

С. НЮ, Ц. У, Ц. ЧЖАН

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕЕ СООТВЕТСТВИЯ РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ

*Фильтр Калмана принято считать оптимальным алгоритмом обработки данных при создании интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем, где для описания погрешности местоположения по данным глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в слабосвязанной системе зачастую используют белую модель. В то же время результаты множества исследований свидетельствуют о том, что эта погрешность имеет характерную временную корреляцию. Корректная модель погрешностей при настройке фильтра Калмана позволит получать оценку точности на уровне фактической, неточная же вызовет расхождение между расчетным и фактическим значениями. Кроме того, оказывается ненадежным метод контроля качества измерений на основе расчетных ковариаций невязок, что не позволяет использовать его для определения грубых промахов. В настоящей работе исследуются модели погрешностей позиционных и скоростных измерений ГНСС и их влияние на эффективность контроля качества функционирования интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем. Для решения проблемы использования модели окрашенных шумов измерений ГНСС и обеспечения соответствия навигационных решений расчетным характеристикам точности в статье применяется метод расширения вектора состояния системы. Приемлемость уточненной модели подтверждается адекватностью контроля качества полученных данных. Результаты моделирования и натурных испытаний показали, что предложенный метод расширения пространства состояний позволяет повысить степень соответствия фактической погрешности оценивания вычисленным в фильтре среднеквадратическим отклонениям и обеспечить адекватную работу алгоритма контроля качества на основе расчетных ковариаций невязок и информационную надежность интегрированной системы.*

**Ключевые слова:** погрешность местоположения ГНСС, моделирование погрешности, расширение вектора состояния, анализ согласованности, контроль качества.

---

**Ню Сяоци.** Доктор наук, профессор. Центр исследований ГНСС, Уханьский университет, Объединенный центр инноваций в области геопространственных технологий (Китай).

**У Цзяо.** Аспирант. Центр исследований ГНСС, Уханьский университет.

**Чжан Цюань.** Доктор наук, научный сотрудник Центра исследований ГНСС, Уханьский университет, Объединенный центр инноваций в области геопространственных технологий.

---

Научный редактор перевода к.т.н. А.В. Лопарев.

## Введение

ГНСС и инерциальная навигационная система (ИНС) обладают существенными взаимодополняющими достоинствами. Комплексируя данные, вырабатываемые этими двумя системами, можно получить высокоточную, надежную, обновляемую с высокой частотой, полную навигационную информацию [1]. В слабосвязанных интегрированных системах для комплексирования информации ГНСС и ИНС широко используется фильтр Калмана (ФК) [2–4]. Использование ФК предполагает, что погрешности измерений не коррелированы между собой; другими словами, шум измерений представляет собой белый шум [1]. На практике условие некоррелированности погрешностей измерений, принимаемое во внимание при построении ФК, не выполняется, например, когда измерения, обрабатываемые ФК, представляют собой выходной сигнал другого фильтра или алгоритма оценивания. Таким образом, коррелированный во времени шум измерений потенциально может исказить оценки, вырабатываемые фильтром [1]. Тем не менее при построении интегрированной инерциально-спутниковой системы погрешность определения местоположения ГНСС нередко представляют именно белым шумом, в результате чего расчетные значения среднеквадратических погрешностей (СКП) оценивания и фактические значения плохо согласуются друг с другом, что по сути приводит к субоптимальному оцениванию и влиянию грубых промахов на навигационное решение. Оценки, вырабатываемые ФК, будем называть согласованными, если расчетная характеристика точности, полученная с помощью оптимальной процедуры оценивания, практически совпадает с действительной, что свидетельствует об адекватности модели погрешностей, используемой в ФК.

Многочисленные исследования показывают, что погрешности определения местоположения и скорости ГНСС имеют сильную временную корреляцию из-за влияния эффекта многолучевого распространения и других факторов [5–8]. Пренебрежение этим фактом при построении алгоритмов обработки данных нарушает их строгость. Таким образом, адекватная модель погрешностей измерений необходима для улучшения согласованности оценок ФК [9], повышения надежности алгоритма выявления грубых промахов в процессе контроля качества измерений, а также обеспечения согласованности расчетных значений СКП с фактическим уровнем погрешности оценивания.

На практике невозможно построить точную модель, учитывающую временную корреляцию первичных данных, или полностью учесть ее, поэтому в данных об оценках местоположения будут присутствовать коррелированные во времени, или окрашенные, шумы. Окрашенный шум можно описать гауссовским марковским процессом или авторегрессионной моделью первого порядка с порождающим белым гауссовским шумом. Если впоследствии обрабатывать эти данные, окрашенный шум необходимо должным образом учитывать, используя соответствующие модификации ФК [10]. В настоящее время можно выделить два подхода, позволяющих трансформировать алгоритм ФК для обработки измерений с окрашенными шумами [10, 15]: расширение вектора состояния (РВС) [11, 12] и формирование конечных разностей измерений [13, 14].

Метод РВС заключается в добавлении в него коррелированной во времени погрешности измерений. Чтобы избежать сингулярности требующих обращения матриц, целесообразно представить погрешности измерений ГНСС в виде суммы марковской последовательности, описывающей окрашенные шумы, и дискретного белого шума, учитывающего другие немоделируемые погрешности

измерений [16]. Это означает, что окрашенная шумовая составляющая погрешности измерений ГНСС вводится в вектор состояния и оценивается вместе с исходным вектором состояния, а немоделируемые шумы учитываются как белый шум в уравнении. Эффективность данного подхода при обработке измерений с белыми и окрашенными шумами была подтверждена теоретически и практически, он прост в построении и реализации. Кроме того, проблему расхождения алгоритма можно решить методом понижения порядка [11].

При использовании метода конечных разностей измерение, полученное в текущий момент времени, используется для уточнения вектора состояния, соответствующего предшествующему моменту времени. В связи с этим оценка вектора состояния формируется с запаздыванием на интервал дискретизации. Запаздывания можно избежать, применив процедуру сглаживания и тем самым получив искомую оценку в режиме реального времени. Для решения этой задачи предложено использовать модифицированный алгоритм дифференцирования [14], теоретически схожий с методом Брайсона. По сравнению со стандартным ФК применение как традиционного, так и модифицированного алгоритмов дифференцирования требует дополнительных вычислений. В настоящей работе вследствие простоты реализации основное внимание уделяется методу РВС.

Существуют различные методы определения параметров погрешности [17–19], в частности анализ вариаций Аллана при ограниченной выборке. Анализ вариаций Аллана, построенных в двойном логарифмическом масштабе, позволяет выделять составляющие погрешности различных типов в соответствии с наклоном графика на различных участках и определять уровень этих погрешностей [19]. На этом графике можно выделить окрашенный шум как марковский процесс первого порядка, определить время корреляции и интенсивность порождающего шума. Также по этому графику можно определить интенсивность белозумной составляющей.

В настоящей работе погрешность измерений ГНСС, коррелированная во времени, вводится в вектор состояния интегрированной системы и описывается гауссовским марковским процессом первого порядка. Остаточный белый шум в измерениях ГНСС сохраняется в уравнении измерений. Путем проведения моделирования и натурных испытаний сравнивается согласованность оценок ФК при использовании модифицированной и традиционной моделей погрешностей. Анализируется свойство робастности получаемых оценок путем моделирования погрешностей в виде грубых промахов.

### Методика

Дискретная модель системы с коррелированным во времени измерительным шумом может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k/k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}, \\ Z_k = H_k X_k + V_k, \\ V_k = \Theta_{w,k} V_{w,k} + \Theta_{c,k} V_{c,k}, \end{cases} \quad (1)$$

где возмущение  $W_k$  – это дискретный белый шум, погрешность измерений  $V_k$  представляет собой сумму дискретного белого шума  $V_{w,k}$  и окрашенного шума  $V_{c,k}$ , при этом  $W_k$  и  $V_k$  статистически независимы.

Белешумная составляющая погрешностей измерений  $V_{w,k}$  характеризуется первыми двумя моментами:

$$\begin{cases} E[V_{w,k}V_{w,j}^T] = R_{w,k}\delta_{k,j}, k \neq j, \\ E[V_{w,k}V_{c,j}^T] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Диагональные элементы матрицы ковариаций  $R_{w,k}$  представляют собой дисперсии белешумных составляющих погрешностей позиционных  $\sigma_{r,w}^2$  и скоростных  $\sigma_{v,w}^2$  измерений.

Окрашенный шум может быть представлен как выходная последовательность формирующего фильтра вида

$$V_{c,k} = \Psi_{c,k/k-1}V_{c,k-1} + \zeta_{k-1}, \quad (3)$$

где  $\zeta_{k-1}$  – порождающий центрированный белый шум:

$$\begin{cases} E[\zeta_k\zeta_j^T] = R_{c,k}\delta_{k,j}, k \neq j, \\ E[\zeta_k] = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В методе РВС окрашенный шум измерений включается в вектор состояния, что позволяет компенсировать его влияние при формировании искомых оценок. Уравнение состояния принимает вид:

$$\begin{bmatrix} X_k \\ V_{c,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{k/k-1} & 0 \\ 0 & \Psi_{c,k/k-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{k-1} \\ V_{c,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_{k-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{k-1} \\ \zeta_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Уравнение измерений можно записать в следующем виде:

$$Z_k = H_k X_k + V_k = H_k X_k + \Theta_{w,k} V_{w,k} + \Theta_{c,k} V_{c,k} = [H_k \quad \Theta_{c,k}] \begin{bmatrix} X_k \\ V_{c,k} \end{bmatrix} + \Theta_{w,k} V_{w,k}. \quad (6)$$

Систему уравнений (5), (6) можно представить в компактной форме:

$$\begin{cases} X_k^a = \Phi_{k/k-1}^a X_{k-1}^a + \Gamma_{k-1}^a W_{k-1}^a, \\ Z_k = H_k^a X_k^a + V_k^a, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} X_k^a &= \begin{bmatrix} X_k \\ V_{c,k} \end{bmatrix}, & \Phi_{k/k-1}^a &= \begin{bmatrix} \Phi_{k/k-1} & 0 \\ 0 & \Psi_{c,k/k-1} \end{bmatrix}, \\ \Gamma_{k-1}^a &= \begin{bmatrix} \Gamma_{k-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, & W_{k-1}^a &= \begin{bmatrix} W_{k-1} \\ \zeta_{k-1} \end{bmatrix}, \\ H_k^a &= [H_k \quad \Theta_{c,k}], & V_k^a &= \Theta_{w,k} V_{w,k}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E[W_k^a (W_j^a)^T] = \text{diag}[Q_k & R_{c,k-1}] \delta_{kj}, k \neq j, \\ E[W_k^a] = 0, \\ E[V_k^a (V_j^a)^T] = (\Theta_{w,k} R_{w,k} \Theta_{w,k}^T) \delta_{kj}, k \neq j, \\ E[V_k^a] = 0, \\ E[W_k^a (V_j^a)^T] = 0. \end{cases} \quad (9)$$

### Интегрированная инерциально-спутниковая система с окрашенным шумом

Для определения структуры и параметров моделей сигналов может быть использован метод вариаций Аллана [17–21], основу которого составляет анализ временных кластеров. В частности, вариации Аллана применяются с целью получения модели погрешностей определения местоположения и скорости в ГНСС [5, 22, 23]. Результаты исследований показывают [6, 8], что указанные погрешности могут быть представлены суммой белого шума и гауссовского марковского процесса первого порядка. При одновременном наличии белого и окрашенного шумов для оценки погрешностей измерений может быть использован метод РВС. Далее будет показано, как в таком случае могут быть получены уравнения рассматриваемой системы.

#### Уравнение состояния

Для простоты ограничимся рассмотрением погрешностей определения местоположения и скорости ГНСС. Соответствующие измерения можно представить в виде

$$\begin{cases} \tilde{r}_G = r_G + \delta r_G, \\ \tilde{v}_G = v_G + \delta v_G. \end{cases} \quad (10)$$

Окрашенный шум описывается марковским процессом первого порядка:

$$\begin{cases} \delta \dot{r}_G = -\frac{1}{\tau_r} \delta r_G + w_r, \\ \delta \dot{v}_G = -\frac{1}{\tau_v} \delta v_G + w_v, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\delta r_G$ ,  $\delta v_G$  – погрешности определения местоположения и скорости соответственно;  $\tau_r$ ,  $\tau_v$  – интервалы корреляции погрешностей,  $w_r$ ,  $w_v$  – порождающие белые шумы.

Матрицы перехода от  $(k-1)$ -го состояния дискретной системы к  $k$ -му для позиционных и скоростных измерений могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} \Phi_{k/k-1,r} = e^{-\Delta t/\tau_r} I_3, \\ \Phi_{k/k-1,v} = e^{-\Delta t/\tau_v} I_3, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\Delta t$  – интервал дискретизации,  $I_3$  – единичная матрица  $3 \times 3$ .

Матрицы интенсивностей  $Q_r, Q_v$ , порождающих шумов  $w_r, w_v$ , имеют вид:

$$\begin{cases} Q_r = \frac{2\sigma_r^2}{\tau_r} I_3, \\ Q_v = \frac{2\sigma_v^2}{\tau_v} I_3, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\sigma_r, \sigma_v$  – среднеквадратические значения окрашенных шумов.

Матрицы интенсивностей порождающих шумов модели ИНС (соответствующих смещениям нулей гироскопов и акселерометров и погрешностям масштабных коэффициентов) имеют вид:

$$\begin{cases} Q_{b_g} = \frac{2\sigma_{b_g}^2}{\tau_{bg}} I_3, Q_{b_a} = \frac{2\sigma_{b_a}^2}{\tau_{ba}} I_3, \\ Q_{s_g} = \frac{2\sigma_{s_g}^2}{\tau_{sg}} I_3, Q_{s_a} = \frac{2\sigma_{s_a}^2}{\tau_{sa}} I_3, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\sigma$  и  $\tau$  с соответствующими индексами представляют собой среднеквадратические значения и интервалы корреляции процессов первого порядка.

Таким образом, модель системы в части описания погрешностей ИНС может быть представлена в пространстве состояний следующим образом [1, 3]: первые три дифференциальных уравнения – это непосредственно уравнения погрешностей ИНС, следующие два уравнения описывают процессы первого порядка, соответствующие шумам гироскопа и акселерометра, последнее уравнение представляет собой модель окрашенного шума измерений ГНСС.

$$\begin{cases} \delta \dot{f}^b = \delta b_a + \tilde{f}^b I_3 \delta s_a + w_a, \\ \delta \dot{\omega}_{ib}^b = \delta b_g + \tilde{\omega}_{ib}^b I_3 \delta s_g + w_g, \\ \delta \dot{r}^c = -\omega_{ec}^c \times \delta r^c + \delta v^c, \\ \delta \dot{v}^c = f^c \times \psi - (2\omega_{ie}^c + \omega_{en}^c) \times \delta v^c + \delta g^c + C_b^p \delta f^b, \\ \dot{\psi} = -(\omega_{ie}^c + \omega_{en}^c) \times \psi - C_b^p \delta \omega_{ib}^b, \\ \delta \dot{b}_g = -\frac{1}{\tau_{bg}} \delta b_g + w_{bg}, \delta \dot{b}_a = -\frac{1}{\tau_{ba}} \delta b_a + w_{ba}, \\ \delta \dot{s}_g = -\frac{1}{\tau_{sg}} \delta s_g + w_{sg}, \delta \dot{s}_a = -\frac{1}{\tau_{sa}} \delta s_a + w_{sa}, \\ \delta \dot{r}_G = -\frac{1}{\tau_r} \delta r_G + w_r, \delta \dot{v}_G = -\frac{1}{\tau_v} \delta v_G + w_v, \end{cases} \quad (15)$$

Здесь индексы  $i, e, b, n, c, p$  указывают на инерциальную, горизонтную, связанную с объектом, навигационную систему координат, аналитический и приборный трехгранники соответственно;  $\delta f^b$  – вектор погрешностей определения кажущегося ускорения в связанной системе координат;  $\delta \omega_{ib}^b$  – вектор погрешностей определения угловой скорости в связанной системе координат;  $\tilde{f}^b$  и  $\tilde{\omega}_{ib}^b$  – измеренные значения кажущегося ускорения и угловой скорости в связанной системе координат;  $\delta b_a, \delta s_g, \delta s_a$  – смещения нулей гироскопа и акселерометра и погрешности масштаб-

ных коэффициентов соответственно;  $w_a, w_g$  – белые шумы измерений акселерометра и гироскопа с интенсивностями  $\sigma_a^2$  и  $\sigma_g^2$  соответственно;  $\delta r^c, \delta v^c, \psi$  – погрешности определения местоположения, скорости и углов ориентации в осях аналитического трехгранника соответственно;  $f^c$  – кажущееся ускорение в осях аналитического трехгранника;  $\omega_{ie}^c$  – вектор угловой скорости вращения горизонтного трехгранника;  $\omega_{en}^c$  – вектор угловой скорости вращения навигационного трехгранника;  $\delta g^c$  – погрешность компенсации ускорения силы тяжести;  $C_b^p$  – матрица направляющих косинусов, соответствующих повороту приборного трехгранника относительно связанной с объектом системы координат;  $\delta r_G, \delta v_G$  – окрашенные шумы позиционных и скоростных измерений ГНСС соответственно;  $\tau$  с соответствующими индексами – интервалы корреляции погрешностей;  $w$  с соответствующими индексами – порождающие шумы процессов первого порядка.

### Уравнение измерений

Поскольку окрашенный шум измерений вводится в вектор состояния, в векторе погрешностей измерений сохраняется только белая составляющая. При этом размерность вектора состояния  $X_k$  увеличивается до 27, а сам вектор  $X_k$  имеет следующую структуру:

$$X_k = [\delta r_k^c \quad \delta v_k^c \quad \psi_k \quad \delta b_{g,k} \quad \delta b_{a,k} \quad \delta s_{g,k} \quad \delta s_{a,k} \quad \delta r_{G,k} \quad \delta v_{G,k}]^T, \quad (16)$$

где обозначения параметров соответствуют (15).

Уравнение разностных измерений имеет вид:

$$Z_k = \begin{bmatrix} Z_r \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{r}_n - \tilde{r}_n \\ \hat{v}_n - \tilde{v}_n \end{bmatrix} = H_k X_k + V_k, \quad (17)$$

где  $Z_k$  – вектор измерений;  $\hat{r}_n, \hat{v}_n$  – векторы координат и скорости, полученные по данным ИНС;  $\tilde{r}_n, \tilde{v}_n$  – векторы координат и скорости по данным ГНСС;  $H_k$  – матрица измерений;  $V_k$  – погрешность измерения, представляемая дискретным белым шумом. Матрица  $H_k$  имеет следующую структуру:

$$H_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & H_{1,3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & H_{2,3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & H_{3,3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & H_{4,3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -I_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$H_{1,3 \times 3} = C_b^n(l_b \times), \quad H_{2,3 \times 3} = -[(\omega_m^n \times)(C_b^n l_b \times) + C_b^n(l_b \times \omega_{ib}^b) \times],$$

$$H_{3,3 \times 3} = -C_b^n(l_b \times), \quad H_{4,3 \times 3} = C_b^n(l_b \times)(\omega_{ib}^b I_{3 \times 3}),$$

где  $C_b^n$  – матрица направляющих косинусов при переходе от связанной системы координат к навигационной;  $l_b$  – радиус-вектор, соответствующий смещению фазового центра антенны ГНСС относительно инерциального измерительного модуля (ИИМ); знак  $\times$  обозначает получение антисимметричной матрицы вектора;  $\omega_m^n$  – вектор вращения навигационной системы координат;  $\omega_{ib}^b$  – вектор вращения системы координат, связанной с объектом.

### Анализ полученных результатов

В этом разделе рассмотрены результаты моделирования и натуральных исследований, проведенных с целью проверки эффективности предложенного алгоритма.

#### Результаты моделирования

*Заданные параметры и траектория.* При выполнении моделирования данные ИИМ и ГНСС генерировались с помощью программы, разработанной группой исследователей Уханьского университета; характеристики точности соответствовали высокотехнологичному тактическому ИИМ; параметры ИИМ представляют собой стандартные значения, полученные по результатам статистического анализа по ограниченной выборке (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

#### Характеристики ИИМ

		Характеристика	Типовое значение
ИИМ (тактического типа, 1σ)	Гироскоп	$\sigma_{b_g}$ для $\delta b_g$ (смещение нуля) $E(\delta b_g \delta b_g^T) = \sigma_{b_g}^2 \cdot I_3$ – процесс первого порядка	0,1°/ч
		$\tau_{bg}$ (интервал корреляции)	4 ч
		$\sigma_{s_g}$ для $\delta s_g$ (масштабный коэффициент) $E(\delta s_g \delta s_g^T) = \sigma_{s_g}^2 \cdot I_3$ – процесс первого порядка	$200 \cdot 10^{-6}$
		$\tau_{sg}$ (интервал корреляции)	4 ч
		$\sigma_a$ (белый шум)	$0.03^\circ/\sqrt{ч}$
	Акселерометр	$\sigma_{b_a}$ для $\delta b_a$ (смещение нуля) $E(\delta b_a \delta b_a^T) = \sigma_{b_a}^2 \cdot I_3$ – процесс первого порядка	25 мГал
		$\tau_{ba}$ (интервал корреляции)	4 ч
		$\sigma_{s_a}$ для $\delta s_a$ (масштабный коэффициент) $E(\delta s_a \delta s_a^T) = \sigma_{s_a}^2 \cdot I_3$ – процесс первого порядка	$200 \cdot 10^{-6}$
		$\tau_{sa}$ (интервал корреляции)	4 ч
		$\sigma_v$ (белый шум)	$0,05 \text{ м/с}/\sqrt{ч}$

Для повышения достоверности результатов моделирования при формировании данных ГНСС задавались характеристики шумов первичных измерений [5], обрабатываемых соответствующим алгоритмом фильтрации; характеристики точности указаны в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

#### Характеристики результатов позиционирования ГНСС

		Характеристика	Типовые значения
Результаты позиционирования ГНСС (точечное позиционирование, 1σ)	Местоположение	$\sigma_r$ для $\delta r_G$ $E(\delta r_G \delta r_G^T) = \sigma_r^2 I_3$ – процесс первого порядка	2 м
		$\tau_r$ (интервал корреляции)	200 с
		$\sigma_{r,w}$ (СКП дискретного белого шума измерения)	1 м
	Скорость	$\sigma_v$ для $\delta v_G$ $E(\delta v_G \delta v_G^T) = \sigma_v^2 I_3$ – процесс первого порядка	0,1 м/с
		$\tau_v$ (интервал корреляции)	200 с
		$\sigma_{v,w}$ (СКП дискретного белого шума измерений)	0,05 м/с

Параметры шумов соответствуют автономной работе ГНСС и получены с помощью вариаций Аллана. Моделируемая траектория в модели имеет форму восьмерки, продолжительность одного цикла составляет около одного часа; каждый цикл содержит участки отсутствия движения, ускорения, замедления, постоянной скорости, повороты и другие особенности.

*Анализ согласованности.* При построении интегрированной системы использовались традиционная модель погрешностей и модель с РВС. Для получения фактической погрешности оценивания использовались опорные данные, полученные при идеальной работе системы. Сопоставление расчетных и фактических СКП оценок, полученных при использовании двух моделей, позволило произвести анализ согласованности данных. Полученные значения СКП представлены в табл. 3. На рис. 1 показаны полученные результаты оценки местоположения. Жирная линия соответствует фактической погрешности, тонкая – расчетной СКП полученной оценки.

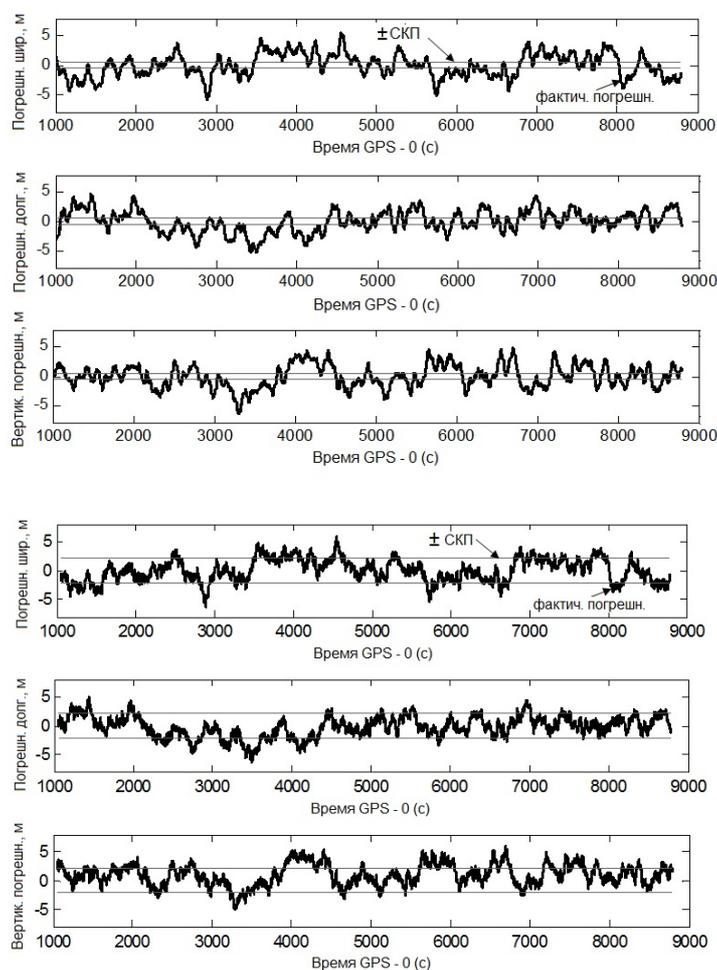


Рис. 1. Фактические погрешности в метрах (жирные линии) и расчетные СКП (сверху – для традиционной модели, снизу – для РВС)

## Статистика результатов моделирования

Направление	Местоположение (м)			Скорость (м/с)			Ориентация (град.)		
	Северное	Восточное	Вертикальное	Северное	Восточное	Вертикальное	Крен	Тангаж	Рыскание
Фактическая СКП при использовании традиционного метода	1,99	1,86	2,50	0,04	0,04	0,06	0,01	0,01	0,17
Расчетная СКП при использовании традиционного метода	<b>0,58</b>	<b>0,58</b>	<b>0,47</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,07</b>
Фактическая СКП при использовании метода РВС	1,96	1,83	2,18	0,04	0,04	0,07	0,01	0,01	0,11
Расчетная СКП при использовании метода РВС	<b>2,05</b>	<b>2,05</b>	<b>2,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,09</b>

Из рис. 1 и табл. 3 видно, что СКП оценки местоположения при использовании традиционной модели составляет 0,58 м, 0,58 м и 0,47 м в северном, восточном и вертикальном (вниз) направлениях, тогда как при РВС – 2,05 м, 2,05 м и 2,04 м соответственно. Статистика показывает, что при использовании традиционной модели согласованность характеристик точности составляет около 25,5%; таким образом, расчетные значения СКП не отражают характеристики фактической погрешности. Вместе с тем при РВС согласованность характеристик точности достигает 102,7%, то есть согласованность СКП при оценке местоположения существенно повышается. Соответствующие результаты для оценок скорости и параметров ориентации также улучшаются: согласованность СКП оценки скорости увеличивается с 46,4% до 62,7%, в то же время согласованность СКП оценки параметров ориентации повышается в основном для рыскания, что, вероятно, связано с тем, что точная модель улучшает наблюдаемость этого параметра.

По сравнению с алгоритмом, использующим белозумную модель погрешности измерений, фактическая СКП при использовании модели окрашенного шума уменьшается незначительно, приблизительно на 6,6%. Это объясняется тем, что предложенная модель точнее соответствует истинным характеристикам погрешностей. В то же время видно, что РВС имеет ограниченные возможности повышения точности оценивания, эффективность этого метода проявляется в основном в части повышения согласованности расчетной и фактической характеристик точности.

В дополнение к сказанному для демонстрации эффекта повышения согласованности в данной статье выполнен анализ погрешности оценки дрейфа гироскопа при отсутствии сигнала ГНСС. Моделировались пропадание сигнала ГНСС в течение 2 мин и восстановление работы в течение 4 мин. Полученные статистические данные по погрешностям приведены в табл. 4. На рис. 2 представлены результаты оценивания местоположения, полученные традиционным методом и методом РВС при пропадании сигнала ГНСС. Жирная линия соответствует фактической погрешности, тонкая – СКП полученной оценки.

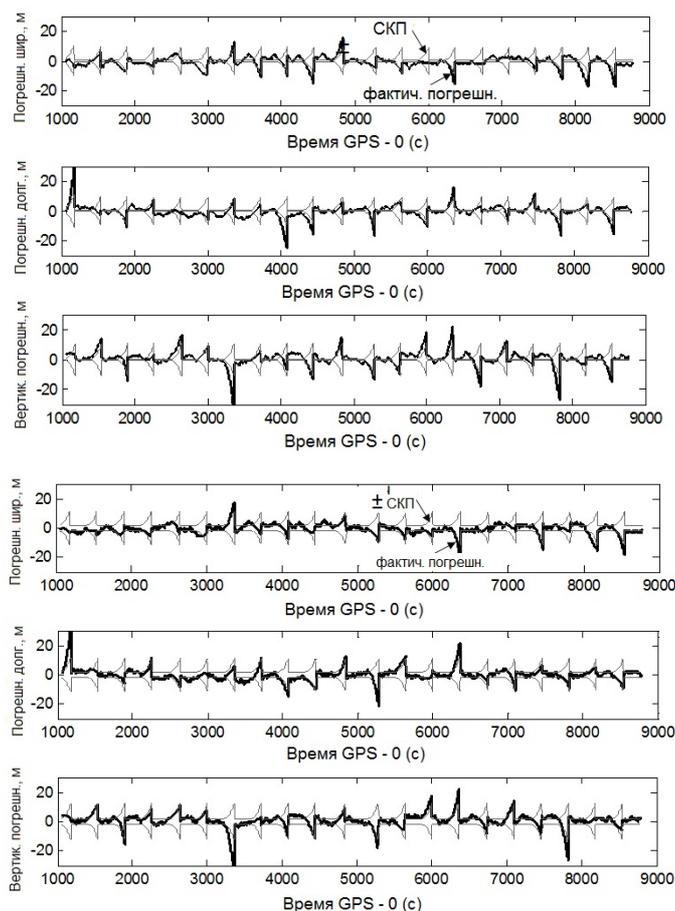


Рис. 2. Фактические погрешности в метрах и расчетные СКП (сверху – для традиционной модели, снизу – для РВС)

Т а б л и ц а 4

Статистика результатов моделирования при пропадании сигнала ГНСС

Направление	Местоположение (м)			Скорость (м/с)			Ориентация (град.)		
	Северное	Восточное	Вертикальное	Северное	Восточное	Вертикальное	Крен	Тангаж	Рыскание
Фактическая СКП при использовании традиционного метода	10,55	12,98	15,48	0,14	0,20	0,21	0,01	0,01	0,20
Расчетная СКП при использовании традиционного метода	<b>9,36</b>	<b>9,41</b>	<b>10,76</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,16</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,09</b>
Фактическая СКП при использовании метода РВС	9,58	12,55	14,44	0,15	0,19	0,20	0,01	0,01	0,11
Расчетная СКП при использовании метода РВС	<b>11,10</b>	<b>11,13</b>	<b>12,11</b>	<b>0,15</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,11</b>

Из рис. 2 и табл. 4 видно, что при использовании традиционной модели согласованность характеристик точности при пропадании сигнала ГНСС составляет около 75,0%; это говорит о том, что традиционная модель в данном случае также может считаться приемлемой, возможно благодаря тому, что обрабатываемые данные содержат практически чистый шум и не искажены за счет влияния внешних факторов. При использовании метода РВС согласованность достигает 92,8%, при этом улучшаются результаты для оценки скорости и ориентации: согласованность характеристик точности скорости возрастает с 78,6% до 87,3%, результаты оценивания параметров ориентации улучшаются главным образом для рыскания по указанной выше причине. По сравнению со статистикой, полученной при штатной работе интегрированной системы, согласованность характеристик точности при пропадании сигнала ГНСС снизилась, что может быть связано со случайным характером погрешности дрейфа, используемым при моделировании.

СКП оценки при использовании предложенной модели уменьшилась приблизительно на 6,1%. Как и в первом случае, эффективность метода проявляется в основном в улучшенной согласованности характеристик точности. Кроме того, из рис. 2 видно, что в ряде случаев пропадания сигнала погрешность дрейфа не соответствует расчетным значениям СКП, при этом на статистику оценки погрешностей в определенной степени оказывает влияние произвольность выбора гауссовского распределения.

#### *Результаты натурных испытаний*

*Тестовый сценарий и описание данных.* Данные используемых ИИМ и ГНСС соответствуют характеристикам интегрированной навигационной системы на волоконно-оптическом гироскопе (ВОГ); рабочие характеристики ИИМ представлены в табл. 1. Использовались данные ГНСС, полученные при работе в дифференциальном режиме по фазовым измерениям (режим RTK) и при обработке ФК одномоментных измерений (ОМИ). В качестве эталонных значений для анализа работы интегрированной системы по ОМИ использовались результаты работы алгоритма сглаживания данных RTK в обратном времени. Испытательная площадка была расположена в районе Цзянся, г. Ухань. Траектория задана в форме восьмерки, испытания проводились на открытой местности, продолжительность испытаний – около 6200 с. Сценарий движения содержал статические участки и множество типовых динамических участков с ускорением, замедлением, постоянной скоростью и поворотами. Параметры окрашенного шума при натурных испытаниях ГНСС были получены путем анализа данных, полученных в статике с помощью вариаций Аллана; фактические параметры могут быть взяты из работы [5]. При анализе полевых испытаний параметры шума вводились в РВС.

*Анализ согласованности.* При построении интегрированной системы использовались традиционная модель погрешностей и модель с РВС. Статистика результатов представлена в табл. 5.

На рис. 3 показаны результаты оценки местоположения при использовании двух моделей погрешностей. Жирная линия соответствует фактической погрешности, тонкая – СКП полученной оценки.

Как видно из рис. 3 и табл. 5, при использовании традиционной модели расчетная СКП оценки местоположения составляет 0,66 м, 0,57 м и 1,15 м в северном, восточном и вертикальном направлениях соответственно, а при использовании метода РВС – 0,79 м, 0,61 м и 2,41 м.

Статистика полученных оценок (СКП)

Направление	Местоположение (м)			Скорость (м/с)			Ориентация (град.)		
	Северное	Восточное	Вертикальное	Северное	Восточное	Вертикальное	Крен	Тангаж	Рыскание
Фактическая СКП при использовании традиционного метода	1,45	1,21	3,20	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01	0,13
Расчетная СКП при использовании традиционного метода	<b>0,66</b>	<b>0,57</b>	<b>1,15</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>
Фактическая СКП при использовании метода РВС	1,33	1,11	3,18	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,07
Расчетная СКП при использовании метода РВС	<b>0,79</b>	<b>0,61</b>	<b>2,41</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>

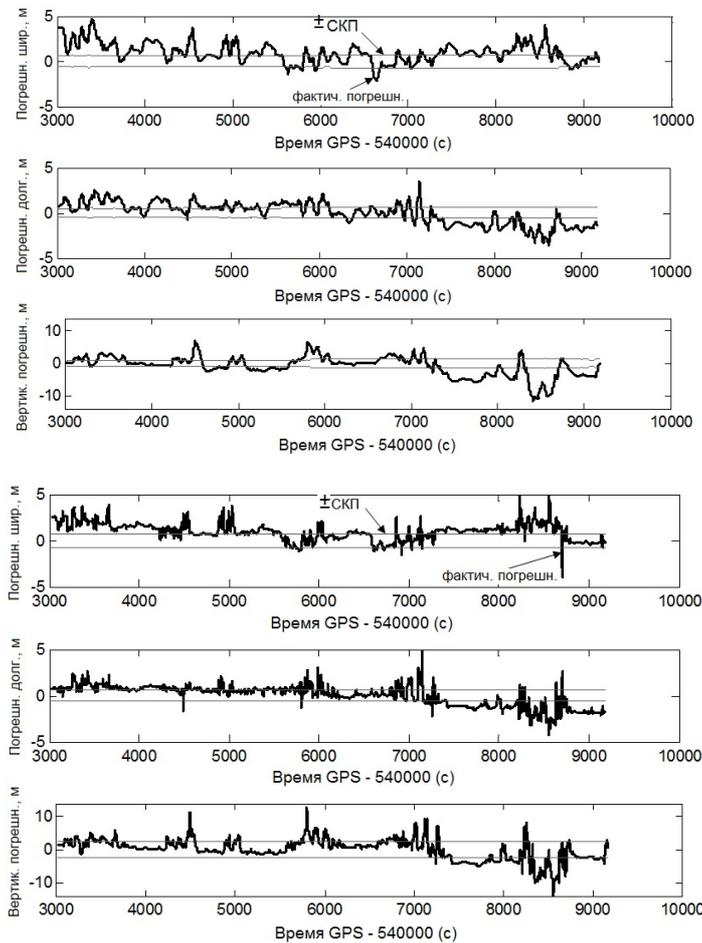


Рис. 3. Фактические погрешности и расчетные СКП (сверху – для традиционной модели, снизу – при РВС)

Статистика показывает, что для традиционного метода согласованность СКП оценки местоположения и фактической СКП составляет около 38,9%; очевидно, что расчетная СКП не может отражать фактическую погрешность, так как полученные значения чересчур оптимистичны. В то же время при применении метода РВС согласованность достигает 70,3%, то есть согласованность расчетной СКП оценки местоположения и фактической СКП существенно улучшается, хотя и не достигает значений, полученных при моделировании. Это может быть связано со сложными условиями при проведении измерений, наличием неучтенных помех, вызванных, в частности, эффектом многолучевости, а также с тем, что данные натурных испытаний могут иметь параметры шума, отличающиеся от использованных при моделировании. Оценки скорости и параметров ориентации также улучшились: согласованность оценки скорости возросла с 62,3% до 70,2%, а согласованность оценки параметров ориентации улучшилась в основном в отношении рыскания, вероятно благодаря тому, что точная модель улучшает наблюдаемость данного параметра.

СКП оценки при использовании модели окрашенного шума уменьшилась по сравнению с алгоритмом на основе модели белого шума приблизительно на 2,7%. Это может быть обусловлено тем, что предложенная модель точнее соответствует истинным характеристикам погрешностей. Таким образом, метод РВС имеет ограниченные возможности повышения точности оценивания, эффективность этого метода проявляется в основном в части повышения согласованности расчетной и фактической характеристик точности.

Помимо всего прочего, был выполнен анализ погрешности оценки дрейфа гироскопа при отсутствии сигнала ГНСС. Погрешность дрейфа и СКП оценки в отсутствие сигнала ГНСС проанализированы статистически. Результаты приведены в табл. 6. На рис. 4 представлены оценки определения местоположения, полученные традиционным методом и методом РВС при моделировании пропадания сигнала ГНСС. Жирной линией обозначена фактическая погрешность местоположения, тонкой – СКП полученной оценки.

Из рис. 4 и табл. 6 видно, что в результатах, полученных при моделировании двухминутного пропадания сигнала ГНСС традиционным методом, согласованность погрешности дрейфа и СКП оценки составляет 49,2%, методом РВС – 75,4%. В данных, полученных при натурных испытаниях, улучшение выражено не так ярко, как при моделировании, вследствие отличия реальных условий от параметров моделируемого шума. Оценки скорости и параметров ориентации также улучшились: согласованность оценки скорости выросла с 47,2% до 66,5%, а полученная оценка параметров ориентации улучшилась, как и в предыдущем случае, в отношении рыскания.

Улучшенная модель обеспечивает более эффективную оценку, чем традиционная. Погрешность оценки дрейфа при использовании модели окрашенного шума несколько меньше по сравнению с традиционной моделью белого шума. В отличие от результатов моделирования данные натурных испытаний имеют более низкую согласованность при использовании традиционной модели, а погрешность дрейфа в данных натурных испытаний имеет более сложную стохастическую модель, чем в данных моделирования. Это связано со сложными условиями проведения измерений и большим уровнем помех, чем при моделировании. Шум в моделированных данных является относительно однородным. Усовершенствованная модель позволяет более эффективно отфильтровывать шумы измерений.

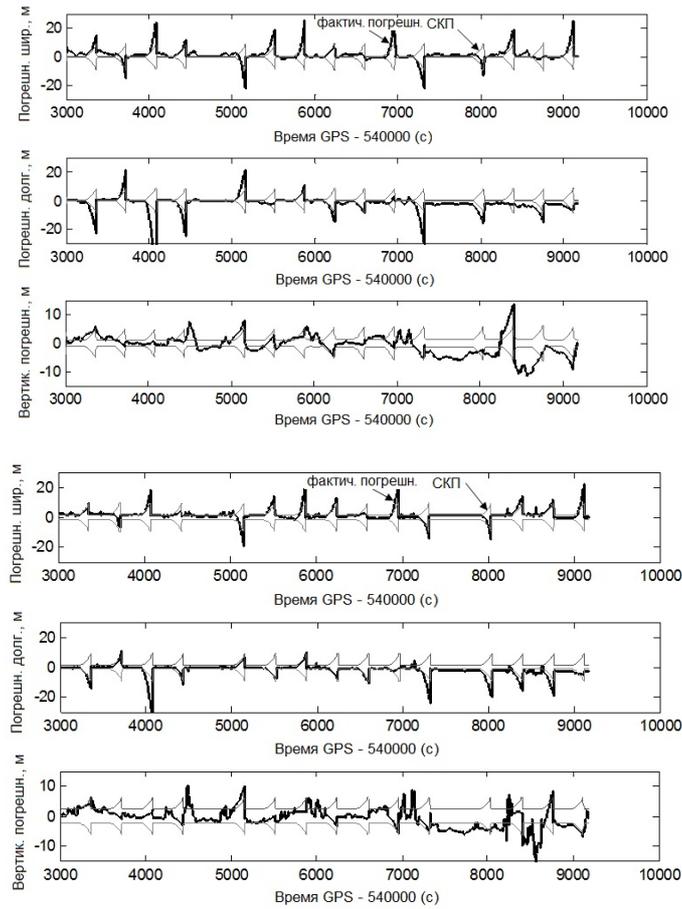


Рис. 4. Фактические погрешности и расчетные СКП в отсутствие сигнала ГНСС (сверху – для традиционной модели, снизу – при РВС)

Таблица 6

Статистика оценок, полученных при моделировании пропадания сигнала ГНСС (СКП)

Направление	Местоположение (м)			Скорость (м/с)			Ориентация (град.)		
	Северное	Восточное	Вертикальное	Северное	Восточное	Вертикальное	Крен	Тангаж	Рыскание
Фактическая СКП при использовании традиционного метода	4,66	5,95	3,54	0,11	0,11	0,03	0,01	0,01	0,12
Расчетная СКП при использовании традиционного метода	<b>2,60</b>	<b>2,42</b>	<b>2,06</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,07</b>
Фактическая СКП при использовании метода РВС	3,94	4,62	3,30	0,09	0,08	0,03	0,01	0,01	0,13
Расчетная СКП при использовании метода РВС	<b>3,04</b>	<b>3,02</b>	<b>2,97</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,07</b>

Согласованность между СКП оценки и фактической погрешностью при использовании модели с РВС улучшается благодаря тому, что эта модель позволяет формировать более адекватные данные прогноза, что благоприятно сказывается на повышении точности фильтрации Калмана и, в конечном счете, положительно влияет на эффективность работы интегрированной навигационной системы. Кроме того, благодаря этому навигационная информация имеет более достоверную дисперсию оценки.

### *Проверка робастности*

Невязки, рассчитываемые в ФК, отражают согласованность измерений и оценок. Их анализ позволяет оперативно обнаруживать аномалии в измерениях, поэтому он очень эффективен при выявлении кратковременных выбросов, что является распространенной проблемой при использовании ФК [1, 2]. Выражение для невязки измерений выглядит следующим образом:

$$\delta Z_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1} . \quad (19)$$

Матрица ковариаций невязок содержит ковариацию шума измерений и ковариацию экстраполированной оценки вектора состояния:

$$U_k = H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k . \quad (20)$$

В слабосвязанном алгоритме робастная модель соответствует выполнению условия

$$|\delta Z_k| \leq r \sqrt{U_k} . \quad (21)$$

Уровень достоверности  $r$  выбирается равным 2 и 3, что соответствует доверительной вероятности 95% и 99,73% соответственно.

Упрощение модели погрешностей измерений ГНСС приведет к уменьшению согласованности характеристик точности. Полученные оценки будут чересчур оптимистичными. При этом расчетная ковариация шума измерений, а вслед за ним и расчетная ковариация невязки оказываются завышенными, так что невязка не соответствует расчетной ковариации. Грубые промахи при определении местоположения ГНСС вызовут скачкообразные изменения невязки, однако превышения порогового значения, предназначенного для обнаружения грубых промахов, может и не быть – в этом случае алгоритм оценивания оказывается неэффективным с точки зрения его робастных свойств.

При формировании оценок с использованием уточненной модели расчетная оценка точности хорошо согласуется с действительной характеристикой точности. Вычисленные дисперсии погрешностей экстраполяции близки к фактическим значениям. Шум измерений соответствует белому шуму составляющей погрешности ГНСС, невязка имеет приемлемый уровень. Когда измерения ГНСС содержат грубые промахи, аномальные изменения невязки будут выявлены пороговым детектором, что свидетельствует об эффективности алгоритма с точки зрения робастных свойств.

В описанном далее модельном эксперименте подтверждается робастность алгоритма на основе предложенной модели. Случайные погрешности добавля-

лись к моделируемым данным ГНСС, содержащим белый и окрашенный шумы, единичные и серийные грубые промахи. Пороги при обнаружении грубых промахов устанавливались разными  $\pm 5\sigma$ . Сравнивая эффективность обнаружения грубых промахов с помощью алгоритмов, настраиваемых на традиционную и предложенную модели, можно отметить (рис. 5), что традиционный алгоритм не справляется с выявлением грубых промахов – невязка в большинстве случаев не выходит за пороговые значения. Результаты моделирования зависят от величины грубого промаха, в то же время предложенный алгоритм точнее выявляет грубые промахи в позиционных измерениях. После устранения грубого промаха результат оценивания становится корректным.

Таким образом, создание адекватной модели погрешностей может способствовать повышению согласованности характеристик точности, при этом расчетная оценка точности будет точнее отражать уровень фактической погрешности, повысится эффективность обнаружения грубых промахов. Как видно из рис. 5, на интервале от 3000 до 7000 с в случае использования традиционной модели обнаруживаются лишь отдельные грубые промахи, а в случае использования предложенной модели выявляются их серии. Рис. 5 позволяет сопоставить в целом эффективность использования двух моделей.

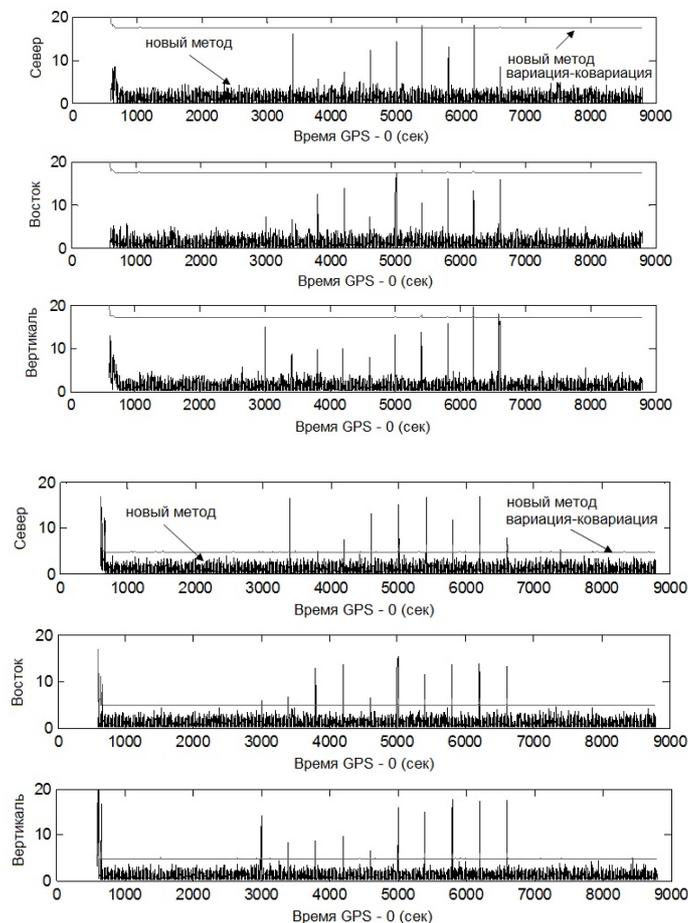


Рис. 5. Эффективность обнаружения грубых промахов (сверху – для традиционной модели, снизу – при РВС, где жирная линия – невязка, тонкая – пороговое значение для выявления грубых промахов)

## Выводы

В статье предложено использовать метод расширения вектора состояния при построении моделей погрешностей позиционных и скоростных измерений ГНСС и решении задачи комплексирования данных ГНСС и ИНС с учетом окрашенных шумов. Показано, что использование предложенной модели способствует повышению согласованности характеристик точности. При этом предложенная модель сопоставлялась с традиционной моделью путем проведения моделирования и натурных испытаний.

По результатам моделирования получено улучшение согласованности характеристик точности оценки местоположения с 25,5% до 102,7%. Согласованность характеристик в части оценок скорости и параметров ориентации также улучшается, причем улучшение по ориентации проявляется главным образом в отношении рыскания, что связано, вероятно, с повышением наблюдаемости рыскания при использовании уточненной модели. В случае пропадания сигнала ГНСС эффект повышения согласованности оказался не столь велик – согласованность характеристик точности оценки местоположения улучшилась с 75,0% до 92,8%; это говорит о том, что традиционная модель также позволяет получать согласованные характеристики точности. Данное обстоятельство может быть обусловлено тем, что моделируемые измерения содержат чистый шум – при их формировании не учитывается воздействие внешних факторов.

По сравнению со статистикой обработки полной навигационной информации эффект улучшения согласованности при наличии перерывов в сигнале ГНСС снижается главным образом из-за того, что распределение погрешности лишь приближенно является гауссовским. Результаты натурных испытаний демонстрируют заметное улучшение согласованности характеристик точности в отношении позиционных измерений – с 38,9% до 70,3%, что согласуется с результатами моделирования. Согласованность характеристик в части оценок скорости и параметров ориентации также улучшается, причем по ориентации это улучшение проявляется главным образом в отношении рыскания, однако оно не столь существенно, как при пропадании сигнала ГНСС. Согласованность в части позиционных измерений при пропадании сигнала возрастает с 49,2% до 75,4% потому, что реальный шум измерений не вполне соответствует используемой модели и зависит от окружающей обстановки. Результаты обработки данных, содержащих грубые промахи, подчеркивают достоинства предложенного алгоритма, демонстрирующего эффективный контроль качества измерений.

Полученные результаты показывают, что при использовании адекватной стохастической модели появляется возможность оценить окрашенный шум в измерениях ГНСС, улучшить согласованность расчетных и фактических среднеквадратических значений погрешностей оценивания в слабосвязанной системе, повысить надежность выявления грубых промахов при контроле качества измерений. Благодаря использованию такой модели СКП оценки будет отражать уровень фактической погрешности.

На следующем этапе исследований усовершенствованная модель будет опробована в реальных технических устройствах. Кроме того, в ходе дальнейших исследований предполагается разработать модели погрешностей ГНСС для различных режимов определения местоположения, в частности для дифференциального режима и прецизионного позиционирования (PPP). И наконец, будет

предпринята попытка применить усовершенствованную модель в сильносвязанных интегрированных инерциально-спутниковых системах.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность группе исследований ГНСС/ИНС Уханьского университета за предоставленные наборы данных для моделирования и натурных испытаний. Работа выполнена при частичной поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 41604020), общего финансового гранта Фонда поддержки докторантуры Китая (China Postdoctoral Science Foundation) (грант № 2015M582275), специального финансового гранта Фонда поддержки докторантуры Китая (грант № 2016T90729) и Национальной программы исследований и развития высоких технологий Китая (2015AA124002).

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. **Groves, P.D.**, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Boston, London: Artech House, 2008.
2. **Maybeck, P.S.**, Stochastic Models, Estimation and Control, London: Academic Press, 1979.
3. **Shin, E.-H.**, Estimation techniques for low-cost inertial navigation. PhD Dissertation, Calgary, Alberta: University of Calgary, 2005.
4. **Stepanov, O.A.** Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems. In: Nebylov, A., Watson, J., eds., Aerospace Navigation Systems, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2016, p. 244–298.
5. **Niu, X., Chen, Q., Zhang, Q., Zhang, H., Niu, J., Chen, K., Shi, C. and Liu, J.**, Using Allan variance to analyze the error characteristics of GNSS positioning, GPS Solutions, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 231–242.
6. **El-Rabbany, A., and Kleusberg, A.**, The effect of temporal physical correlation on accuracy estimation in GPS relative positioning, Journal of Surveying Engineering, 2003, vol. 129(1), pp. 28–32.
7. **Odolinski, R.**, Temporal correlation for network RTK positioning, GPS Solutions, 2012, vol. 16, no. 2, pp.147–155.
8. **Miller, C., O’Keefe, K., and Gao, Y.**, Time correlation in GNSS positioning over short baselines, Journal of Surveying Engineering, 2011, vol. 138, no. 1, pp. 17–24.
9. **Han, S., and Wang, J.**, Quantization and colored noises error modeling for inertial sensors for GPS/INS integration. Sensors, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 1493–1503.
10. **Chang, G.**, On Kalman filter for linear system with colored measurement noise, Journal of Geodesy, 2014, vol. 88, no. 12, pp.1163–1170.
11. **Bryson, A., and Johansen, D.**, Linear filtering for time-varying systems using measurements containing colored noise, Transactions on Automatic Control, 1965, vol. 10, pp. 4–10.
12. **Wang, X., Liang, Y., Pan, Q., Zhao, C., and Li, H.**, Unscented Kalman filter for nonlinear systems with colored measurement noise, Acta Automatica Sinica, 2012, vol. 38, pp. 986–998.
13. **Bryson, A., and Henrikson, L.**, Estimation using sampled data containing sequentially correlated noise. Journal of Spacecraft and Rockets, 1968, vol. 5, no. 6, pp. 662–665.
14. **Petovello, M.G., O’Keefe, K., Lachapelle, G., and Cannon, M.E.**, Consideration of time correlated errors in a Kalman filter applicable to GNSS, Journal of Geodesy, 2009, vol. 83, no. 1, pp. 51–56.
15. **Yan, G.**, Strapdown Inertial Navigation Algorithm and Principle of Integrated Navigation, 2016.
16. **Bar-Shalom, Y., Li, X.R., and Kirubarajan, T.**, Estimation with Applications to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons, 2001.
17. **El-Sheimy, N., Hou, H., and Niu, X.**, Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, vol. 57, no. 1, pp.140–149.
18. **Motorin, A.V., and Stepanov, O.A.**, Problem-oriented approach to identification of sensor error models and its application to navigation data processing, IFAC Proceedings (IFAC-PapersOnLine), 2017, vol. 50, no. 1, pp. 2830–2835.
19. **Allan, D. W.**, Time and frequency (time domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1987, vol. 34, no. 6, pp. 647–654.

20. **Zhang, Q., Niu, X., Chen, Q., Zhang, H., and Shi, C.**, Using Allan variance to evaluate the relative accuracy on different time scales of GNSS/INS systems, *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 8.
21. **Land, D.V., Levick, A.P., and Hand, J.W.**, The use of the Allan deviation for the measurement of the noise and drift performance of microwave radiometers, *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, pp.1917–1928.
22. **Kang, R., and Lin, P.**, Applying Allan Variance to Construct GPS Error Model for Integrated Navigation, 2017.
23. **Zhang, X., Zhu, F., Xue, X., and Tang, L.**, Using Allan Variance to Analyze the Zero-differenced Stochastic Model Characteristics of GPS, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, vol. 44, no. 2, pp.119–127.

---

**Niu X., Zhang Q.** (GNSS Research Center, Wuhan University, Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, China), **Wu J.** (Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, China)

Research on Measurement Error Model of GNSS/INS Integration based on Consistency Analysis, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 3 (103), pp. 003-022

**Abstract.** Kalman filter is widely taken as an optimal fusion algorithm in GNSS/INS integration, and GNSS positioning error is often simply modeled as white noise in a loosely-coupled system. But many research results have shown that GNSS positioning error has the characteristic of temporal correlation. Correct error model of Kalman filter can ensure that the level of estimated accuracy is equal to that of actual accuracy. Inaccurate model will influence the consistency between estimated accuracy and actual integrated accuracy. Moreover, quality control method based on variance-covariance with inconsistency is not reliable and not utilized to detect gross errors. So, this paper mainly researches on GNSS positioning and velocity error model and its impact on quality control in GNSS/INS integration. In this paper, state-augmentation method is applied to solve the problems of GNSS colored noise to ensure the navigation accuracy consistency, and the rationality of the improved model is verified by the effect of quality control. Simulation and field test results show that state-augmentation method can improve the consistency between actual error and estimation standard deviation, and satisfy the requirement of quality control based on variance-covariance to improve the integration reliability.

**Keywords:** GNSS positioning error, error modeling, state augmentation, consistency analysis, quality control

Материал поступил 09.04.2018