

УДК 621.396.96

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНСЦЕНТНОГО И РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА ПРИ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ В СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.Н. МОРОЗ, П.А. ХМАРСКИЙ, С.А. ШАБАН, О.В. СИДОРОВИЧ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 19 ноября 2013

Рассмотрены особенности построения расширенного и ансцентного фильтров Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых радионавигационных системах. Для рассматриваемых алгоритмов фильтрации проведен сравнительный анализ качества навигационно-временных определений параметров траекторий воздушного объекта.

*Ключевые слова:* спутниковая радионавигационная система, сопровождение, фильтрация, расширенный фильтр Калмана, ансцентный фильтр Калмана.

### Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) стали неотъемлемой частью человеческой деятельности. Комплексная обработка информации, поступающей от приемника сигналов СРНС, позволяет определить основные навигационные параметры движущегося объекта с максимально возможной точностью. При этом точность зависит от качества навигационных измерителей (датчиков навигационной информации) и алгоритмов фильтрации навигационных сигналов [1, 2]. Наиболее распространенным таким алгоритмом является расширенный фильтр Калмана (РФК) [2–4]. Однако, как известно, РФК при решении нелинейных задач обладает ограниченными возможностями. Это объясняется использованием в РФК метода линеаризации, предполагающего замену нелинейных функции экстраполяции и пересчета на линейные в некоторой дельта-окрестности [4, 5]. Отсюда следует, что соответствующая точность РФК будет всегда ниже оптимальной. В этой связи возникает необходимость рассмотрения альтернативных алгоритмов фильтрации, позволяющих приблизиться к оптимальной оценке. Одним из таких алгоритмов является ансцентный фильтр Калмана (АФК) [6, 7]. Целями статьи являются: выявление особенностей построения АФК и РФК при фильтрации информации в СРНС; установление возможности повышения точности навигационно-временных определений подвижного объекта при использовании СРНС с АФК, по сравнению с РФК.

### Постановка задачи

*Начальные условия.* В качестве системы координат (СК), в которой происходит функционирование источников координатно-временной информации, будем использовать геоцентрическую подвижную СК OXYZ [1]. Ее центр O совпадает с центром масс Земли, ось OZ направлена вдоль оси вращения Земли в сторону Северного полюса, ось OX лежит в плоскости экватора и проходит через Гринвичский меридиан, OY дополняет СК до правой. В отечественной литературе данная СК получила название ПЗ-90, а в зарубежной – WGS-84 [1]. В качестве воздушного носителя приемника сигналов СРНС рассматривается аэродинамический летательный аппарат (ЛА), летящий с постоянным ускорением. Будем считать, что одновременно имеются данные от 4 спутников (канала приемника сигналов СРНС). Наблюдения приемника СРНС можно представить в виде [1]:

$$\mathbf{y}_{\text{СРНС}i,k} = \begin{bmatrix} D_{i,k} + D'_k \\ V_{i,k} + V'_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\text{ПД}i,k} \\ n_{\text{ПС}i,k} \end{bmatrix},$$

где  $i$  – номер канала приемника сигналов СРНС ( $i=1,...,N$ );

$D_{i,k} = \sqrt{(X_{i,k} - X_k)^2 + (Y_{i,k} - Y_k)^2 + (Z_{i,k} - Z_k)^2}$  – истинное значение дальности до спутника, соответствующее  $i$ -му каналу;

$$V_{i,k} = \frac{(X_{i,k} - X_k)(V_{xi,k} - V_{x,k}) + (Y_{i,k} - Y_k)(V_{yi,k} - V_{y,k}) + (Z_{i,k} - Z_k)(V_{zi,k} - V_{z,k})}{\sqrt{(X_{i,k} - X_k)^2 + (Y_{i,k} - Y_k)^2 + (Z_{i,k} - Z_k)^2}} - \text{истинное значение}$$

радиальной скорости спутника относительно ЛА;  $D'_k$  – систематическая ошибка измерения дальности, вызванная рассогласованием часов спутника и ЛА;  $V'_k$  – систематическая ошибка скорости, вызванная уходом частоты задающего генератора в приемнике СРНС;  $k$  – номер шага измерения;  $n_{\text{ПД}i,k}$ ,  $n_{\text{ПС}i,k}$  – взаимно независимые дискретные белые гауссовские шумы (ДБГШ) с дисперсиями  $\sigma_{\text{ПД}}^2$  и  $\sigma_{\text{ПС}}^2$  соответственно;  $\{X_k, Y_k, Z_k, V_{x,k}, V_{y,k}, V_{z,k}\}$  – координаты и компоненты вектора скорости ЛА в СК ПЗ-90;  $\{X_{i,k}, Y_{i,k}, Z_{i,k}, V_{xi,k}, V_{yi,k}, V_{zi,k}\}$  – эфемериды спутника, отслеживаемого  $i$ -м каналом в той же СК.

Оцениваемый вектор состояния в СК ПЗ-90 состоит из следующих параметров:

$\lambda_k = \|X_k \ Y_k \ Z_k \ D'_k \ V_{x,k} \ V_{y,k} \ V_{z,k} \ V'_k \ A_{x,k} \ A_{y,k} \ A_{z,k}\|^T$ , где  $A_{x,k}, A_{y,k}, A_{z,k}$  – компоненты вектора ускорения ЛА.

В качестве модели динамики ЛА будем использовать модель Зингера [1, 3]:  $\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + T_d \mathbf{V}_{k-1}$ ,  $\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{k-1} + T_d \mathbf{A}_{k-1}$ ,  $\mathbf{A}_k = \mathbf{A}_{k-1} e^{-\alpha T_d} + \sigma_a \sqrt{1 - e^{-2\alpha T_d}} \mathbf{n}_{a,k-1}$ , где  $\mathbf{X}_k = \|X_k \ Y_k \ Z_k\|^T$ ;  $\mathbf{V}_k = \|V_{x,k} \ V_{y,k} \ V_{z,k}\|^T$ ;  $\mathbf{A}_k = \|A_{x,k} \ A_{y,k} \ A_{z,k}\|^T$ ;  $T_d$  – интервал дискретизации;  $\sigma_a$  – среднееквадратическое отклонение (СКО) случайного маневра ЛА;  $\alpha$  – ширина спектра флуктуаций ускорения;  $\mathbf{n}_{a,k-1}$  – вектор независимых ДБГШ с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Модель ухода часов воздушного носителя примем равной [1]:  $D'_k = D'_{k-1} + T_d V'_{k-1}$ ;  $V'_k = V'_{k-1} e^{-\eta T_d} + \sigma_v \sqrt{1 - e^{-2\eta T_d}} n_{v,k-1}$ , где  $\sigma_v$  – СКО случайного ухода частоты задающего генератора, пересчитанное к радиальной скорости;  $\eta$  – ширина спектра флуктуаций частоты задающего генератора;  $n_{v,k-1}$  – ДБГШ с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Вектор наблюдаемых параметров будет равен:  $\mathbf{y}_k = \|\mathbf{y}_{\text{СРНС}1,(k)}^T \ \mathbf{y}_{\text{СРНС}2,(k)}^T \ \mathbf{y}_{\text{СРНС}3,(k)}^T \ \mathbf{y}_{\text{СРНС}4,(k)}^T\|^T$ . Вектор-функция наблюдения равна:

$$\mathbf{S}(\lambda_k) = \|D_{1,k} + D'_k; \ V_{1,k} + V'_k; \ \dots \ D_{4,k} + D'_k; \ V_{4,k} + V'_k\|^T. \quad \text{Ошибки наблюдения}$$

некоррелированные и характеризуются корреляционной матрицей ошибок измерения:

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{ПД}1}^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{ПС}1}^2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{\text{ПД}4}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \sigma_{\text{ПС}4}^2 \end{bmatrix}.$$

**Задачи:** 1) рассмотреть особенности расчетов и построений РФК и АФК при вторичной обработке информации в СРНС; 2) методами математического моделирования провести сопоставление суммарных ошибок измерения координат и параметров движения ЛА для двух рассматриваемых алгоритмов фильтрации.

### Алгоритм работы расширенного фильтра Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых навигационных системах

Представим динамику изменения вектора состояния  $\lambda_k$  ЛА в дискретном виде [1–3]:

$$\lambda_k = F_{k-1} \lambda_{k-1} + G_{k-1} \omega_{k-1},$$

где  $\lambda_k$  – вектор состояния;  $F_{k-1}$  – неслучайная динамическая матрица пересчета приращения вектора состояния;  $G_{k-1}$  – матрица спектральных плотностей порождающего шума;  $\omega_{k-1}$  – порождающий векторный белый шум с матрицей дисперсий  $D_\omega$ .

Следуя [1], введем вектор  $v_k = \left\| X_k^T \quad D' \quad V_k^T \quad V' \right\|^T$ , от компонентов которого явно зависит сигнальная функция  $S(\lambda_k)$ . Данный вектор связан с вектором состояния  $\lambda_k$  соотношением  $v_k = c \lambda_k$ . Матрица  $c$  будет иметь размерность  $8 \times 11$  с единичными элементами на главной диагонали, а все остальные элементы будут нулевыми.

Уравнения расширенного фильтра Калмана [2–4]:

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_k &= \tilde{\lambda}_k + D_{\lambda,k} c^T \left( \frac{\partial S_k(\tilde{v}_k)}{\partial v} \right)^T D_n^{-1} (y_k - S_k(\tilde{v}_k)), \quad \tilde{\lambda}_k = F_{k-1} \lambda_{k-1}, \quad \tilde{D}_{\lambda,k} = F_{k-1} D_{\lambda,k-1} F_{k-1}^T + M_{k-1}, \\ D_{\lambda,k}^{-1} &= \tilde{D}_{\lambda,k}^{-1} + \left( \frac{\partial S_k(c \tilde{\lambda}_k)}{\partial \lambda} \right)^T D_n^{-1} \frac{\partial S_k(c \tilde{\lambda}_k)}{\partial \lambda}, \end{aligned}$$

где  $\hat{\lambda}_k$  – фильтрованный вектор состояния;  $\tilde{\lambda}_k$  – экстраполированный вектор состояния;  $D_{\lambda,k}$  – корреляционная матрица (КМ) ошибок фильтрации;  $\tilde{D}_{\lambda,k}$  – КМ ошибок экстраполяции;  $M_{k-1} = G_{k-1} D_{\omega,k-1} G_{k-1}^T$  – КМ случайного дискретного маневра.

Особенностями рассматриваемой модификации РФК будут являться:

1) неслучайная динамическая матрица пересчета приращения вектора состояния:

$$F_{k-1} = \left\| \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 & 0 & T_d^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 & 0 & T_d^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 & 0 & T_d^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & T_d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\eta T_d) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\alpha T_d) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\alpha T_d) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \exp(-\alpha T_d) \end{array} \right\|,$$

2) КМ случайного дискретного маневра:

$$\mathbf{M}_{k-1} = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{13} & 0 & 0 \\ 0 & m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{13} & 0 \\ 0 & 0 & m_{11} & 0 & 0 & 0 & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{13} \\ 0 & 0 & 0 & mv_{11} & 0 & 0 & 0 & mv_{12} & 0 & 0 & 0 \\ m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{23} & 0 & 0 \\ 0 & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{23} & 0 \\ 0 & 0 & m_{12} & 0 & 0 & 0 & m_{22} & 0 & 0 & 0 & m_{23} \\ 0 & 0 & 0 & mv_{12} & 0 & 0 & 0 & mv_{22} & 0 & 0 & 0 \\ m_{13} & 0 & 0 & 0 & m_{23} & 0 & 0 & 0 & m_{33} & 0 & 0 \\ 0 & m_{13} & 0 & 0 & 0 & m_{23} & 0 & 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & m_{13} & 0 & 0 & 0 & m_{23} & 0 & 0 & 0 & m_{33} \end{pmatrix},$$

где

$$m_{11} = \frac{\left(1 - \exp(-2\alpha T_d) + 2\alpha T_d + \frac{2\alpha^3 T_d^3}{3} - 2\alpha^2 T_d^2 - 4\alpha T_d \exp(-\alpha T_d)\right) \sigma_a^2}{2\alpha^5};$$

$$m_{12} = \frac{(1 + \exp(-2\alpha T_d) - 2\exp(-\alpha T_d) + 2\alpha T_d \exp(-\alpha T_d) - 2\alpha T_d + \alpha^2 T_d^2) \sigma_a^2}{2\alpha^4};$$

$$m_{13} = \frac{(1 - \exp(-2\alpha T_d) - 2\alpha T_d \exp(-\alpha T_d)) \sigma_a^2}{2\alpha^3};$$

$$m_{22} = \frac{(-3 + 4\exp(-\alpha T_d) - \exp(-2\alpha T_d) + 2\alpha T_d) \sigma_a^2}{2\alpha^3};$$

$$m_{23} = \frac{(1 + \exp(-2\alpha T_d) - 2\exp(-\alpha T_d)) \sigma_a^2}{2\alpha^2}; \quad m_{33} = \frac{(1 - \exp(-2\alpha T_d)) \sigma_a^2}{2\alpha};$$

$$mv_{11} = \frac{(-3 + 4\exp(-\eta T_d) - \exp(-2\eta T_d) + 2\eta T_d) \sigma_{v'}^2}{2\eta^3};$$

$$mv_{12} = \frac{(1 + \exp(-2\eta T_d) - 2\exp(-\eta T_d)) \sigma_{v'}^2}{2\eta^2}; \quad mv_{22} = \frac{(1 - \exp(-2\eta T_d)) \sigma_{v'}^2}{2\eta}.$$

#### Алгоритм работы ансентного фильтра Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых навигационных системах

Алгоритм работы АФК для удобства практической реализации разбивают на два основных этапа [6, 7] – этап экстраполяции, этап фильтрации.

*Этап экстраполяции.* Формируется набор  $2n+1$  сигма-точек ( $n$  – размерность вектора состояния) из фильтрованного вектора состояния  $\hat{\lambda}_k$  и матрицы ошибок фильтрации  $\mathbf{D}_{\lambda,k}$  на предыдущем наблюдении ( $(k-1)$ -м шаге):

$$\mathbf{A}_{k-1}^0 = \hat{\lambda}_{k-1}; \quad \mathbf{A}_{k-1}^i = \hat{\lambda}_{k-1} + \left( \sqrt{(n+\kappa)\mathbf{D}_{\lambda,k-1}} \right)_i, \quad i=1\dots n; \quad \mathbf{A}_{k-1}^i = \hat{\lambda}_{k-1} - \left( \sqrt{(n+\kappa)\mathbf{D}_{\lambda,k-1}} \right)_i, \quad i=n+1, \dots, 2n,$$

где  $\left( \sqrt{(n+\kappa)\mathbf{D}_{\lambda,k-1}} \right)_i$  –  $i$ -й столбец (или строка) взвешенной матрицы  $\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{D}_{\lambda,k-1}}$ ;

$\kappa$  – масштабируемый коэффициент, выбираемый из эвристического правила:  $\kappa+n=3$ .

При нахождении корня квадратного из КМ ошибок фильтрации используют устойчивые и эффективные методы, наиболее распространенным из них является метод Холецкого [6].

Далее каждая точка экстраполируется при помощи выражения:  $\mathbf{A}_k^i = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{A}_{k-1}^i$ ,  $i=0\dots 2n$ . По экстраполированным точкам определяются параметры экстраполированной плотности вероятности –  $\tilde{\lambda}_k$  и  $\tilde{\mathbf{D}}_{\lambda,k}$ :

$$\tilde{\lambda}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i \mathbf{A}_k^i, \quad \tilde{\mathbf{D}}_{\lambda,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\mathbf{A}_{k+1}^i - \tilde{\lambda}_k)(\mathbf{A}_{k+1}^i - \tilde{\lambda}_k)^T + \mathbf{G} \mathbf{D}_\omega \mathbf{G}^T, \quad W_0 = \frac{\kappa}{n + \kappa}, \quad W_i = \frac{1}{2(n + \kappa)}.$$

*Этап фильтрации.* Полученные сигма-точки преобразуются с помощью вектор-функции наблюдения  $\mathbf{S}_k(\bullet)$ :  $\Theta_k^i = \mathbf{S}_k(\mathbf{A}_k^i)$ ,  $i = 0 \dots 2n$ . По совокупности полученных точек определяются параметры преобразованной плотности вероятности – математическое ожидание (МО)  $\tilde{\mathbf{y}}_k$ , КМ  $\mathbf{D}_{yy,k}$  и  $\mathbf{D}_{\lambda y,k}$ :

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_i \Theta_k^i, \quad \mathbf{D}_{yy,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\Theta_k^i - \tilde{\mathbf{y}}_k)(\Theta_k^i - \tilde{\mathbf{y}}_k)^T,$$

$$\mathbf{D}_{\lambda y,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\mathbf{A}_k^i - \tilde{\lambda}_k)(\Theta_k^i - \tilde{\mathbf{y}}_k)^T, \quad W_0 = \frac{\kappa}{n + \kappa}, \quad W_i = \frac{1}{2(n + \kappa)}.$$

Матрица коэффициентов фильтрации  $\mathbf{K}_k$ , МО фильтрованного вектора состояния  $\hat{\lambda}_k$  и КМ ошибок фильтрации  $\mathbf{D}_{\lambda,k}$  на  $k$ -м шаге будут равны:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{D}_{\lambda y(k)} (\mathbf{D}_{yy(k)} + \mathbf{D}_n)^{-1}, \quad \hat{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \tilde{\mathbf{y}}_k), \quad \mathbf{D}_{\lambda,k} = \tilde{\mathbf{D}}_{\lambda,k} - \mathbf{K}_k (\mathbf{D}_{yy,k} + \mathbf{D}_n) \mathbf{K}_k^T.$$

Отсутствие необходимости вычисления частных производных от нелинейной функции  $\mathbf{S}(\lambda_k)$  приводит к тому, что АФК проще в отладке и реализации чем РФК. Вычислительные затраты при этом РФК и АФК сопоставимы [6].

### Результаты математического моделирования

Для установления возможности повышения точности навигационно-временных определений подвижного объекта при использовании СРНС с АФК, по сравнению с РФК было проведено математическое моделирование.

Задающее воздействие было представлено в виде сочетания детерминированной полиномиальной модели (регулярной составляющей) 2-го порядка и случайной составляющей в виде коррелированного гауссовского шума. Траектория движения спутников описывалась уравнениями невозмущенного траекторного движения [4]. Параметры моделирования представлены в таблице.

Параметры моделирования

| Характеристика образца                                                                                      | Значение |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Интервал дискретизации $T_d$ , с                                                                            | 0,01     |
| Число спутников, используемых для решения навигационной задачи                                              | 4        |
| Средний квадрат ошибки измерения псевдодальности $\sigma_{ПД,i}$ , м                                        | 100      |
| Средний квадрат ошибки измерения псевдоскорости $\sigma_{ПС,i}$ , м/с                                       | 15       |
| Средний квадрат ухода частоты задающего генератора, пересчитанный в радиальную скорость $\sigma_{V'}$ , м/с | 3        |
| Ширина спектра флуктуаций ускорения $\alpha$ , с <sup>-1</sup>                                              | 0,2      |
| Ширина спектра флуктуаций частоты задающего генератора $\eta$ , с <sup>-1</sup>                             | 0,1      |
| Начальная скорость ЛА $V$ , м/с                                                                             | 100      |
| Ускорение ЛА $A$ , м/с <sup>2</sup>                                                                         | 5        |

В качестве показателей точности использовалось значение сферической ошибки измерения местоположения:  $\varepsilon_{сф,k} = \sqrt{(X_k - \hat{X}_k)^2 + (Y_k - \hat{Y}_k)^2 + (Z_k - \hat{Z}_k)^2}$ , где  $\{\hat{X}_k, \hat{Y}_k, \hat{Z}_k\}$  – фильтрованные значения компонент вектора состояния.

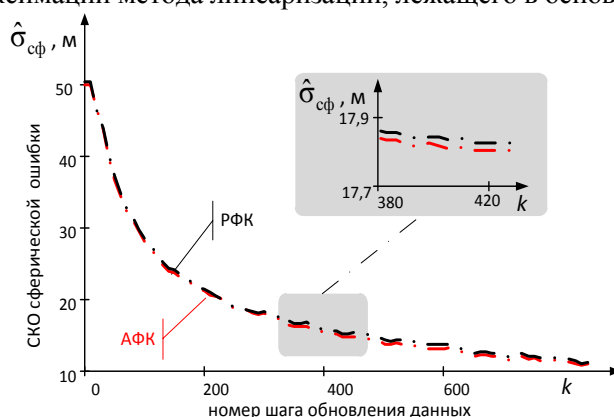
Сравнительный анализ АФК и РФК проводился методом статистических испытаний. Для определения математического ожидания и СКО сферической ошибки измерения

местоположения  $\hat{m}_{\text{сф}}$ ,  $\hat{D}_{\text{сф}}$  использовались формулы:  $\hat{m}_{\text{сф}}(k) = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{\text{сф } k, i}}{N}$ ;

$\hat{\sigma}_{\text{сф}}(k) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{\text{сф } k, i} - \hat{m}_{\text{сф } k, i})^2 \right)}$ , где  $N$  – количество опытов;  $\varepsilon_{\text{сф } k, i}$  – значения сферической ошибки для фиксированных моментов времени  $k$ .

В ходе моделирования проведено 10000 опытов. Полученные в ходе модельных экспериментов значения СКО сферических ошибок измерения местоположения ЛА  $\hat{\sigma}_{\text{сф}}$  изображены на рисунке.

Анализ данных рисунка показывает, что использование АФК не позволяет достичь значительного выигрыша в точности по сравнению с РФК. Отсутствие выигрыша объясняется тем, что ошибки аппроксимации метода линеаризации, лежащего в основе РФК, несущественны.



Результаты сопоставительного моделирования.

### Заключение

В статье рассмотрены особенности построения РФК и АФК при вторичной обработке информации в СРНС.

В результате анализа результатов моделирования установлено:

1. Использование АФК для решения задач фильтрации в СРНС является целесообразным.
2. Для заданных условий моделирования использование АФК не позволило значительно повысить точность измерения по сравнению с РФК. Это объясняется тем, что ошибки аппроксимации метода линеаризации, лежащего в основе РФК, несущественны.
3. При сопоставимых вычислительных затратах АФК проще в отладке и реализации чем РФК.

## THE COMPARATIVE ANALYSIS OF UNSCENTED AND EXTENDED KALMAN FILTERS FOR GLOBAL POSITIONING SYSTEMS RECEIVER DATA PROCESSING

A.N. MOROZ, P.A. KHMARSKI, S.A. SHABAN, O.V. SIDOROVICH

### Abstract

The features of extended and unscented Kalman filters for global positioning systems receiver data processing are considered. The estimation performance of extended and unscented Kalman filters is compared.

### Список литературы

1. *Бакитько Р.В., Болденков Е.И., Булавский Н.Т. и др.* ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Издание 4-ое, перераб. и доп. / Под общ. ред. А.И. Перова и В.Н. Харисова М., 2005.
2. *Степанов О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб, 2009.
3. *Бар-Шалом Я., Ли Х.Р.* Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: в 2 ч. Пер. с англ. М., 2011.
4. *Перов А. И.* Статистическая теория радиотехнических систем. М., 2003.
5. *Хмарский П.А., Солонар А.С.* // Докл. БГУИР. 2012. № 7. С 47–53.
6. *Julier S., Uhlmann J.* // IEEE Trans. on Automatic Control. 2000. Vol. 45. №3. P. 477–482.
7. *Хмарский П.А., Солонар А.С.* // Докл. БГУИР. 2013. № 2. С. 79–86.