

дов и подходов, был лишен их недостатков, а также предоставлял бы универсальный подход к определению видимости и отсечению, способный эффективно работать в различных типах визуализации.

Помимо этого необходимо формировать и использовать высокоуровневое знание всех этапов визуализации и времени их выполнения. Это позволит осуществлять эффективное планирование выполнения команд и распределения задач между множественными графическими процессорами.

### Литература

1. *Akenine-Moller T. et al. Real-Time Rendering*. 4<sup>th</sup> ed. A K Peters/CRC Press, 2018. 1198 p.
2. *Burns C., Hunt W. The Visibility Buffer: A Cache-Friendly Approach to Deferred Shading*. URL: <http://jcgf.org/published/0002/02/04/> (date of the application: 13.03.2020).
3. *Engel W. Diary of a Graphics Programmer: Triangle Visibility Buffer*. URL: <http://diaryofagraphicsprogrammer.blogspot.com/2018/03/triangle-visibility-buffer.html> (date of the application: 11.03.2020).
4. *Wihlidal G. Optimizing The Graphics Pipeline With Compute*. URL: <https://www.ea.com/frostbite/news/optimizing-the-graphics-pipeline-with-compute> (date of the application: 10.03.2020).

DOI: 10.25586/RNUV9187.20.02.P.042

УДК 681.5.017

А.О. Жуков, К.А. Крупский, У.А. Пестун

---

### АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ\*

---

Разработан адаптивный алгоритм фильтрации параметров движения космического объекта на геостационарной орбите, сочетающий в себе простоту реализации и высокую точность оценок.

*Ключевые слова:* алгоритм, динамическая фильтрация, ковариация, фильтр Калмана, моделирование.

A.O. Zhukov, K.A. Krupskij, U.A. Pestun

---

### ADAPTIVE FILTRATION ALGORITHM FOR SPACE OBJECT MOVEMENT PARAMETERS IN A GEOSTATION ORBIT

---

An adaptive algorithm is developed for filtering the motion parameters of a space object in a geostationary orbit, combining ease of implementation and high accuracy of estimates.

*Keywords:* algorithm, dynamic filtering, covariance, Kalman filter, modeling.

---

\* Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента России (проект НШ-2686.2020.8 «Модели, методы и средства получения и обработки информации о космических объектах в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн»).

*Введение*

В задачах определения текущего положения космических объектов в пространстве (далее – ТПКО) [5; 12] на основе динамической фильтрации измерений параметров движения основным этапом является обеспечение устойчивости рекуррентного фильтра [4; 7]. Данный этап относится к проблеме решения некорректных задач, а именно, когда небольшие отклонения в исходных данных вызывают сколь угодно большие (но конечные) отклонения в решении.

Для задач данного типа разработан метод устойчивого (приближенного) решения – метод регуляризации. Общий подход состоит в искусственном загромождении результатов измерений, ограничении памяти или расширении полосы фильтра [7; 8; 11].

Такой подход к решению задачи определения ТПКО с учетом особенностей его маневрирования на геостационарной орбите (далее – ГСО) может привести не только к снижению точности оценок параметров движения космического объекта (далее – КО), но и к недостоверной классификации ТПКО (обнаружение маневра и т.п.).

Таким образом, актуальной является разработка адаптивного алгоритма фильтрации параметров движения КО в интересах решения задачи определения ТПКО на ГСО.

*Постановка задачи*

Совокупность КО и средств измерений (далее – СИ) представляет собой непрерывно-дискретную систему, в которой функционирование КО – непрерывная динамическая система, а функционирование СИ – дискретная измерительная система.

Решение задачи оценивания параметров движения КО на ГСО возможно за счет использования расширенного фильтра Калмана для нелинейных динамических систем [1].

Особенностью решения задачи оценивания параметров движения КО является то, что фильтруемые параметры движения представляются в прямоугольной геоцентрической системе координат, а измеряемые параметры движения – в сферической подвижной измерительной системе координат.

Основные соотношения рекуррентного адаптивного фильтра можно представить в следующем виде [1; 6; 7; 14; 15]:

$$\hat{\theta}_k^{\circ} = F_k \hat{\theta}_{k-1}; \tag{1}$$

$$\gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ} = F_k \gamma_{\hat{\theta}_{k-1}}^{\circ} F_k^T + Q_{k-1}; \tag{2}$$

$$K_k = \gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ} H_k^T (H_k \gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ} H_k^T + R_k)^{-1}; \tag{3}$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_k^{\circ} + K_k (Y_k - Y_k^{\circ}); \tag{4}$$

$$\gamma_{\hat{\theta}_k} = \gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ} - K_k H_k \gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ}, \tag{5}$$

где  $\hat{\theta}_k^{\circ}$  – экстраполированные значения оцениваемых параметров движения КО;  $F_k$  – матрица экстраполяции оцениваемых параметров движения КО;  $\gamma_{\hat{\theta}_k}^{\circ}$  – экстраполированная ковариационная матрица оценок параметров движения КО;  $Q_{k-1}$  – ковариационная матрица шума процесса функционирования КО;  $Y_k$  – вектор измеренных значений параметров движения КО;  $Y_k^{\circ}$  – вектор экстраполированных значений измеряемых параметров движения КО;  $R_k$  – ковариационная матрица погрешностей измерений;  $K_k$  – матричный коэффициент усиления фильтра;  $\gamma_{\hat{\theta}_k}$  – ковариационная матрица оценок параметров движения КО.

Матрица частных производных  $\mathbf{H}_k$  представляет собой линейризованный оператор, устанавливающий связь между измеряемыми и оцениваемыми параметрами движения КО [7].

Стоит отметить, что вектор экстраполированных значений измеряемых параметров движения КО ( $\mathbf{Y}_k^p$ ) рассчитывается на основе экстраполированных значений оцениваемых параметров движения КО ( $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k^p$ ) с использованием уравнений связи измеряемых и оцениваемых параметров движения КО.

Необходимо определить способ формирования  $\mathbf{Q}_{k-1}$ , обеспечивающий получение несмещенных и эффективных оценок параметров движения КО в интересах решения задачи контроля его состояния.

#### Решение

Формирование матрицы  $\mathbf{Q}_{k-1}$  возможно методом уточнения ковариации на основе принципа согласованности или других методов оперативной коррекции процессов фильтрации [2; 9; 10; 16] путем представления ее в виде оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$ .

Однако в задачах определения ТПКО на ГСО такие подходы к построению адаптивного рекуррентного фильтра приводят к погрешностям оценок параметров движения КО и не позволяют получить решение.

Построение матрицы  $\mathbf{Q}_{k-1}$  возможно за счет анализа прогноза  $k-1$  и формирования оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  с использованием модифицированного метода уточнения ковариации на основе выражения [3; 13]:

$$\hat{\mathbf{Q}}_{k-1} = \frac{1}{(k-1)} \sum_{j=1}^{k-1} (\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^p)(\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^p)^T = \begin{vmatrix} \sigma^2 \hat{q}_1 & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_2) & \cdots & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_I) \\ \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_1) & \sigma^2 \hat{q}_2 & \cdots & \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_I) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(\hat{q}_I, \hat{q}_1) & \text{cov}(\hat{q}_I, \hat{q}_2) & \cdots & \sigma^2 \hat{q}_I \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где  $\sigma^2 \hat{q}_1, \sigma^2 \hat{q}_2, \dots, \sigma^2 \hat{q}_I$  – дисперсии оценок шумов  $q_1, q_2, \dots, q_I$ ;  $I$  – количество оцениваемых параметров движения КО.

Модификация метода уточнения ковариации заключается в следующем.

На каждой итерации формирования оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  проверяется условие

$$|\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_i^p| < (\sigma^2 \gamma_{\hat{\theta}_{k-1,i}})^{1/2}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (7)$$

где  $\sigma^2 \gamma_{\hat{\theta}_{k-1,i}}$  – элемент главной диагонали матрицы  $\hat{\boldsymbol{\gamma}}_{\hat{\theta}_{k-1}}$ .

При выполнении условия (7)  $i$ -я строка и столбец оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_j$  обнуляются:

$$\hat{\mathbf{Q}}_j = (\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^p)(\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^p)^T = \begin{vmatrix} \hat{q}_{11} & \hat{q}_{12} & \cdots & 0 & \cdots & \hat{q}_{1I} \\ \hat{q}_{21} & \hat{q}_{22} & \cdots & 0 & \cdots & \hat{q}_{2I} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{q}_{I1} & \hat{q}_{I2} & \cdots & 0 & \cdots & \hat{q}_{II} \end{vmatrix}, \quad j \in [1, (k-1)]. \quad (8)$$

Учет оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  в уравнении (2) осуществляется с использованием условия (7), при выполнении которого  $i$ -я строка и столбец оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  обнуляются:

$$\hat{\mathbf{Q}}_{k-1} = \begin{pmatrix} \sigma^2 \hat{q}_1 & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_2) & \dots & 0 & \dots & \text{cov}(\hat{q}_1, \hat{q}_l) \\ \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_1) & \sigma^2 \hat{q}_2 & \dots & 0 & \dots & \text{cov}(\hat{q}_2, \hat{q}_l) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \text{cov}(\hat{q}_l, \hat{q}_1) & \text{cov}(\hat{q}_l, \hat{q}_2) & \dots & 0 & \dots & \sigma^2 \hat{q}_l \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Такой подход к формированию оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  позволяет обеспечить сходимость процесса фильтрации при минимальной дисперсии оценок параметров движения КО.

Основными этапами реализации адаптивного алгоритма фильтрации параметров движения КО на ГСО являются следующие.

Этап 1. Формирование начальных условий  $k = 1, \hat{\mathbf{Q}}_0 = 0$ .

Этап 2. Аппроксимация шума процесса  $\hat{\mathbf{Q}}_j = (\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^a)(\hat{\boldsymbol{\theta}}_j - \hat{\boldsymbol{\theta}}_j^a)^T, j = k$ .

Этап 3. Проверка условия (7).

Этап 4. Уточнение шума процесса  $\hat{\mathbf{Q}}_k$  с использованием выражения (8).

Этап 5. Формирование оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_k - \hat{\mathbf{Q}}_k = \frac{k-1}{k} \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} + \frac{\hat{\mathbf{Q}}_j}{k}$ .

Этап 6. Проверка условия (7).

Этап 7. Уточнение оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_k$  с использованием выражения (9).

Этап 8. Учет оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_k$  в уравнении (2).

Этап 9. Переход к следующей итерации  $k+ = 1$ .

Реализация приведенных выше этапов позволит осуществлять формирование оценки  $\hat{\mathbf{Q}}_{k-1}$  независимо от ее учета в выражении (2).

### Расчетный пример

Апробация разработанного алгоритма проводилась при следующих исходных данных:

- два КО на ГСО, первый КО – объект контроля, второй КО измеряет наклонную дальность до первого КО ( $r$ ), его угловые координаты ( $\alpha, \beta$ ) и радиальную скорость ( $Vr$ ) в подвижной измерительной системе координат;

- дискретность измерений 10 с;

- $\sigma r = 0,3$  м;

- $\sigma Vr = 0,01$  м/с;

- $\sigma \alpha, \sigma \beta = 10$  угл. сек;

- $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{КО} = \left[ \hat{x} \mid \hat{y} \mid \hat{z} \mid \hat{Vx} \mid \hat{Vy} \mid \hat{Vz} \right]^T$  – вектор оцениваемых параметров движения КО в геоцентрической системе координат.

Ограничения и допущения:

- погрешности измерений распределены по нормальному закону;

- измерения имеют равную точность, корреляция отсутствует;

- при моделировании движения КО давление солнечного излучения, притяжение планет не учитывались;
- поле зрения средств измерений КО обеспечивает получение измерений на всем интервале моделирования движения КО.

С учетом особенности маневрирования КО на ГСО (маневрирование осуществляется в плоскости  $OXY$  геоцентрической системы координат), основным подходом к решению задачи определения ТПКО на основе динамической фильтрации измерений параметров его движения будет являться контроль оценок составляющих вектора скорости КО на выходе рекуррентного фильтра.

Непрерывно-дискретная система описывается уравнениями вида

$$\boldsymbol{\theta}_k = \mathbf{F}_k \boldsymbol{\theta}_{k-1}; \tag{10}$$

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_k \boldsymbol{\theta}_k + \mathbf{R}_k. \tag{11}$$

Матрицы  $\mathbf{F}_k$  и  $\mathbf{H}_k$  имеют вид

$$\mathbf{F}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial r}{\partial x} & \frac{\partial r}{\partial y} & \dots & \frac{\partial r}{\partial Vz} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial x} & \frac{\partial \alpha}{\partial y} & \dots & \frac{\partial \alpha}{\partial Vz} \\ \frac{\partial \beta}{\partial x} & \frac{\partial \beta}{\partial y} & \dots & \frac{\partial \beta}{\partial Vz} \\ \frac{\partial Vr}{\partial x} & \frac{\partial Vr}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Vr}{\partial Vz} \end{pmatrix}, \tag{12}$$

где  $\tau$  – дискрет измерений;  $\frac{\partial r}{\partial x} \dots \frac{\partial Vr}{\partial Vz}$  – частные производные от измеряемых параметров по оцениваемым параметрам движения КО.

На рисунках 1–3 представлены функциональные зависимости оценок составляющих вектора скорости ( $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ ) КО от времени по результатам работы расширенного рекуррентного фильтра, настроенного методом уточнения ковариации, и с использованием разработанного алгоритма.

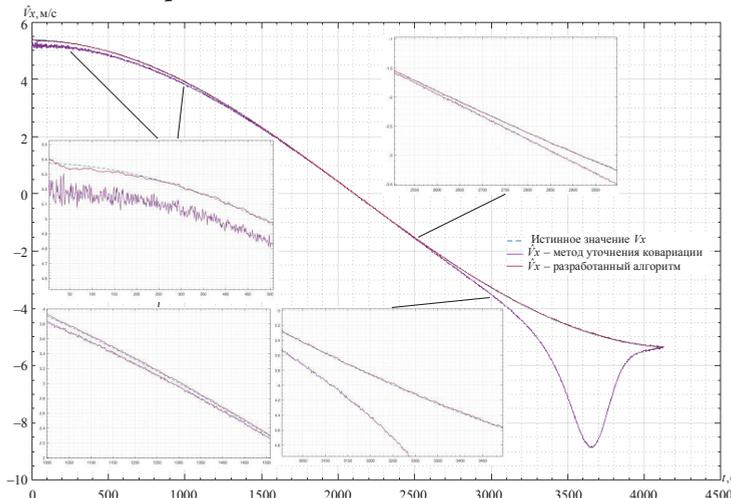


Рис. 1. Функциональные зависимости оценок  $\hat{V}_x$  КО от метода формирования матрицы  $\mathbf{Q}$

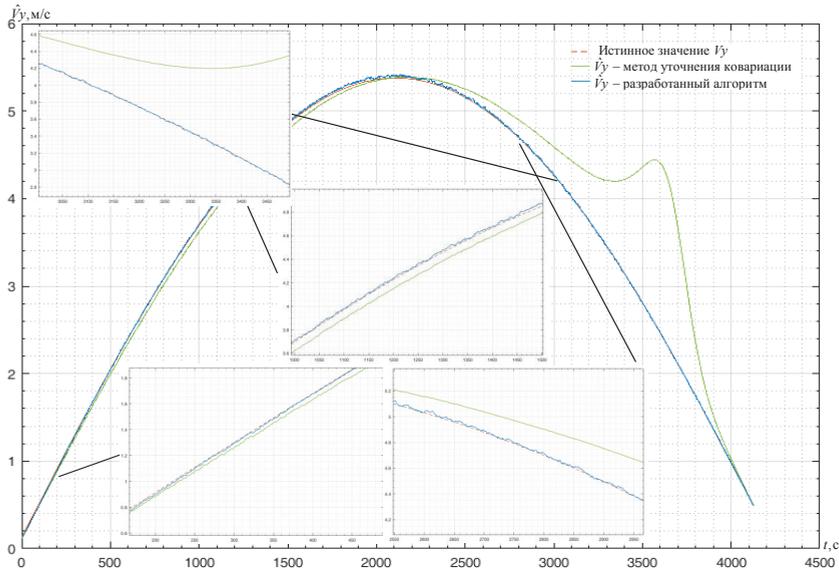


Рис. 2. Функциональные зависимости оценок  $\hat{V}_y$  КО от метода формирования матрицы  $\mathbf{Q}$

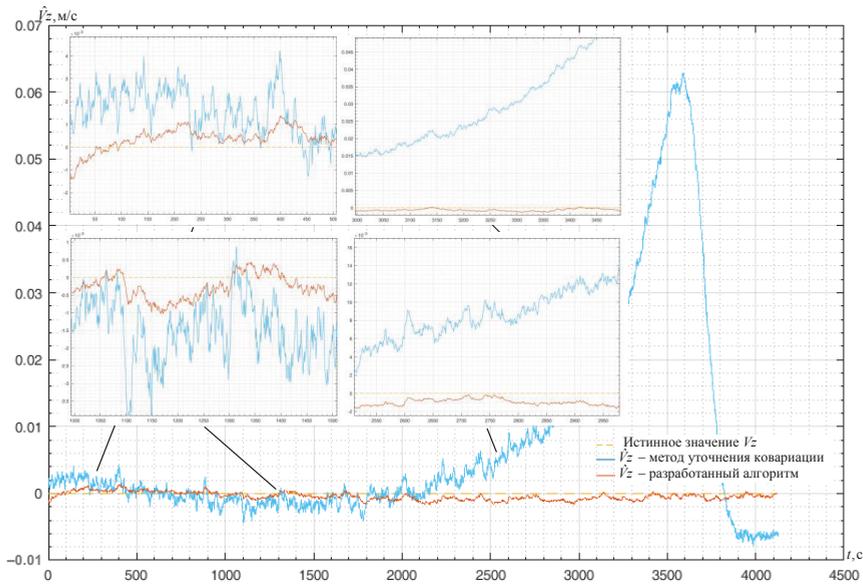
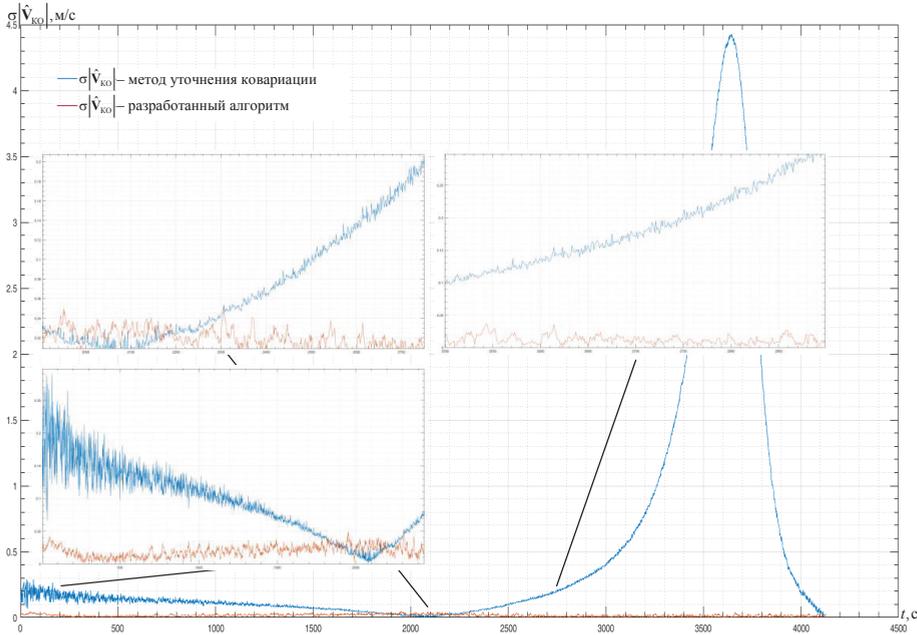


Рис. 3. Функциональные зависимости оценок  $\hat{V}_z$  КО от метода формирования матрицы  $\mathbf{Q}$

Результаты анализа функциональных зависимостей оценок составляющих вектора скорости КО от метода формирования матрицы  $\mathbf{Q}$  позволяют сделать вывод, что при использовании метода ковариации в адаптивном алгоритме фильтрации параметров движения КО на ГСО к недостоверному определению ТПКО в части ложного обнаружения маневра.

На рисунке 4 представлены функциональные зависимости средних квадратических отклонений (СКО) оценок модуля вектора скорости КО ( $\sigma|\hat{V}_{КО}|$ ) от метода формирования матрицы  $Q$ .



**Рис. 4.** Функциональные зависимости СКО оценок  $\sigma|\hat{V}_{КО}|$  КО от метода формирования матрицы  $Q$

Результаты анализа функциональных зависимостей оценок составляющих вектора скорости КО и СКО оценок модуля вектора его скорости от метода формирования матрицы  $Q$  позволяют сделать вывод, что решение задачи обнаружения маневра КО при маневрировании с малой тягой двигательной установки возможно с использованием разработанного адаптивного алгоритма фильтрации параметров движения КО на основе модифицированного метода уточнения ковариации.

#### Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм сочетает в себе простоту реализации и высокую точность оценок параметров движения КО на ГСО при обеспечении сходимости процесса фильтрации.

Реализация разработанного адаптивного алгоритма фильтрации параметров движения КО на основе модифицированного метода уточнения ковариации позволит за счет снижения погрешностей оценок параметров движения КО повысить достоверность ТПКО на ГСО.

#### Литература

1. Афанасьев В.Н., Данилина А.Н. Вывод и сопровождение нестационарного объекта управления по заданной траектории // Автоматика и телемеханика. 1979. № 12. С. 87–95.

Жуков А.О., Крупский К.А., Пестун У.А. Адаптивный алгоритм фильтрации...

2. *Валяев И.Н., Жуков А.О.* Математическая модель корреляционно-фазового радиопеленгатора // Королёвские чтения: XL Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сб. тезисов. М., 2015.
3. *Дегтярев А.А., Тайль Ш.* Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003. 35 с.
4. *Жуков А.О., Валяев И.Н., Коваленко В.П., Турлов З.Н.* Измерение частоты широкополосных сигналов при фазовой пеленгации космических аппаратов // Антенны. 2017. № 7. С. 21–27.
5. *Жуков А.О., Прохоров М.Е., Захаров А.И., Николаев Ф.Н., Тучин М.С., Шахов Н.И.* Метод проведения обзора и вариант построения космической системы для мониторинга космических объектов на околоземных орбитах // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. № 4-3. С. 71–75.
6. *Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.* Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
7. *Кузьмин С.З.* Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
8. *Параев Ю.И.* Введение в статистическую динамику процессов управления и фильтрации. М.: Советское радио, 1976. 184 с.
9. *Салычев О.С.* Алгоритм предотвращения расходимости // Известия АН СССР. Серия: Техническая кибернетика. 1974. № 4. С. 168–171.
10. *Семущин И.В.* Применение активной самонастройки в комплексной измерительной системе // Автометрия. 1971. № 2.
11. *Фомин В.Н.* Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука: Гл. ред. физико-матем. литер., 1984. 288 с.
12. *Чаплинский В.С., Жуков А.О., Гладышев А.И., Лысенко С.Н., Суровцева И.В.* Определение скоростных параметров космических аппаратов по измерениям в ретрансляционных системах // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2019. Вып. 3. С. 17–24.
13. *Chang C., Tabaczynski J.* Application of State Estimation to Target Tracking // IEEE Transactions on Automatic Control. 1984. Vol. 29, № 2. P. 98–109.
14. *Lainiotis D., Park S.* On Joint Detection, Estimation and System Identifications: Discrete Data Case // International Journal Control. 1973. Vol. 17, № 3. P. 609–633.
15. *Lamb P., Westphal L.* Simplex-Directed Partitioned Adaptive Filters // International Journal Control. 1979. Vol. 30, № 4. P. 617–627.
16. *Leonides C., Sin T.* Identification Both of the Unknown Plant and Noise Parameters of the Kalman Filter // International Journal Systems Science. 1980. Vol. 11, № 6. P. 711–720.

#### Literatura

1. *Afanas'ev V.N., Danilina A.N.* Vyvod i soprovozhdenie nestatsionarnogo ob'ekta upravleniya po zadanoj traektorii // Avtomatika i telemekhanika. 1979. № 12. S. 87–95.
2. *Valyaev I.N., Zhukov A.O.* Matematicheskaya model' korrelyatsionno-fazovogo radiopelengatora // Korolyovskie chteniya: XL Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Korolyova i drugih vydayushchikhsya otechestvennykh uchennykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sb. tezisov. М., 2015.
3. *Degtyarev A.A., Tajl' Sh.* Elementy teorii adaptivnogo rasshirenogo fil'tra Kalmana. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003. 35 с.

4. Zhukov A.O., Valyaev I.N., Kovalenko V.P., Turlov Z.N. Izmerenie chastoty shirokopolosnykh signalov pri fazovoj pelengatsii kosmicheskikh apparatov // *Antenny*. 2017. № 7. S. 21–27.
5. Zhukov A.O., Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Nikolaev F.N., Tuchin M.S., Shakhov N.I. Metod provedeniya obzora i variant postroeniya kosmicheskoy sistemy dlya monitoringa kosmicheskikh ob"ektov na okolozemnykh orbitakh // *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*. 2013. № 4-3. S. 71–75.
6. Kuzovkov N.T., Karabanov S.V., Salychev O.S. Nepreryvnye i diskretnye sistemy upravleniya i metody identifikatsii. M.: Mashinostroenie, 1978. 222 s.
7. Kuz'min S.Z. Osnovy proektirovaniya sistem tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoj informatsii. M.: Radio i svyaz', 1986. 352 s.
8. Paraev Yu.I. Vvedenie v statisticheskuyu dinamiku protsessov upravleniya i fil'tratsii. M.: Sovetskoe radio, 1976. 184 s.
9. Salychev O.S. Algoritm predotvrashcheniya raskhodimosti // *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Tekhnicheskaya kibernetika*. 1974. № 4. S. 168–171.
10. Semushin I.V. Primenenie aktivnoj samonastrojki v kompleksnoj izmeritel'noj sisteme // *Avtometriya*. 1971. № 2.
11. Fomin V.N. Rekurrentnoe otsenivanie i adaptivnaya fil'tratsiya. M.: Nauka: Gl. red. fiziko-matem. liter., 1984. 288 s.
12. Chaplinskij V.S., Zhukov A.O., Gladyshev A.I., Lysenko S.N., Surovtseva I.V. Opredelenie skorstnykh parametrov kosmicheskikh apparatov po izmereniyam v retranslyatsionnykh sistemakh // *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya "Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie"*. 2019. Vyp. 3. S. 17–24.
13. Chang C., Tabaczynski J. Application of State Estimation to Target Tracking // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1984. Vol. 29, № 2. P. 98–109.
14. Lainiotis D., Park S. On Joint Detection, Estimation and System Identifications: Discrete Data Case // *International Journal Control*. 1973. Vol. 17, № 3. P. 609–633.
15. Lamb P., Westphal L. Simplex-Directed Partitioned Adaptive Filters // *International Journal Control*. 1979. Vol. 30, № 4. P. 617–627.
16. Leondes C., Sin T. Identification Both of the Unknown Plant and Noise Parameters of the Kalman Filter // *International Journal Systems Science*. 1980. Vol. 11, № 6. P. 711–720.