1\hat{\xi}_2\right)\\ M\left(\hat{\xi}_2\hat{\xi}_1\right) & M\left(\hat{\xi}_2^2\right)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_1(0) & R_{12}(0)\\ R_{21}(0) & R_2(0)\end{bmatrix}.$$

При условии, что $\hat{\xi}_1$ и $\hat{\xi}_2$ не коррелированы, т. е. $R_{12}(0)=0$:$R_{21}(0)=0$, выражение для корреляционной матрицы с учетом (6) и (7) будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{R}_z=\begin{bmatrix}\sigma_{\hat{\xi}_1}^2 & 0\\ 0 & \sigma_{\hat{\xi}_2}^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\sigma_{с}^2}{\alpha_{с}T_1}+\frac{\sigma_{и}^2\alpha_{и}T_1}{\alpha_{и}T_1+1} & 0\\ 0 & \frac{\sigma_{д}^2}{\sigma_{д}T_2}+\frac{\sigma_{и}^2\alpha_{и}T_2}{\alpha_{и}T_2+1}\end{bmatrix}.$$

Подставив в последнее выражение значения T_1 и T_2, получим:

$$\mathbf{R}_z=\begin{bmatrix}\frac{k_1\sigma_{с}^2m(m-1)+\sigma_{и}^2}{m} & 0\\ 0 & \frac{k_2\sigma_{д}^2n(n-1)+\sigma_{и}^2}{n}\end{bmatrix},$$

где $k_1 = \dfrac{\alpha_и}{\alpha_с}$; $k_2 = \dfrac{\alpha_и}{\alpha_д}$.

Таким образом, оценка измеряемого параметра определяется только статистическими характеристиками измеряемых параметров и представляется суммой двух слагаемых, каждое из которых в результате решения матричного уравнения (8) является произведением оценки измеряемого параметра, полученной на первом этапе обработки, на весовой коэффициент, т. е.

$$\hat{V} = K_1 \hat{Z}_1 + K_2 \hat{Z}_2,$$

где $K_1 = \dfrac{m[\sigma_и^2 + k_2\sigma_д^2 n(n-1)]}{m\sigma_и^2 + n\sigma_с^2 + [k_2(n-1) + k_1(m-1)]\sigma_д^2 mn}$, $K_2 = \dfrac{n[\sigma_и^2 + k_1\sigma_с^2 m(m-1)]}{m\sigma_и^2 + n\sigma_с^2 + [k_2(n-1) + k_1(m-1)]\sigma_д^2 mn}$.

Результаты моделирования алгоритма комплексной обработки навигационной информации при совместном использовании методов компенсации ошибок и метода максимума правдоподобия. Схема моделирования исследуемой системы показана на рис. 2. При этом считалось, что ошибки навигационных систем $\xi_с$, $\xi_и$ и $\xi_д$ описываются корреляционными функциями с параметрами:

$$R_с(\tau) = 100e^{-200|\tau|},\ R_и(\tau) = 100e^{-0.02|\tau|},\ R_д(\tau) = 100e^{-100|\tau|}.$$

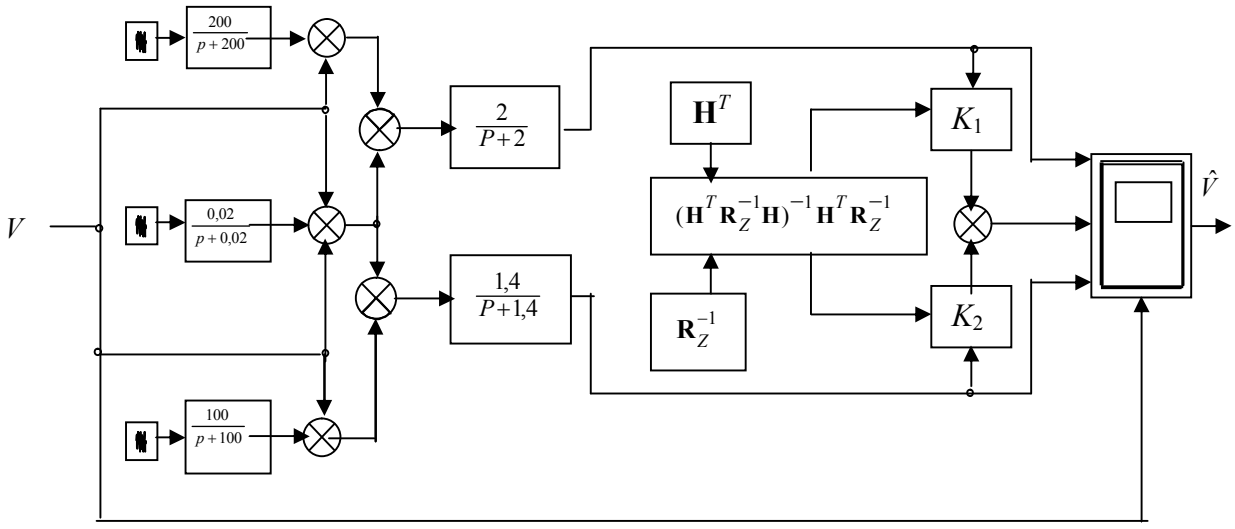


Рис. 2

Для имитации случайного сигнала с заданной характеристикой $R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|}$ белый шум $R(\tau) = \delta(\tau)\, R(t) = d(t)$ в соответствии со схемой пропускается через формирующий фильтр с соответствующей передаточной функцией. Спектральная плотность мощности белого шума $W_о$= 1. Если комплексный коэффициент усиления формирующего фильтра $H(j\omega)$, то на выходе формирующего фильтра появляется случайный сигнал со спектральной плотностью мощности $W_{вых} = H(j\omega)$. Так как требуемая спектральная плотность мощности данного случайного сигнала $W_\xi(\omega) = \dfrac{2\sigma^2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}$, то $|H(j\omega)|^2 =$

$= H(j\omega)H(-j\omega) = \frac{\sqrt{2\alpha\sigma}}{\alpha + j\omega}\frac{\sqrt{2\alpha\sigma}}{\alpha - j\omega}$. Следовательно, $H(j\omega) = \frac{\sqrt{2\alpha\sigma}}{\alpha + j\omega}$ и тогда требуемая передаточная функция формирующего фильтра будет иметь вид $H(p) = \frac{\sqrt{2\alpha\sigma}}{p + \alpha}$, или применительно к рассматриваемому случаю $H_с(p) = \frac{200}{p + 200}$, $H_и(p) = \frac{0,02}{p + 0,02}$, $H_д(p) = \frac{100}{p + 100}$, $T_1 \approx 2$ с, $T_2 \approx 1,4$ с.

Результаты моделирования представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 показан спектр ошибок ИНС (низкочастотная, нарастающая во времени ошибка – линия *1*), а также ССН и ДИСС (высокочастотные ошибки – линия *2*).

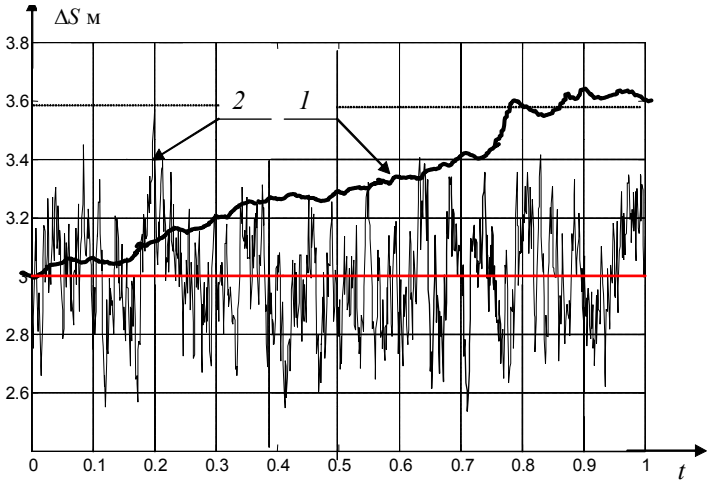


Рис. 3

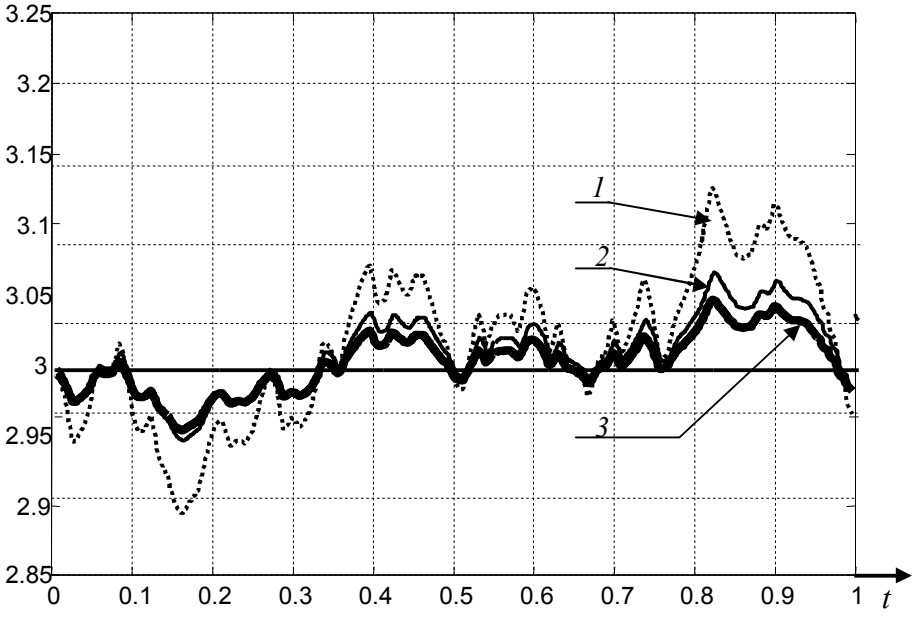


Рис. 4

Результаты моделирования информации от трех датчиков путевой скорости при совместном использовании комплексной обработки информации по методу компенсации ошибок и методу максимума правдоподобия показаны на рис. 4, на котором *1* – оценка

составляющей скорости по методу компенсации ошибок ИНС и ДИСС; *2* – оценка составляющей скорости по методу компенсации ошибок ИНС и ССН; *3* – оценка составляющей скорости при совместном использовании метода компенсации ошибок и метода максимума правдоподобия.

Результаты комплексной обработки подтверждают, что при таком методе обработки информации удается эффективно сгладить высокочастотную помеху, устранить нарастающую во времени погрешность в измерении скорости инерциальной системы и получить оценку измеряемого параметра, погрешность которой меньше погрешности самой точной системы.

Выводы. В отличие от других методов комплексной обработки пилотажно-навигационной информации предложенный подход комплексирования информации от трех датчиков при совместном использовании метода компенсации ошибок измерителей и метода максимума правдоподобия более эффективен и может быть легко реализован в бортовых процессорах бортовых вычислительных машин.

Разработанные для схемы совместного использования метода компенсации ошибок измерителей и метода максимума правдоподобия динамические фльтры, как показали исследования, обеспечивают хорошие фильтрующие свойства схемы комплексирования и достаточно высокие точностные характеристики оценки навигационных параметров.

Исследования показали также, что при таком методе обработки информации удается эффективно сгладить высокочастотную помеху, устранить нарастающую во времени погрешность в измерении пилотажно-навигационных параметров и получить оценку измеряемого параметра, погрешность которой меньше погрешности самой точной системы.

Список литературы

1. *Рогожин В. О., Синєглазов В. М., Філяшкін М. К.* Пілотажно-навігаційні комплекси повітряних суден. – К.: Вид-во НАУ, 2005. – 316 с.
2. *Філяшкін М. К.* Субоптимальні схеми фільтрації в інерціально-супутникових системах управління та навігації // Електроніка та системи управління. – 2006. – №1(7). – 7 с.
3. *Рогожин В О.*, *Хоан Ань Туан, Друк Ю. А.* Исследование алгоритма комплексной обработки нави-гационной информации по методу компенсации ошибок измерителей с использованием фильтров высокого порядка // Електроніка та системи управління – 2008. №2(16). – 7 с.
4. *Monson H. Hayes*.. Digital signal processing. McGraw-Hill, 1999 – P. 367 – 370.
5. *Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrew.* Kalman Filtering-Theory and Practice Using Matlab, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication. – P. 74 – 79.

В. О. Рогожин, Х. А.Туан, Ю. О. Друк

Комплексна обробка навігаційної інформації за сукупного використання методів компенсації помилок та максимуму правдоподібності

Розглянуто алгоритм комплексної обробки навігаційної інформації за сукупного використання методу компенсації помилок та методу максимуму правдоподібності. Показано, що використання такого алгоритму дозволяє суттєво зменшити похибки оцінки вимірюваного параметра. Наведено результати моделювання системи комплексної обробки інформації.

V. O. Rogozhin, H. A. Tuan, Druk Yuri

Complex processing of navigation information by combined using method of error compensation and maximum likelihood estimation

Algorithm of complex processing of navigation information by combined using method of error compensation and maximum likelihood estimation is considered.It is shown, using this algorithm we can substantially decrease estimation errors of measured parameter. Display the modeling results of system of complex processing of information.