

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ФАЗОВОГО ЦЕНТРА АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА

А. В. Чернодаров<sup>1</sup>, А. П. Патрикеев<sup>2</sup>

ООО «Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», 125167, Москва, Россия,  
4-я улица 8 Марта, 6А, Тел: +7 495 2553635, Факс: +7 499 558049, e-mail: chernod@mail.ru

В. Н. Коврегин<sup>3</sup>, Г. М. Коврегина<sup>4</sup>

АО «Заслон», 196084, С.-Петербург, Россия, ул. Коли Томчака, 9  
Тел: +7 812 3279099, e-mail: g\_kovregina@mail.ru

### Аннотация

**Ключевые слова:** радиолокационная система, синтезирование апертуры, траекторные неустойчивости, микронавигация

*Рассматривается технология оценки и компенсации траекторных неустойчивостей радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) с помощью распределенной системы микронавигации (РСМН). Реализация такой технологии опирается на взаимную поддержку инерциальной, спутниковой и радиолокационной систем. Для повышения точности оценивания ошибок РСМН предлагается использовать комбинированные процедуры фильтрации сглаживания наблюдений и на интервале синтезирования апертуры. Приводятся результаты летной отработки РСМН, подтверждающие возможность и целесообразность применения предлагаемой технологии для повышения разрешающей способности РСА.*

### Анализ инерциально-спутниковой навигационной системы радиолокатора как объекта летной отработки

В настоящее время актуальной остается задача [1] повышения разрешающей способности радиолокационных систем (РЛС) при обзоре больших участков земной поверхности с борта летательного аппарата (ЛА). Известно [1], что угловое  $\delta\Theta$  и линейное  $\delta l$  разрешение на дальности до объекта  $D$  определяются соотношениями  $\delta\Theta = \lambda / d$ ;  $\delta l = D\delta\Theta = \lambda D / d$ , где  $\lambda$  - длина волны электромагнитного излучения РЛС;  $d$  - размер антенны.

Решение данной задачи путем аппаратного увеличения размера антенны не всегда представляется возможным из-за ограничений на массу и габариты бортового оборудования ЛА. Поэтому реализуют аналитическое расширение диаграммы направленности путем «склейки» изображений, получаемых бортовой РЛС на траектории движения ЛА. При таком синтезе апертуры РЛС возникает необходимость компенсации искажений комбинированного изображения из-за траекторных неустойчивостей, связанных с отклонением ЛА от прямолинейного движения. Схема движения фазового центра антенны (ФЦА) РЛС показана на рис. 1, где  $oxyz$  - связанная с ЛА система координат;  $o\xi\eta\zeta$  - опорный сопровождающий трехгранник [2]; ДН - диаграмма направленности;  $D$  - расстояние от ФЦА до земной поверхности. Положение зоны обзора РЛС определяется азимутом  $\alpha$  и углом места  $\beta$  диаграммы направленности, а удаление задержкой сигнала  $\tau = 2D / c$ , где  $c$  - скорость распространения радиоволн. В работе рассматривается РЛС бокового обзора, в которой углы  $\alpha, \beta$  постоянны на интервале синтеза. При отклонении ЛА от опорной траектории возникает необходимость определения приращений дальности  $\Delta D$  относительно ее базового значения  $D_0$ .

Траекторные неустойчивости на интервале обзора могут быть определены с помощью бесплатформенной инерциально-спутниковой системы микронавигации, размещенной вблизи фазового центра антенны. Для компенсации указанных неустойчивостей их оценки преобразуются в поправки к сигналам РЛС.

Требования к точностным характеристикам системы микронавигации для РСА вытекают из взаимосвязи ошибок определения дальности  $D$  и разности фаз  $\Delta\phi$  излучаемого и принимаемого сигналов. Разность фаз определяется задержкой сигнала  $\tau$ , которая связана с измеренной дальностью следующим соотношением:

<sup>1</sup> Доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник.

<sup>2</sup> Кандидат технических наук, заместитель генерального директора.

<sup>3</sup> Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

<sup>4</sup> Кандидат технических наук, начальник лаборатории.



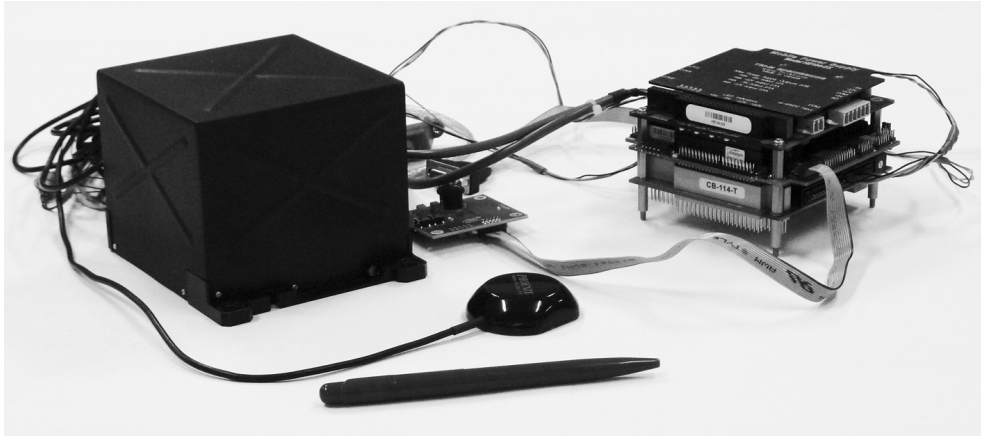


Рис. 2. Макетный образец распределенной системы микронавигации для ПСА



Рис. 3. Структурная схема программно-математического обеспечения РСМН

В целях повышения точности позиционирования ФЦА в работе [4] учтены реальные условия летной эксплуатации РСМН:

- РСМН начинает работу только в полете одновременно с включением ПСА. Для серийных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) такой режим работы является резервным или аварийным и предусматривает выставку и/или довыставку БИНС в полете;
- для применения математического аппарата калмановской фильтрации разработаны процедуры синхронизации инерциальных и спутниковых измерений при оценке ошибок РСМН:

$$Z_{V(i-k)} = C_{3(i-k)}^T [V_{\xi} V_{\eta} V_{\zeta}]_{(i-k)\text{БИНС}}^T - [V_E V_N V_H]_{(i-k)\text{СНС}}^T; \quad (2)$$

$$Z_{V(i-k)} = H_{(i-k)} x_{(i-k)} + \mathcal{G}_{(i-k)} = H_{(i-k)} \Phi_{(i-k)}^{-1} x_i + \mathcal{G}_{(i-k)}, \quad (3)$$

где  $C_3$  – матрица направляющих косинусов, характеризующих взаимную угловую ориентацию опорного

полусвободного  $o\xi\eta\zeta$  [2] и геодезического  $oENH$  трехгранников;  $\Phi_{i-k}^{-1} = \prod_{j=k}^0 \Phi_{i-j}^{-1}$  – обратная переходная

матрица для вектора ошибок БИНС;  $H_{(i-k)} = [H_{1(i-k)}^T H_{2(i-k)}^T H_{3(i-k)}^T]^T$  – матрица связи вектора наблюдений

$Z_{V(i-k)}$  с вектором ошибок БИНС;  $H_{j(i-k)}$  – вектор-строка коэффициентов связи  $j$ -го элемента

$Z_{j(i-k)}$  вектора наблюдений  $Z_{V(i-k)}$  с вектором ошибок  $x_{(i-k)}$ ;  $j = \overline{1,3}$ ;  $k = \text{var}$  – количество тактов

задержки (запаздывания) спутниковых сигналов относительно момента формирования наблюдений;  $\mathcal{G}_{(i-k)}$  – вектор случайных ошибок наблюдений.

По аналогичной методике формируются инерциально-спутниковые наблюдения геодезических координат и их модели. Следует отметить, что прямая и обратная переходные матрицы для вектора ошибок БИНС определяются путем численного решения дифференциальных уравнений:

$$\dot{\Phi}_i = A(t)\Phi(t, t_{i-1}); \quad \dot{\Phi}_i^{-1} = -\Phi^{-1}(t, t_{i-1})A(t),$$

где  $\Phi(t_{i-1}, t_{i-1}) = E$ ,  $E$  – единичная матрица.  $A(t)$  – матрица частных производных, получаемых путем варьирования уравнений БИНС.

Однако полученные в летном эксперименте [4] ошибки инерциального счисления полярной координаты ФЦА  $D$  доходили до 10 см на интервале синтезирования 5 с. На рис. 4 показана круговая ошибка счисления полярной координаты ФЦА  $\Delta D$  на интервале синтезирования апертуры, полученная с учетом временного рассогласования инерциальных и спутниковых измерений, где

$$\Delta D = \sqrt{\Delta S^2 + \delta_H^2}; \quad \Delta S = \sqrt{\delta_\phi^2 + \delta_\lambda^2}; \quad \delta_\phi = (\phi_{\text{БИНС}} - \phi_{\text{СНС}})R; \quad \delta_H = H_{\text{БИНС}} - H_{\text{СНС}};$$

$$\delta_\lambda = (\lambda_{\text{БИНС}} - \lambda_{\text{СНС}})R \cos \phi_{\text{СНС}}; \quad R = a(1 - 0.5e^2 \sin^2 \phi); \quad a = 6378245\text{м}; \quad e^2 = 0.0066934;$$

$\phi$ ;  $\lambda$ ;  $H$  – широта, долгота и высота ФЦА над земным эллипсоидом.

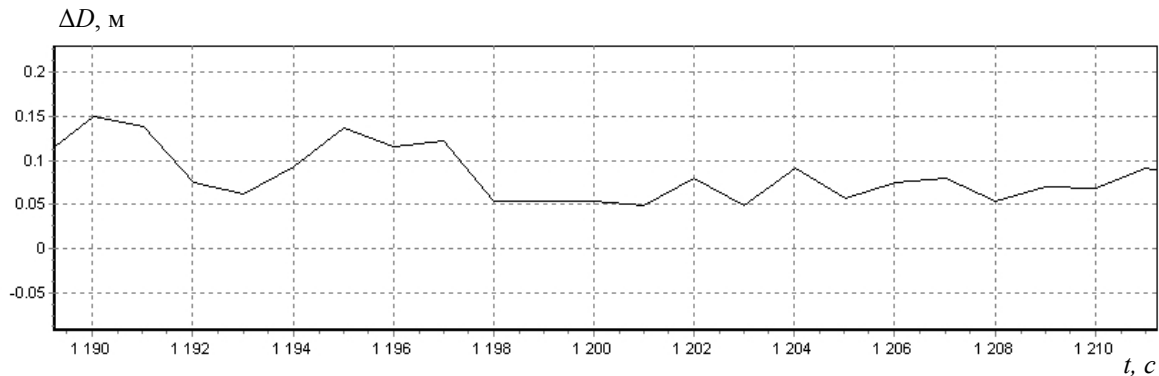


Рис. 4. Ошибка инерциального счисления полярной координаты ФЦА с учетом временного рассогласования инерциальных и спутниковых измерений

Проблема повышения разрешающей способности РСА потребовала разработки новых подходов к комплексированию модулей РСМН. Учитывая возможность ретроспективного формирования апертуры РСА, предлагается использовать комбинированные процедуры фильтрации наблюдений и сглаживания оценок на интервале синтезирования. Повышение точности оценивания в этом случае основано на использовании дополнительных наблюдений, получаемых в «обратном» времени.

Цель работы – исследовать возможности комбинированной обработки наблюдений в «прямом» и «обратном» времени для повышения точности оценивания траекторных нестабильностей РСА на интервале синтезирования апертуры.

Достижение поставленной в работе цели базируется на решении, в том числе, следующих задач:

- построение рекуррентных процедур оптимального сглаживания векторных параметров состояния;
- обеспечение реализуемости и вычислительной устойчивости алгоритмов оптимального сглаживания.

### Технология рекуррентного сглаживания оценок вектора ошибок системы микронавигации

Задача сглаживания предусматривает ретроспективное уточнение оценок вектора состояния (ВС), полученных на этапе фильтрации, в интересах повышения их достоверности. Однако в типовом RTS (Rauch-Tung-Striebel) алгоритме [5] сглаживаются прогнозные оценки  $\hat{x}_{i/i-1}$ , достоверность которых существенно ниже скорректированных оценок  $\hat{x}_{i/i}$ . Поэтому в работе [6] был разработан алгоритм сглаживания скорректированных оценок  $\hat{x}_{i/i}$ , имеющий вид

$$v_{i/N} = \Phi_{i+1}^{-1} \hat{x}_{i+1/N} - \hat{x}_{i/i}; \quad (4)$$

$$\tilde{P}_{i+1/N} = P_{i+1/N} + \Gamma_{i+1} Q_i \Gamma_{i+1}^T; \quad (5)$$

$$P_{i/N}^{-1} = \Phi_{i+1}^T \tilde{P}_{i+1/N}^{-1} \Phi_{i+1} + P_{i/i}^{-1}; \quad (6)$$

$$K_{i/N} = P_{i/N} P_{i/i}^{-1}; \quad (7)$$

$$\hat{x}_{i/N} = \Phi_{i+1}^{-1} \hat{x}_{i+1/N} - K_{i/N} v_{i/N}, \quad (8)$$

где  $\hat{x}_{i/i}, \hat{x}_{i/N}$  – оценки ВС  $x_i$  в  $i$ -й момент времени по  $i$  наблюдениям, полученные соответственно на этапах фильтрации и сглаживания;  $P_{i/i}; P_{i/N}$  – ковариационные матрицы указанных оценок;  $\Phi_i$  – переходная матрица для ВС;  $N$  – количество отсчетов на интервале сглаживания;  $Q_i, \Gamma_{i+1}$  – соответственно ковариационная и переходная матрицы для вектора возмущений в БЧЭ.

Матрица  $P_{i/i}^{-1}$  определяется из решения в «прямом» времени информационной модификации уравнения Риккати

$$P_{i/i}^{-1} = P_{i/i-1}^{-1} + H_i^T R_i^{-1} H_i; \quad (9)$$

$$P_{i/i-1}^{-1} = (\Phi_i^T P_{i-1/i-1}^{-1} \Phi_i + \Gamma_i Q_{i-1} \Gamma_i^T)^{-1}, \quad (10)$$

где  $R_i$  – ковариационная матрица ошибок наблюдений;  $H_i$  – матрица связи наблюдений с ВС  $\hat{x}_{i/i-1}$ .

Реализация алгоритма (4) – (10) связана с вычислительными трудностями, обусловленными необходимостью обращения ковариационных матриц  $P_{i/i-1}$  и  $P_{i/N}$ . Указанные трудности могут быть существенно снижены при  $U-D$  реализации алгоритмов сглаживания.

Модификация алгоритма сглаживания (4) – (10) предусматривает его представление в виде, допускающем замену обращений ковариационных матриц размерности  $n \times n$  последовательностями операций деления. Такая замена опирается на преобразование уравнений (6), (9), (10) по лемме об обращении матрицы [7]. Для уравнения (10) оно будет иметь вид

$$P_{i/i-1}^{-1} = \tilde{P}_{i/i-1}^{-1} - \tilde{P}_{i/i-1}^{-1} \Gamma_i (\Gamma_i^T \tilde{P}_{i/i-1}^{-1} \Gamma_i + Q_{i-1/i-1}^{-1})^{-1} \Gamma_i^T \tilde{P}_{i/i-1}^{-1} = (\tilde{P}_{i/i-1} + \sum_j \Gamma_j \Gamma_j^T / Q_{jj})^{-1}, \quad (11)$$

где  $\tilde{P}_{i/i-1}^{-1} = \Phi_i^{-T} P_{i-1/i-1}^{-1} \Phi_i^{-1}$ ;  $\Gamma_j$  –  $j$ -й столбец матрицы  $\Gamma_i$  размерности  $n \times r$ ;  $Q_{jj}$  –  $j$ -й элемент диагональной матрицы  $Q_i$  размерности  $r \times r$ ;  $\Phi_i^{-T} = (\Phi_i^{-1})^T$ .

Отсюда справедлива следующая процедура последовательной реализации уравнения (11):

$$M_0^{-1} = \Phi_i^{-T} P_{i-1/i-1}^{-1} \Phi_i^{-1}; \quad (12)$$

$$K_j = M_{j-1}^{-1} \Gamma_j / (\Gamma_j^T M_{j-1}^{-1} \Gamma_j + Q_{jj}^{-1}); \quad (13)$$

$$M_j^{-1} = M_{j-1}^{-1} - K_j \Gamma_j^T M_{j-1}^{-1}; \quad (14)$$

$$P_{i/i-1}^{-1} = M_r^{-1}; \quad j = \overline{1, r}. \quad (15)$$

Существенным недостатком такого представления уравнения (11) является наличие операции вычитания в соотношении (14), которая из-за вычислительных ошибок может привести к потере положительной определенности матрицы  $P_{i/i-1}^{-1}$ . Можно показать, что соотношению (14) эквивалентна следующая квадратичная форма, исключая данный недостаток:

$$M_j^{-1} = (K_j \Gamma_j^T - E) M_{j-1}^{-1} (K_j \Gamma_j^T - E)^T + K_j Q_{jj}^{-1} K_j^T, \quad (16)$$

где  $E$  – единичная матрица размерности  $n \times n$ .

В настоящее время при бортовой реализации обобщенного фильтра Калмана (ОФК) базовой является его  $U$ - $D$  модификация [8], обеспечивающая вычислительную устойчивость решения уравнения Риккати.  $U$ - $D$  технология фильтрации использована и при бортовой реализации алгоритмов сглаживания.

Преобразования, аналогичные (11) – (16), будут справедливы и для уравнения (3), если ковариационную матрицу ошибок фильтрации представить в виде

$$P_{i/i}^{-1} = U_{i/i}^{-T} D_{i/i}^{-1} U_{i/i}, \quad (17)$$

где  $U_{i/i}$  – верхняя треугольная матрица с единичной диагональю;  $D_{i/i}$  – диагональная матрица.

С учетом разложения (17) и предварительной декомпозиции невязок

$$\tilde{v}_{i/N} = U_{i/i}^{-1} v_{i/N}$$

может быть сформирована  $U$ - $D$  модификация комбинированного алгоритма оптимальной фильтрации и сглаживания.

**Прогноз:**

$$m_0 = \hat{x}_{i/i-1} = \Phi_i \hat{x}_{i-1/i-1}; \quad j := 1;$$

$$MWGS \left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_i = [\Phi_i \ U_{i-1/i-1} \ ; \ \Gamma_i] \\ \bar{D}_i = \text{diag}(D_{i-1/i-1}, Q_{i-1}) \end{array} \right\} \rightarrow U_0; D_0$$

$$j = \overline{1, r}; \quad f_j = \Gamma_j U_{j-1}^{-T}; \quad V_j = D_{j-1}^{-1} f_j^T; \quad K_j = U_{j-1}^{-T} V_j / (f_j V_j + Q_{jj}^{-1});$$

$$MWGSL \left\{ \begin{array}{l} \tilde{W}_j = [K_j f_j - U_j^{-T}; K_j] \\ \tilde{D}_j = \text{diag}(D_j^{-1}, Q_{jj}^{-1}) \end{array} \right\} \rightarrow U_j^{-T}; D_j^{-1}$$

$$U_0^{-T} := U_{i/i-1}^{-T} = U_r^{-T}; \quad D_0^{-1} := D_{i/i-1}^{-1} = D_r^{-1}.$$

**Коррекция:**

$$j = \overline{1, l}; \quad f_i = H_j U_{j-1}; \quad V_j = D_{j-1} f_j^T;$$

$$\tilde{\alpha}_j = f_j V_j + R_j; \quad K_j = U_{j-1} V_j / \tilde{\alpha}_j;$$

$$m_j = m_{j-1} + K_j (z_j - H_j m_{j-1});$$

$$MWGS \left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_j = [K_j f_j - U_{j-1}; K_j] \\ \bar{D}_j = \text{diag}(D_{j-1}, R_j) \end{array} \right\} \rightarrow U_j; D_j$$

$$MWGSL \left\{ \begin{array}{l} \tilde{W}_j = [U_{j-1}^{-T} \ ; \ H_j^T] \\ \tilde{D}_j = \text{diag}(D_{j-1}^{-1}, R_j^{-2}) \end{array} \right\} \rightarrow U_j^{-T}; D_j^{-1}.$$

$$\text{Регистрация:} \quad \hat{x}_{i/i} = m_l = \tilde{z}_i; \quad U_{i/i} = U_l; \quad D_{i/i} = D_l; \quad U_{i/i}^{-T} = U_l^{-T}; \quad D_{i/i}^{-1} = D_l^{-1}; \quad j = \overline{1, l}. \quad (18)$$

$$\text{Интерполяция:} \quad m_0 = \hat{x}_{k-1/k} = \Phi_k^{-1} \hat{x}_{k/k}; \quad v_{k-1} = \tilde{z}_{k-1} - \hat{x}_{k-1/k};$$

$$\begin{aligned}
 & MWGS \left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_0 = [\Phi_{i+1}^{-1} U_{i+1/N}; \Phi_{i+1}^{-1} \Gamma_{i+1}] \\ \bar{D}_0 = \text{diag}(D_{i+1/N}, Q_i) \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} \tilde{U}_0 \\ \tilde{D}_0 \end{array} \\
 \text{Сглаживание:} & \quad \tilde{v}_j = U_j^{-1} v_{k-1}; \quad f_j = U_j^{-1} \tilde{U}_{j-1}; \quad V_j = \tilde{D}_{j-1} f_j^T; \\
 & \quad \alpha_{sj} = f_j V_j + D_j \quad \tilde{K}_j = \tilde{U}_{j-1} V_j / \alpha_{sj}; \\
 & MWGS \left\{ \begin{array}{l} \bar{W}_j = [(\tilde{K}_j f_j - \tilde{U}_{j-1}); \tilde{K}_j] \\ \bar{D}_j = \text{diag}(\tilde{D}_{j-1}, D_j) \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} \tilde{U}_j \\ \tilde{D}_j \end{array} \\
 & K_j = \tilde{U}_j \tilde{D}_j \tilde{U}_j^T U_j^{-T} D_j^{-1}; \quad m_j = m_{j-1} + K_j \tilde{v}_j; \quad j = \overline{1, n}; \\
 & \hat{x}_{k-1/k-1} = m_n; U_{i-1/k} = \tilde{U}_n; D_{i-1/k} = \tilde{D}_n; \quad k = \overline{i, i - N + 1},
 \end{aligned}$$

где  $U_j^{-1}$  –  $j$ -я строка матрицы  $U_{i/i}^{-1}$ ;  $MWGS$  – процедура ортогонального преобразования [8, 9] совокупности матриц прямоугольной  $\bar{W}_j$  размерности  $n \times (n+r)$  и диагональной  $D_j$  размерности  $(n+r) \times (n+r)$  в совокупность матриц верхней треугольной с единичной диагональю  $\tilde{U}_j$  и диагональной  $\tilde{D}_j$  размерности  $n \times n$ ;  $MWGS_L$  – аналогичная  $MWGS$  процедура формирования матриц нижней треугольной с единичной диагональю  $U_j^{-T}$  и диагональной  $D_j^{-1}$ ;  $H_j$  – вектор-строка коэффициентов связи наблюдения  $z_j$  с ВС  $m_j$ .

При сглаживании на скользящем временном интервале  $T = [t_{i-N+1}, t_i]$  массив оценок  $\hat{x}_{i/i}$  и соответствующих матриц  $U_{i/i}; D_{i/i}; U_{i/i}^{-T}; D_{i/i}^{-1}$  рекуррентно обновляется при поступлении очередных наблюдений  $z_i$ . Для этого указанные массивы, сформированные по предыдущим наблюдениям, сдвигаются на один шаг назад во временной шкале. Процедура обновления реализуется таким образом, что самые ранние массивы отбрасываются, а на место самых поздних подставляются очередные оценки и соответствующие им матрицы.

### Анализ результатов летной обработки комплексной системы микронавигации для РСА

Летные эксперименты проводились на вертолете. Результаты сравнительного анализа получены на основе счисления параметров движения по зарегистрированным сигналам БЧЭ, а также данных от СНС и ПНК вертолета.

Циклограмма работы системы РСМН включала следующие этапы: грубая начальная выставка ( $t = 0 \div 10$  с); точная довыставка (ТДВ) ( $t = 10 \div 900$ с); навигационный режим ( $t > 900$  с).

На этапе грубой начальной выставки по априорной юстировочной информации выполняется приближенное определение угловой ориентации БЧЭ относительно измерительных осей БИНС ПНК. В режиме «ТДВ+Навигация» оцениваются и компенсируются ошибки угловой ориентации БЧЭ относительно навигационного сопровождающего трехгранника, а также остаточные дрейфы чувствительных элементов: гироскопов и акселерометров. В режиме «ТДВ+Навигация» решались также следующие задачи:

- оценивание и компенсация ошибок РСМН по позиционным и скоростным инерциально-спутниковым наблюдениям вида (2) с частотой 1 Гц;
- регистрация и рекуррентное обновление векторно-матричных массивов данных (18);
- интерполяция и сглаживание оценок ошибок РСМН;
- формирование поправок к сигналам РСА

Применение внешнего специализированного вычислителя позволило реализовать в реальном времени комбинированный алгоритм счисления параметров движения ФЦА и оценивания их ошибок. Вектор ошибок РСМН включает 18 параметров, а именно: ошибки счисления составляющих вектора относительной скорости, ошибки счисления элементов кватернионов навигации и ориентации, угловые дрейфы ВОГ, смещения акселерометров и ошибку счисления высоты относительно земного эллипсоида.

Некоторые результаты экспериментов представлены на следующих рисунках: рис. 5 - траектория полета в горизонтальной плоскости, где  $\Delta\phi_R = [\phi(t) - \phi(t_0)]R$ ;  $\Delta\lambda_R = [\lambda(t) - \lambda(t_0)]R \cos \phi$ ; рис. 6 - изменения проекции вектора траекторной скорости на ось  $oE$  сопровождающего трехгранника  $oENH$  геодези-

ческой системы координат; рис. 7, 8 – соответственно углы тангажа и крена; рис. 9 - оценка остаточного дрейфа ВОГ  $\alpha_x$ ; рис. 10 - оценка смещения акселерометра  $\alpha_x$ . Представленные рисунки подтверждают наличие траекторных нестабильностей ЛА, необходимость их определения и компенсации в процессе синтезирования апертury РЛС.

На рис. 11 показана динамика изменения позиционной ошибки  $\Delta S$  на всей траектории полета, полученная с учетом списывания оценок вектора ошибок БИНСР. На рис. 12 показана ошибка числения полярной координаты «ФЦА-объект»  $\Delta D$  на интервале синтезирования апертury с учетом запаздывания сигналов СНС и рекуррентного сглаживания оценок вектора ошибок БИНСР. Можно видеть, что обработка инерциально-спутниковых наблюдений с учетом временного рассогласования между сигналами БИНСР и СНС, а также списывания сглаженных оценок вектора ошибок обеспечивает непрерывное (с частотой  $\geq 200$ Гц) определение полярной координаты «ФЦА-объект» на уровне единиц сантиметров.

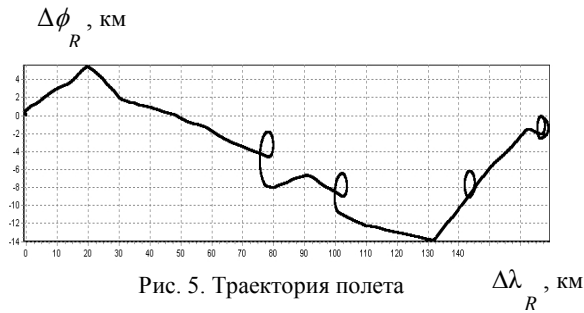


Рис. 5. Траектория полета

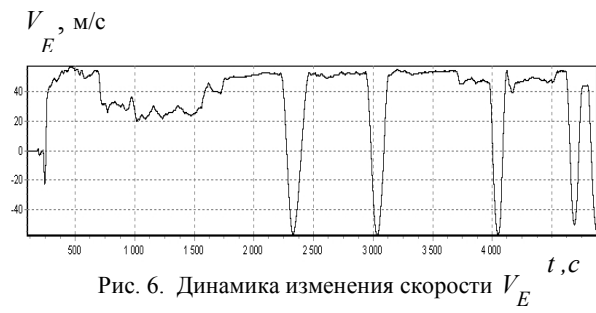


Рис. 6. Динамика изменения скорости  $V_E$

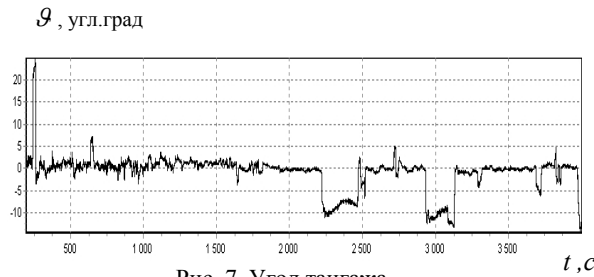


Рис. 7. Угол тангажа

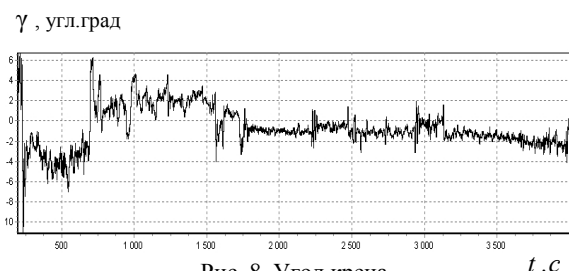


Рис. 8. Угол крена

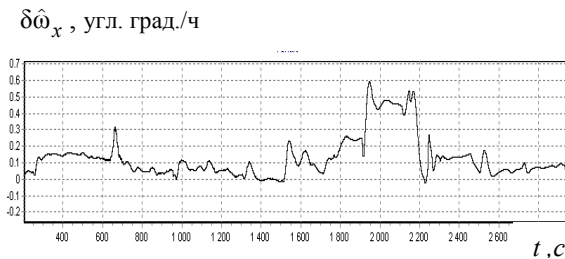


Рис. 9. Оценка остаточного дрейфа ВОГ  $\alpha_x$

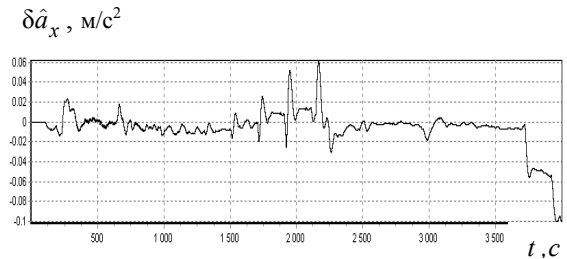


Рис. 10. Оценка смещения акселерометра  $\alpha_x$

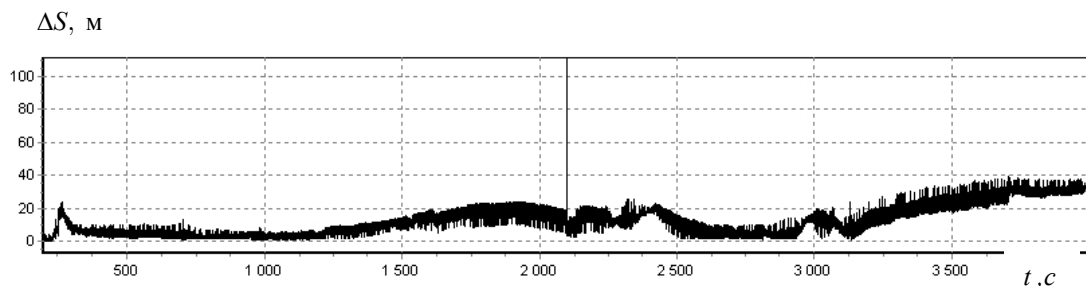


Рис. 11. Круговая позиционная ошибка БИНСР с учетом списывания оценок вектора ошибок

$\Delta D$ , м



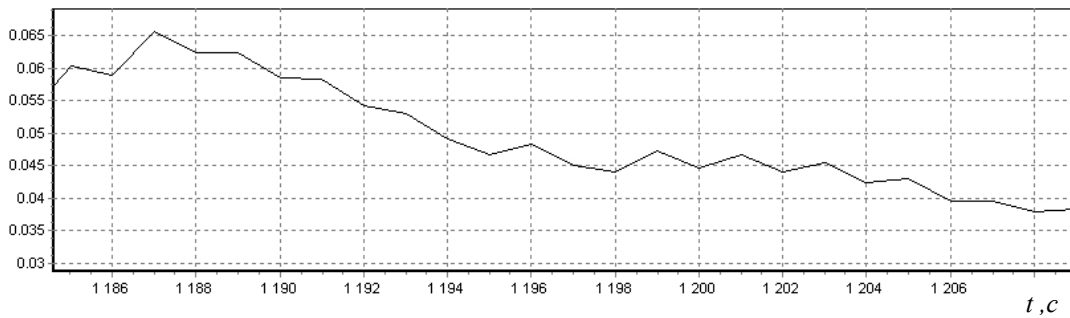


Рис. 12. Ошибка счисления полярной координаты ФЦА с учетом временного рассогласования инерциальных и спутниковых измерений, а также сглаживания оценок ошибок БИНСР

Из рис. 12 видно, что относительная позиционная ошибка на интервале синтезирования апертуры 5 с не превышает 5 мм.

## Заключение

Синтезирование апертуры антенны является одним из перспективных направлений развития радиолокации. Основным преимуществом этого направления является многократное увеличение угловой разрешающей способности РЛС. При этом обеспечивается возможность обнаружения и радиовидения малоразмерных объектов, повышения точности и помехозащищенности РЛС. Компенсация траекторных нестабильностей ЛА в сигналах РСА может быть обеспечена с помощью инерциально-спутниковой системы микронавигации с учетом реальных условий летной эксплуатации РСА. Для обеспечения требуемого разрешения РСА представляется также целесообразным определение рационального соотношения между точностными характеристиками РСМН и диапазоном длин волн РСА.

## Литература

1. **Авиационные системы радиовидения** / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648с.
2. **Бабич, О.А.** Обработка информации в навигационных комплексах. – М.: Машиностроение, 1991. – 512с
3. **Билик, В.В.** Пространственно-распределенная система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / В.В. Билик, В.Н. Коврегин, А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев // XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. - С. 185 - 194.
4. **Чернодаров, А.В.** Синхронизация инерциальных и спутниковых измерений в системе микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. - С. 107 - 110.
5. **Rauch, H.E.** Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems / H.E. Rauch, F. Tung, C.T. Striebel // AIAA Journal. 1965. – Vol. 3.– № 8.– P. 1445–1450.
6. **Чернодаров, А.В.** Диагностирование интегрированных навигационных систем на основе совместных  $U-D$  процедур фильтрации и сглаживания / А.В. Чернодаров, В.В. Енюгин, А.П. Патрикеев // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 3. С. 34-48.
7. **Сейдж, Э.П.** Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт; пер. с англ. под ред. Б.Р.Левина. – М.: Радио и связь, 1982. – 392с.
8. **Vierman, G.J.** Factorization methods for discrete sequential estimation. – N.Y.: Academic Press, 1977. – 320 p.
9. **Колодежный, Л.П.** Надежность и техническая диагностика / Л.П. Колодежный, А.В. Чернодаров. – М.: Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. – 452с.