



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА РЕПРОДУКЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ В ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ

**В. А. Тупысев<sup>1</sup>, В. А. Полосков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

<sup>2</sup>АО «Радиоавионика»

*В статье рассмотрено использование принципа репродукции измерений при комплексировании информации в пилотажно-навигационных комплексах методами федеративной фильтрации. Суть этого принципа позволяет использовать измерения, поступающие от внешних источников навигационных данных при использовании одной и той же инерциальной навигационной системы, как независимую информацию от двух инерциальных навигационных систем, что существенно упрощает комплексную обработку информации в рамках использования методов федеративной фильтрации при минимальных потерях в точности.*

*Ключевые слова: пилотажно-навигационный комплекс, бесплатформенные инерциальные навигационные системы, фильтр Калмана, репродукция измерений, федеративная фильтрация.*

### **Для цитирования:**

*Тупысев В. А., Полосков В. А. Использование принципа репродукции измерений при обработке информации в пилотажно-навигационных комплексах // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №1(31), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с.9-19. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-1-9-19.*

## THE USE OF THE MEASUREMENTS REPRODUCTION PRINCIPLE IN THE PROCESSING OF FLIGHT NAVIGATION INFORMATION

**V. A. Tupysev, V.A. Poloskov**

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

<sup>2</sup>Radioavionica Corp.

*The use of the measurements reproduction principle in the flight navigation systems for information interconnecting by methods of federated filtering is considered. This principle makes it possible to use measurements coming from external sources of navigation data when using the same inertial navigation system as independent information from two inertial navigation systems, which greatly simplifies the processing of information with the use of federated filtering methods with minimal loss in accuracy.*

*Keywords: flight navigation systems, strapdown inertial navigation system, Kalman filter, reproduction of measurements, federated filtering.*

### **For citation:**

*Tupysev V.A., Poloskov V.A. The use of the measurements reproduction principle in the processing of flight navigation information // System analysis and logistics.: №1(31), ISSN 2007–5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p 9-19. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-1-9-19.*

### **Введение**

Безопасность полетов современных ЛА обеспечивается решением навигационных задач с использованием пилотажно-навигационных комплексов (ПНК), в состав которых для надежности включены несколько бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), а также различные средства внешней коррекции, такие как измерители относительной и абсолютной скорости, системы ближней радионавигации (РСБН), спутниковые навигационные системы (СНС) [1].

Точность выработки навигационных параметров в подобных ПНК может быть повышена путем комплексной обработки информации с использованием, например, оптимального централизованного фильтра Калмана (ФК), вектор состояния которого включает погрешности всех БИНС и медленноменяющихся составляющих погрешностей измерений, проведенных средствами внешней коррекции [2].

Альтернативой такому подходу являются методы федеративной фильтрации, получившие широкое распространение в современных ПНК, суть которых заключается в



выработке комплексных навигационных параметров путем безынерционного осреднения параметров частных фильтров, включенных в состав БИНС и предназначенных для обработки показаний БИНС и информации от средств внешней коррекции [3-6].

Однако следует отметить, что при использовании одних и тех же источников внешней навигационной информации для коррекции и демпфирования нескольких БИНС (что имеет место на практике) параметры, вырабатываемые в различных БИНС, оказываются коррелированными, что значительно усложняет задачу расчета адекватной оценки точности, характеризующей полученные методами федеративной фильтрации навигационные параметры.

В работе решение указанной проблемы рассматривается с использованием принципов репродукции измерений, обеспечивающих гарантированное качество выработки комплексных навигационных параметров, понимаемое в том смысле, что действительная ковариационная матрица ошибок комплексных навигационных параметров будет меньше матрицы, полученной взвешенным осреднением расчетных ковариационных матриц, выработанных в ковариационном канале частных фильтров калмановского типа [7].

### 1. Математическая постановка задачи комплексирования

Применение этих принципов, а также особенность выработки навигационных параметров с использованием оптимального централизованного ФК, поясним на примере навигационного комплекса, в состав которого включены две БИНС, коррекция и демпфирование которых осуществляется от одного лага и одной СНС. Обобщение методов обработки на случай более полного состава средств будет очевидным.

В общем виде модель погрешностей  $i$ -ой БИНС, входящей в состав ПНК, может быть описана уравнением (1):

$$X_{\text{БИНС}i}(k) = \Phi_i(k)X_{\text{БИНС}i}(k-1) + \xi_i(k), \quad X_{\text{БИНС}i}(0) \in N\{0, P(0)\}, \quad \xi_i(k) \in N\{0, Q(k)\} \quad (1)$$

где  $X_{\text{БИНС}i}(k)$  – вектор состояния,  $\Phi_i(k)$ ,  $Q_i(k)$  – нестационарные матрицы, элементы которых приведены в [1],  $\xi_i(k)$  – возмущения, распределенные по нормальному закону.

Вектор состояния  $X_{\text{БИНС}i}(k)$  погрешностей  $i$ -ой БИНС включает погрешности выработки навигационных параметров и погрешности чувствительных элементов [7]:

$$X_{\text{БИНС}i} = \left[ \alpha_i, \beta_i, \chi_i, \Delta V_{Ei}, \Delta V_{Ni}, \Delta V_{hi}, \Delta \phi_i, \Delta \lambda_i, \Delta h_i, \varepsilon_{xi}, \varepsilon_{yi}, \varepsilon_{zi}, \delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi} \right]^T$$

где  $\alpha_i$  – азимутальная ошибка БИНС;  $\beta_i$ ,  $\chi_i$  – погрешности построения плоскости горизонта;  $\Delta V_{Ei}$ ,  $\Delta V_{Ni}$ ,  $\Delta V_{hi}$  – погрешности выработки составляющих скорости БИНС в географических осях;  $\Delta \phi_i$ ,  $\Delta \lambda_i$ ,  $\Delta h_i$  – погрешности выработки широты, долготы и высоты;  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{yi}$ ,  $\varepsilon_{zi}$ ,  $\delta_{xi}$ ,  $\delta_{yi}$ ,  $\delta_{zi}$  – погрешности гироскопических чувствительных элементов и погрешности акселерометров в связанных осях.

Кроме двух БИНС в состав ПНК, включен относительный лаг и приемоиндикатор СНС, показания которых могут быть использованы для калибровки, коррекции и демпфирования БИНС.

Измерение абсолютной скорости объекта относительным лагом, с учетом того, что относительный лаг измеряет скорость объекта относительно воды, содержит методическую погрешность, вызванную наличием скорости ветра. Как следствие, модель измерений скорости относительным лагом при движении ЛА горизонтально может быть описана следующим уравнением (2):

$$V_{\text{л}}(k) = V(k) - V_{\text{TN}}(k) \cos K(k) - V_{\text{TE}}(k) \sin K(k) + v_1(k) \quad (2)$$



где  $V(k)$  – истинная продольная скорость движения объекта;  $V_{TN, TE}(k)$  – северная и восточная составляющие скорости ветра;  $v_1(k)$  – флуктуационная ошибка лага.

Предполагается, что составляющие скорости сноса описываются процессами с корреляционной функцией вида (3):

$$K_{TN, TE}(\tau) = \sigma_{TE, TN}^2 \exp(-\mu_T |\tau|), \quad (3)$$

где  $\sigma_{TE, TN}^2$  – дисперсия составляющих скорости сноса;  $\mu_T$  – величина обратная интервалу корреляции скорости сноса.

Будем также полагать, что показания спутникового приемоиндикатора могут быть адекватно описаны моделью (4):

$$\begin{aligned} \varphi_c(k) &= \varphi(k) + C_1(k) + v_3(k), \\ \lambda_c(k) &= \lambda(k) + C_2(k) + v_3(k) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi(k)$ ,  $\lambda(k)$  – истинные значения координат объекта;  $C_i(k)$  – медленноменяющиеся составляющие погрешностей измерения координат, описываемые процессами с корреляционными функциями вида (5):

$$K(\tau) = \sigma_{C1,2}^2 \exp(-\mu_c |\tau|) \quad (5)$$

где  $\sigma_{C1,2}^2$  – дисперсия погрешности измерения координат;  $\mu_c$  – величина, обратная интервалу погрешности измерения координат;  $v_{1,2}(k)$  – флуктуационные ошибки измерения СНС.

## 2. Решение задачи комплексирования с использованием оптимального централизованного фильтра Калмана

Для выявления особенностей методов федеративной фильтрации с использованием принципов репродукции измерений рассмотрим вначале выработку навигационных параметров с использованием оптимального централизованного ФК. Применительно к рассматриваемой постановке задачи выработка навигационных параметров оптимальным образом может быть проиллюстрирована схемой обработки информации, приведенной на рисунке 1, при этом вектор состояния централизованного фильтра имеет вид (6):

$$X = [X_{\text{БИНС1}}^T, X_{\text{БИНС2}}^T, V_{NT}, V_{ET}, C_1, C_2]^T, \quad (6)$$

где  $X_{\text{БИНС1,2}}$  – вектор состояния погрешностей БИНС 1 и БИНС 2.

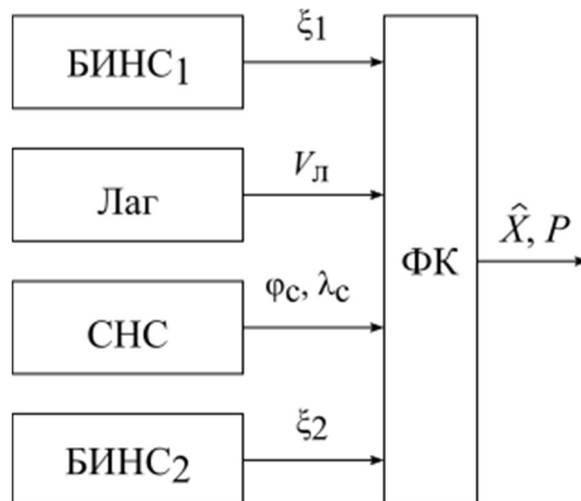


Рис. 1. Схема централизованного фильтра Калмана



Совокупность разностных измерений, обрабатываемых в централизованном фильтре, можно представить в виде системы уравнений (7):

$$\begin{aligned} Z_1(k) &= \xi_{1_1}(k) - \xi_2(k); \\ Z_2(k) &= V_{\text{БИНС}_{E1}}(k) - V_L(k) \sin K_1(k); \\ Z_3(k) &= V_{\text{БИНС}_{N1}}(k) - V_L(k) \cos K_1(k); \\ Z_4(k) &= \varphi_{\text{БИНС}_1}(k) - \varphi_{\text{СНС}}(k); \\ Z_5(k) &= \lambda_{\text{БИНС}_1}(k) - \lambda_{\text{СНС}}(k). \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\xi_i = [\psi_i, \theta_i, \gamma_i, V_{Ei}, V_{Ni}, V_{hi}, \varphi_i, \lambda_i, h_i]^T$  – показания  $i$ -ой инерциальной системы по углам качки, составляющим скорости, координатам и курсу.

Отметим, что применение централизованного фильтра для обработки всей совокупности измерений имеет ряд недостатков по сравнению с децентрализованными методами обработки информации. Наиболее существенным из них является тот факт, что наличие сбоев в показаниях одной из БИНС может привести к неверному оцениванию всего вектора состояния, в том числе уходов гироскопов второй БИНС и, как следствие, к неработоспособности всего комплекса.

С другой стороны, централизованный фильтр, оптимальный по своей сути, позволяет оценить потенциальную точность комплексной обработки информации и результаты его моделирования используются далее для оценки эффективности рассматриваемых методов федеративной фильтрации.

### 3. Применение принципов федеративной фильтрации

На практике, наряду с ПНК с централизованным фильтром, принято использовать модульный принцип построения навигационных комплексов, который позволяет повысить надежность, а также снизить вычислительные затраты, по сравнению с централизованной схемой обработки.

В частности, широко используется методы федеративной фильтрации, суть которых заключается в использовании банка частных фильтров калмановского типа, реализуемых в составе измерительных модулей и предназначенных для первичной обработки полученных в них измерений. Комплексная оценка вектора состояния формируется с использованием выработанных в этих фильтрах частных оценок путем их взвешенного осреднения.

Для рассматриваемой постановки задачи принципы федеративной фильтрации могут быть проиллюстрированы схемой обработки информации, показанной на рисунке 2 и предполагающей использование двух частных фильтров с вектором состояния вида:

$$X_1 = [X_{\text{БИНС}_1}^T, V_{NT}, V_{ET}, C_1, C_2]^T, X_2 = [X_{\text{БИНС}_2}^T, V_{NT}, V_{ET}, C_1, C_2]^T,$$

в каждом из которых обрабатывается следующий набор измерений (8):

$$\begin{aligned} Z_{11}(k) &= V_{\text{БИНС}_{E1}}(k) - V_L(k) \sin K_1(k); \\ Z_{12}(k) &= V_{\text{БИНС}_{N1}}(k) - V_L(k) \cos K_1(k); \\ Z_{13}(k) &= \varphi_{\text{БИНС}_1}(k) - \varphi_{\text{СНС}}(k); \\ Z_{14}(k) &= \lambda_{\text{БИНС}_1}(k) - \lambda_{\text{СНС}}(k); \\ Z_{21}(k) &= V_{\text{БИНС}_{E2}}(k) - V_L(k) \sin K_2(k); \\ Z_{22}(k) &= V_{\text{БИНС}_{N2}}(k) - V_L(k) \cos K_2(k); \end{aligned} \quad (8)$$



$$Z_{23}(k) = \varphi_{\text{БИНС}_2}(k) - \varphi_{\text{СНС}}(k);$$

$$Z_{24}(k) = \lambda_{\text{БИНС}_2}(k) - \lambda_{\text{СНС}}(k).$$

В частных фильтрах по скоростной и позиционной информации, поступающей от относительного лага и приемника СНС, вырабатываются оценки  $\hat{X}_1(k)$ ,  $\hat{X}_2(k)$ , а в ковариационном канале фильтров вырабатываются ковариационные матрицы  $P_1(k)$ ,  $P_2(k)$ , характеризующие точность полученных частных оценок.

При такой схеме обработки комплексная оценка вектора состояния  $\hat{X}(k)$  и расчетная ковариационная матрица  $P(k)$  вырабатываются в блоке безынерционного осреднения (ББО) путем взвешенного осреднения параметров, выработанных в частных фильтрах с использованием следующих выражений (9):

$$P(k) = \left( \sum_{i=1}^2 P_i^{-1}(k) \right)^{-1};$$

$$\hat{X}(k) = P(k) \left( \sum_{i=1}^2 P_i^{-1}(k) \hat{X}_i(k) \right).$$
(9)



Рис. 2. Схема федеративного фильтра

Заметим, что в общем случае методы федеративной фильтрации не являются оптимальными, при этом существенным является то, что ковариационная матрица  $P(k)$ , рассчитываемая в блоке безынерционного осреднения, не является действительной ковариационной матрицей ошибки комплексной оценки.

Более того, в рассматриваемой постановке при использовании одних и тех же источников внешней навигационной информации, применяемых для получения оценок в частных фильтрах, возникает корреляция выходных параметров  $\hat{X}_1(k)$  и  $\hat{X}_2(k)$ , неучет которой в блоке ББО приводит к тому, что действительная ковариационная матрица ошибок  $D(k)$  выработки навигационных данных превышает расчетную ковариационную матрицу ошибок  $P(k)$ . В этом случае последняя не может рассматриваться как мера точности выработки навигационных параметров.

#### 4. Применение принципа репродукции измерений и оцениваемых процессов

Для получения федеративного фильтра с гарантированным качеством оценивания, обладающим свойством, что расчетная ковариационная матрица является оценкой сверху для действительной ковариационной матрицы навигационных параметров в смысле выполнения неравенства (10):

$$D(k) \leq P(k), \quad (10)$$



понимаемого как неравенство квадратичных форм можно использовать принцип репродукции измерений и оцениваемых процессов, суть которых заключается в рассмотрении одних и тех же измерений как независимых измерений. При такой трактовке схема, представленная на рисунке 2 преобразуется к схеме, представленной на рисунке 3.

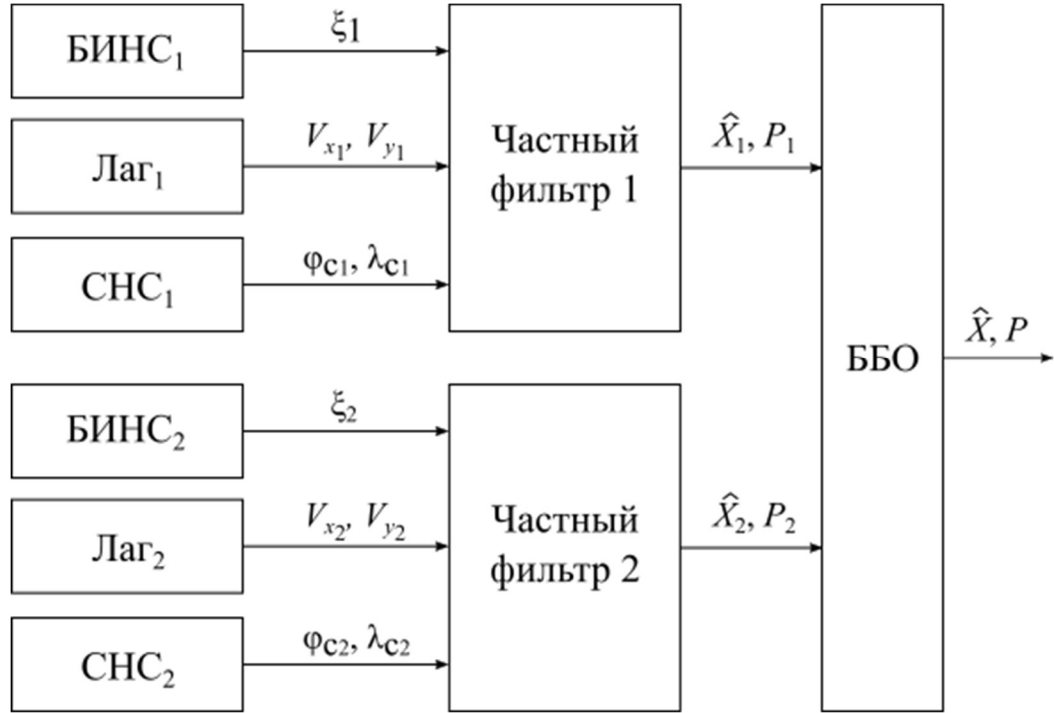


Рис. 3. Схема федеративного фильтра

В такой схеме вместо одного блока измерителя скорости и измерителя координат, используются два блока, а уравнения измерений (8) преобразуются следующим образом (11):

$$\begin{aligned}
 Z_{11}(k) &= V_{\text{БИНС}_{E1}}(k) - V_{\text{Л2}}(k) \sin K_1(k); \\
 Z_{12}(k) &= V_{\text{БИНС}_{N1}}(k) - V_{\text{Л2}}(k) \cos K_1(k); \\
 Z_{13}(k) &= \varphi_{\text{БИНС}_1}(k) - \varphi_{\text{СНС}_1}(k); \\
 Z_{14}(k) &= \lambda_{\text{БИНС}_1}(k) - \lambda_{\text{СНС}_1}(k); \\
 Z_{21}(k) &= V_{\text{БИНС}_{E2}}(k) - V_{\text{Л2}}(k) \sin K_2(k); \\
 Z_{21}(k) &= V_{\text{БИНС}_{N2}}(k) - V_{\text{Л2}}(k) \cos K_2(k); \\
 Z_{23}(k) &= \varphi_{\text{БИНС}_2}(k) - \varphi_{\text{СНС}_2}(k); \\
 Z_{24}(k) &= \lambda_{\text{БИНС}_2}(k) - \lambda_{\text{СНС}_2}(k).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Тот факт, что на самом деле используются одни и те же измерения можно учесть, введя дополнительные уравнения связей между параметрами (12):

$$\begin{aligned}
 0 &= V_{\text{ЕТ1}}(k) - V_{\text{ЕТ1}}(k); \\
 0 &= V_{\text{ЕН1}}(k) - V_{\text{ЕН1}}(k); \\
 0 &= C_{11}(k) - C_{12}(k); \\
 0 &= C_{21}(k) - C_{22}(k)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Базовой основой для такого подхода служат принципы репродукции измерений и оцениваемых процессов, устанавливающих эквивалентность решения задачи оптимального





оценивания в обычном и расширенном пространстве состояний. Подробно доказательство этих принципов приведено в [5-6]. В настоящей работе ограничимся лишь кратким изложением обобщенного принципа, суть которого заключается в том, что при решении задачи оптимального оценивания вектора состояния  $\tilde{X}(k)$ , модель динамической системы, описываемая уравнениями (13) и (14):

$$\tilde{X}(k) = \tilde{\Phi}(k)\tilde{X}(k-1) + w(k), \quad \tilde{X}(0) \in \{\tilde{\bar{X}}, \bar{P}(0)\}, \quad w(k) \in N\{0, \tilde{Q}(k)\}, \quad (13)$$

$$Y(k) = H(k)\tilde{X}(k) + v(k) \quad v(k) \in N\{0, \tilde{R}(k)\} \quad (14)$$

где  $\tilde{\Phi}$  – матрица динамики,  $H$  – матрица измерений;  $w(k)$ ,  $v(k)$  – белые шумы; и модель в расширенном пространстве состояний (15), (16):

$$\tilde{X}_j(k) = \tilde{\Phi}(k)\tilde{X}_j(k-1) + w_j(k), \quad \tilde{X}_j(0) \in \{\tilde{\bar{X}}_j, \bar{P}_j(0)\}, \quad w_j(k) \in N\{0, \tilde{Q}_j(k)\}, \quad (15)$$

$$Y_i(k) = H(k)\tilde{X}_j(k) + v_i(k), \quad v_i(k) \in N\{0, \tilde{R}_i(k)\}, \quad (16)$$

в которых  $v_i(k)$  – независимые между собой белозумные ошибки измерений, при выполнении следующих условий:

$$\sum_{i=1}^N \tilde{R}_i^{-1}(k) = \tilde{R}^{-1},$$

$$\sum_{i=1}^N \tilde{R}_i^{-1}(k)Y_i(k) = \tilde{R}^{-1}(k)Y(k)$$

и при выполнении условий для процессов:

$$\sum_{i=1}^N \tilde{Q}_i^{-1}(k) = \tilde{Q}^{-1}(k),$$

$$\sum_{i=1}^N \tilde{P}_i^{-1}(k) = \tilde{P}^{-1}(k)$$

при обработке на каждом шаге уравнений связей как нулевых измерений, проведенных без ошибок

$$0 = \tilde{X}_{j+1}(k) - \tilde{X}_j(k), \quad j = \overline{1, N-1}$$

обеспечивает эквивалентность вырабатываемых оптимальных оценок в смысле выполнения соотношений в обычном и расширенном пространствах состояний (17), (18):

$$X_p(k) = SX(k), \quad (17)$$

$$P_p(k) = SP(k)S^T \quad (18)$$

где  $X_p(k) = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_N^T]^T$ , а  $S$  – матрица, отображающая вектор  $X(k)$  в вектор  $[X^T, X^T, \dots, X^T]^T$ , содержащий  $N$  векторов  $X(k)$ .

Заметим, что в рассматриваемой задаче ошибки БИНС предполагаются независимыми. Можно показать, что в этом случае репродукции фактически подвергаются только процессы,



описывающие параметры сноса и медленноменяющиеся составляющие ошибок спутникового приемоиндикатора, для которых выбираются следующие условия настройки для погрешностей относительного лага (19):

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N R_{iENT}^{-1}(k) &= R_{ENT}^{-1}(k), \\ \sum_{i=1}^N Q_{iENT}^{-1}(k) &= Q_{ENT}^{-1}(k), \\ \sum_{i=1}^N P_{iENT}^{-1}(0) &= P_{ENT}^{-1}(0)\end{aligned}\quad (19)$$

для погрешностей приемоиндикатора СНС (20):

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N R_{iC12}^{-1}(k) &= R_{C12}^{-1}(k)Y(k), \\ \sum_{i=1}^N Q_{iC12}^{-1}(k) &= Q_{C12}^{-1}(k), \\ \sum_{i=1}^N P_{iC12}^{-1}(k) &= P_{C12}^{-1}(k)\end{aligned}\quad (20)$$

Важной особенностью предложенного решения является то, что, что выбор условий настройки частных фильтров, удовлетворяющих принципам репродукции измерений и репродукции процессов, обеспечивает гарантированное оценивание состояния динамической системы при переходе от решения задачи оптимального оценивания в расширенном пространстве состояний к задаче оценивания методами федеративной фильтрации, подробно рассмотренными в [5-6]. Суть такого перехода связана с обработкой уравнений связей только на одном текущем шаге выработки навигационных параметров, при этом обеспечивается выполнение неравенства  $D(k) \leq P(k)$ , позволяющее рассматривать матрицу  $P(k)$  как меру точности выработки комплексных навигационных параметров.

## 5. Результаты моделирования

Для оценки эффективности федеративных фильтров был проведен сравнительный анализ двух федеративных фильтров с условиями настройки для погрешностей лага и приемоиндикатора СНС:

– первый фильтр:

$$\begin{aligned}\sigma_{1TE,TN}^2 &= \sigma_{2TE,TN}^2 = \sigma_{TE,TN}^2, \quad R_{1ENT}^{-1} = R_{2ENT}^{-1} = R_{0ENT}^{-1}, \\ \sigma_{1C1,2}^2 &= \sigma_{2C1,2}^2 = \sigma_{C1,2}^2, \quad R_{1C1,2}^{-1} = R_{2C1,2}^{-1} = R_{0C1,2}^{-1};\end{aligned}$$

– второй фильтр:

$$\begin{aligned}\sigma_{1TE,TN}^2 &= \sigma_{2TE,TN}^2 = 2\sigma_{TE,TN}^2, \quad R_{1ENT}^{-1} = R_{2ENT}^{-1} = \frac{1}{2}R_{0ENT}^{-1}, \\ \sigma_{1C1,2}^2 &= \sigma_{2C1,2}^2 = 2\sigma_{C1,2}^2, \quad R_{1C1,2}^{-1} = R_{2C1,2}^{-1} = \frac{1}{2}R_{0C1,2}^{-1}.\end{aligned}$$

Результаты моделирования средних квадратических погрешностей выработки отшествия представлены на рисунке 4 для случая, когда рассматриваются однотипные БИНС полуаналитического типа; на рисунке 5 приведены данные моделирования для случая, когда одна из БИНС навигационного комплекса имеет географическую ориентацию измерительных осей, а стабилизированная платформа другой БИНС вращается в плоскости горизонта со скоростью равной 4 угловым скоростям вращения Земли.



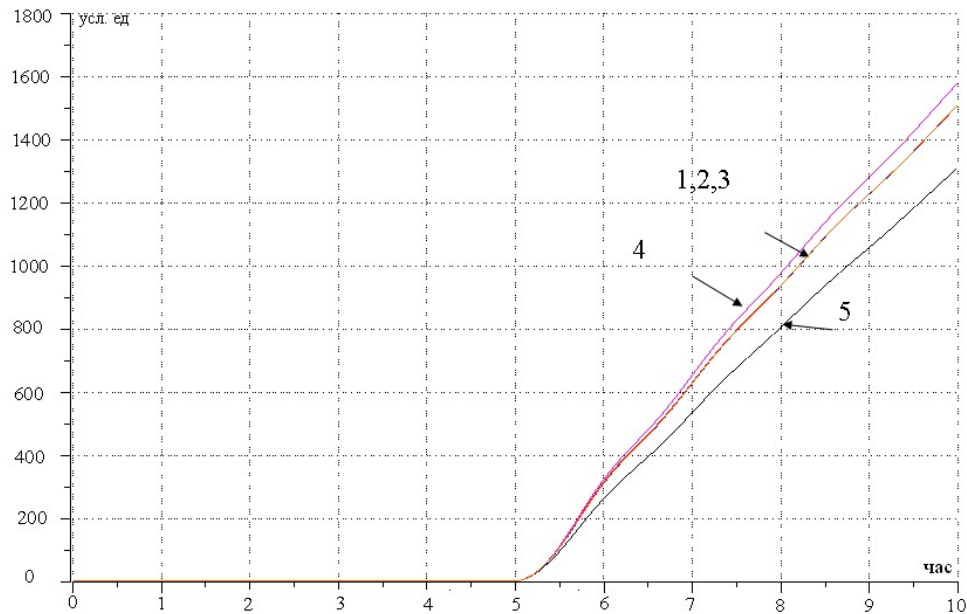


Рис. 4. Результаты моделирования погрешности выработки отществия

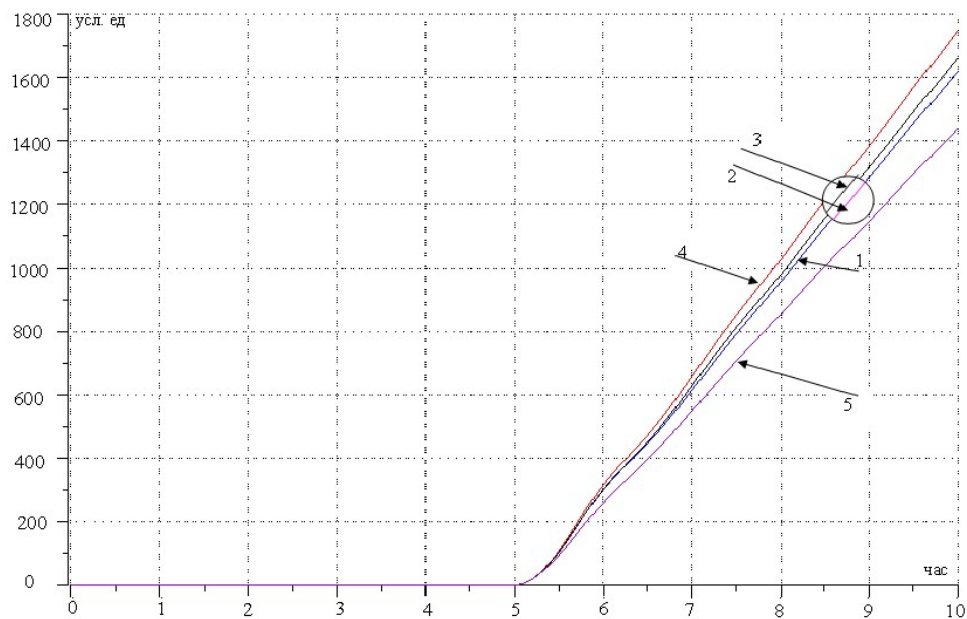


Рис. 5. Результаты моделирования погрешности выработки отществия

На этих рисунках кривая 1 иллюстрирует поведение погрешности выработки долготы при оптимальной обработке измерений с использованием централизованного фильтра; кривые 2, 3 – поведение действительной и расчетной погрешности выработки долготы с использованием федеративного фильтра при согласованной настройке частных фильтров, обеспечивающих гарантированное качество оценивания; кривые 4, 5 отражают действительную и расчетную погрешности выработки долготы полученную путем безынерционного осреднения оценок частных фильтров при использовании при обработке одних и тех же измерений (без учета взаимной корреляции).

Отметим, что в рассматриваемых примерах оценки частных фильтров будут оптимальными, но комплексная оценка, полученная осреднением оптимальных частных оценок (кривая 4), уступает по точности оценке, выработанной в федеративном фильтре при согласованной настройке частных фильтров, обеспечивающей гарантированное оценивание.



Более того, ковариационная матрица, рассчитываемая в блоке безынерционного осреднения такого фильтра, меньше действительной ковариационной матрицы комплексной оценки и ее диагональные элементы не могут служить мерой точности комплексной оценки.

Также отметим, что кривые 2 и 3 практически совпадают с кривой 1, что подтверждает эффективность использования федеративного фильтра с гарантированным качеством в рассматриваемой задаче.

### **Заключение**

Рассмотренный в работе принцип репродукции измерений и оцениваемых процессов, позволяет использовать информацию, применяемую для демпфирования и коррекции БИНС, входящих в состав ПНК, поступающую от одних и тех же измерителей, как информацию, полученную от различных источников. Погрешность выработки навигационных данных в ПНК построенного с использованием такого принципа, не значительно превышает погрешности ПНК, построенного на основе централизованного фильтра, обеспечивающего оптимальное решение.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Техническая эксплуатация пилотажно-навигационных комплексов / под ред. А.В. Скрипуа. – М.: Транспорт, 1992. – 296 с.
2. Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб: ГНС РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
3. Carlson N. A. Federated Filter for Fault-Tolerant Integrated Navigation Systems / Carlson N. A. //AGARDograph 331, Aerospace Navigation Systems, June 1995.
4. Carlson N. A. Information-Sharing Approach to Federated Kalman Filtering / Carlson N. A. //Proc. of National Aerospace and Electronic Conference. – Dayton, 1988. – P.1 – 9.
5. Tupysev V. A. A Generalized Approach to the Problem of Distributed Kalman Filtering / V.A. Tupysev //Proc. of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. – Boston, 1998. – Part 2. P. 1097 – 1116.
6. Tupysev V. A. Federated Kalman Filtering Via Formation of Relation Equations in Augmented State Space / V. A. Tupysev // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2000. – Vol. 23, N 3. – P. 391 – 398.
7. Тупысев, В. А. Поканальная обработка информации с гарантированной точностью выработки оценок / В. А. Тупысев // Вопросы кораблестроения, сер. Навигация и гироскопия. – 1985. – N 82. – С. 54 – 61.

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Тупысев Виктор Авенирович –**

Д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: [viktortupysev@yandex.ru](mailto:viktortupysev@yandex.ru)

**Полосков Владимир Андреевич –**

Инженер

АО «Радиоавионика»

190005, Россия, Санкт-Петербург, Троицкий пр., д. 4, лит. Б

E-mail: [poloskov96@mail.ru](mailto:poloskov96@mail.ru)



## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tupysev Viktor Avenirovich –**

D. tech. sciences, associate Professor

Saint-Peterdurg State University of Aerospace Instrumentation

67, BolshayaMorskaia str. Saint-Petersburg,190000, Russia

E-mail: viktortupysev@yandex.ru

**Poloskov Vladimir Andreevich –**

Software engineer

Radioavionica Corp.

Radioavionica, 4, Troitskiy ave., Saint-Petersburg, 190005, Russia

E-mail: poloskov96@mail.ru