

## ФИЛЬТРАЦИЯ КООРДИНАТ МАНЕВРИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ЧАСТОТНО-УГЛОМЕРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2020 Э. А. Кирсанов✉, С. А. Колесников

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»  
ул. Старых Большевиков, 54 «А», 394064 Воронеж, Российская Федерация*

**Аннотация.** В рамках марковской теории нелинейной фильтрации в дискретном времени предложены и исследованы алгоритмы фильтрации только декартовых координат и частоты и декартовых координат маневрирующего объекта многопозиционной радиосистемой в трехмерном пространстве, соответственно только по угломерным и по частотно-угломерным измерениям с учетом наличия пропусков и аномальных наблюдений. При этом максимальный состав вектора состояния подвижного источника радиоизлучения включает частоту, декартовы координаты и проекции скорости в трехмерном пространстве. Вектор наблюдения содержит в своем максимальном составе измеренные значения частоты, азимута и угла места источника радиоизлучения, поступающие с выходов радиоприемных устройств обнаружителей-пеленгаторов многопозиционной радиосистемы, и учитывает возможность получения аномальных измерений. При фиксации пропуска наблюдение соответствующего обнаружителя-пеленгатора экстраполируется. Фильтрация вектора состояния осуществляется на основе условно-линейного по отношению к пропускам наблюдений фильтра. При этом начальная оценка вектора состояния и ее ковариационной матрицы может задаваться исходя из априорной информации. Показано, что дополнительный учет изменения не только угловых координат маневрирующего источника радиоизлучения, но и часты его сигнала вследствие эффекта Доплера приводит к более существенному уменьшению ошибки местоопределения по сравнению с расширенным фильтром Калмана.

**Ключевые слова:** маневрирующий объект, марковская фильтрация, фильтрация координат, эффект Доплера.

### ВВЕДЕНИЕ

В [1] исследовались нейросетевые и статистически оптимальные алгоритмы оценивания координат источников радиоизлучения в многопозиционных радиосистемах по однократным наблюдениям. Однако в условиях наличия пропусков наблюдений, обусловленных невыполнением условий электромагнит-

ной доступности, и аномальных измерений, возникающих вследствие наложения сигналов, для достижения высокой точности местоопределения необходимо проводить обработку многократных наблюдений [2, 3]. При этом характер движения объектов в общем случае является маневрирующим, что приводит к необходимости учета изменения не только угловых координат источников радиоизлучения (ИРИ), но и частот их сигналов вследствие эффекта Доплера. Возможность оценивания координат неподвижного ИРИ

---

✉ Кирсанов Эдуард Александрович  
e-mail: [ekir74@mail.ru](mailto:ekir74@mail.ru)



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

по измерениям частоты в многопозиционной радиосистеме (МРС) с подвижными приемными пунктами рассматривалась в [4–7]. В [8–10] рассматривалась задача слежения за движущейся целью по частотным измерениям, но без учета возможности пропуска или появления аномальных наблюдений. Представляет интерес синтез алгоритма фильтрации частоты и декартовых координат подвижного ИРИ в МРС с неподвижными приемными пунктами по измерениям частоты и угловых координат ИРИ в условиях наличия пропусков и аномальных наблюдений.

Целью настоящей работы является решение задачи синтеза и анализа алгоритма фильтрации частоты и декартовых координат маневрирующего объекта в трехмерном пространстве по многократным угломерным наблюдениям в условиях наличия потерь первичной информации на основе методов марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации в дискретном времени [11].

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

### 1. Математическая модель процесса обработки информации

Пусть задана прямоугольная область ответственности МРС  $D = \{(X, Y, Z) | X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}, Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}\}$  и векторы координат обнаружителей-пеленгаторов (ОП)  $\mathbf{x}_{p_i} = (X_{p_i}, Y_{p_i}, Z_{p_i})^T$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $M$  — количество ОП.

Для синтеза алгоритмов фильтрации необходимо задать уравнения состояний и наблюдений. Согласно [12], уравнение для вектора состояния подвижного ИРИ  $\mathbf{x}_k^{(p)} = (f, X_k, V_{xk}, Y_k, V_{yk}, Z_k, V_{zk})^T$  размерностью  $m_p = 7$ , включающего истинную частоту ( $f$ ), декартовы координаты  $(X_k, Y_k, Z_k)$  и проекции скорости  $(V_{xk}, V_{yk}, V_{zk})$  ИРИ в трехмерном пространстве, можно представить в виде

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_{k+1} \mathbf{x}_k + \mathbf{g}_{k+1} \mathbf{u}_k, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{f}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_{k+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \tau^2 / 2 & 0 & 0 \\ \tau & 0 & 0 \\ 0 & \tau^2 / 2 & 0 \\ 0 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & \tau^2 / 2 \\ 0 & 0 & \tau \end{bmatrix},$$

$\mathbf{u}_k = (u_{xk}, u_{yk}, u_{zk})^T$  — вектор возмущающих воздействий с нулевым средним  $\mathbf{M}[\mathbf{u}_k] = 0$  и ковариационной матрицей  $\mathbf{M}[\mathbf{u}_k^T \mathbf{u}_k] = \mathbf{q}_k$ ,  $\tau$  — интервал времени между шагами наблюдения. Элементы вектора возмущающих воздействий имеют размерность ускорения.

В результате решения на  $k$ -м шаге наблюдения задачи обнаружения — оценивания с выходов радиоприемных устройств обнаружителей-пеленгаторов поступают измеренные значения частоты, азимута и угла места ИРИ. При отсутствии ошибок измерения оценки частоты связаны с координатами ИРИ и пеленгаторов следующей зависимостью [5, 6]

$$f_i = h_{f_i}(\mathbf{x}_k) = f \left( 1 - \frac{(X_k - X_{p_i})V_{xk} + (Y_k - Y_{p_i})V_{yk} + (Z_k - Z_{p_i})V_{zk}}{c \sqrt{(X_k - X_{p_i})^2 + (Y_k - Y_{p_i})^2 + (Z_k - Z_{p_i})^2}} \right),$$

$$i = \overline{1, M}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света, а оценки азимутов и углов места — зависимостями

$$\alpha_i = h_{\alpha_i}(\mathbf{x}_k) = \arctg \left\{ \frac{X_k - X_{p_i}}{Y_k - Y_{p_i}} \right\},$$

$$\beta_i = h_{\beta_i}(\mathbf{x}_k) = \arctg \left\{ \frac{Z_k - Z_{p_i}}{\sqrt{(X_k - X_{p_i})^2 + (Y_k - Y_{p_i})^2}} \right\},$$

$$i = \overline{1, M}, \quad (3)$$

показаны на рис. 1, где показано взаимное расположение ИРИ и  $i$ -го пеленгатора, размещенного в начале координат.

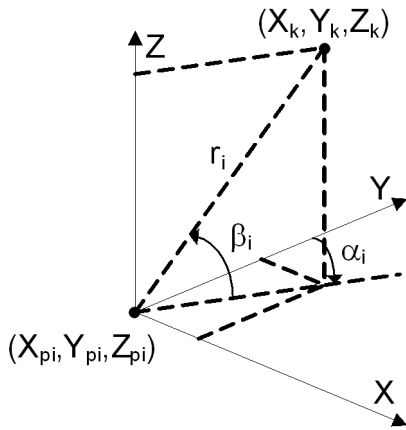


Рис. 1. Геометрия системы местоопределения  
[Fig. 1. Geometry of the positioning system]

Уравнение для  $nM$ -мерного вектора наблюдений  $\mathbf{z}_k = (\mathbf{z}_{1k}^T, \dots, \mathbf{z}_{Mk}^T)^T$  ( $n=3$  — размерность вектора наблюдений  $\mathbf{z}_{ik} = (\hat{f}_i, \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i)^T$  одного ОП,  $i=1, M$ ), имеет вид

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{A}_k(\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k) + \mathbf{B}_k(\hat{\mathbf{z}}_{k/k-1} + \mathbf{w}_k) + \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{z}}_{k/k-1}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}_k = \text{diag}\{A_{1k}\mathbf{I}_n, \dots, A_{Mk}\mathbf{I}_n\}$ ,  
 $\mathbf{B}_k = \text{diag}\{B_{1k}\mathbf{I}_n, \dots, B_{Mk}\mathbf{I}_n\}$ ,  
 $\mathbf{C}_k = \text{diag}\{C_{1k}\mathbf{I}_n, \dots, C_{Mk}\mathbf{I}_n\}$ ,  
 $\mathbf{A}_k + \mathbf{B}_k + \mathbf{C}_k = \mathbf{I}_{nM}$ ,  $\mathbf{I}_A$  — единичная матрица размером  $A \times A$ ,  $A_{ik}$ ,  $B_{ik}$ ,  $C_{ik}$  принимают значения 0 или 1 и отражают факт получения от  $i$ -го ОП нормальных (полезных) ( $A_{ik}=1$ ), аномальных (ложных) ( $B_{ik}=1$ ) оценок азимута и угла места или пропуска (неполучения) ( $C_{ik}=1$ ) наблюдений,  $i=1, M$ ;  $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) = (\mathbf{h}_{1k}(\mathbf{x}_k)^T, \dots, \mathbf{h}_{Mk}(\mathbf{x}_k)^T)^T$  — вектор-функция преобразования вектора состояния в вектор наблюдений,  $\mathbf{h}_{ik}(\mathbf{x}_k) = (h_{f_i}(\mathbf{x}_k), h_{\alpha_i}(\mathbf{x}_k), h_{\beta_i}(\mathbf{x}_k))^T$ ,  $i=1, M$ ;  $\mathbf{v}_k$  — вектор гауссовских шумов нормального измерения с нулевым средним и матрицей ковариации  $M[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] = \text{diag}\{\mathbf{R}_{1k}, \dots, \mathbf{R}_{Mk}\} = \mathbf{R}_k$ ,  $\mathbf{R}_{ik} = \text{diag}(\sigma_{f_i}^2, \sigma_{\alpha_i}^2, \sigma_{\beta_i}^2)$ ;  $\mathbf{w}_k$  — вектор шумов аномального измерения с нулевым средним и ковариационной матрицей  $M[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] = \mathbf{S}_k$ ,  $\mathbf{S}_k \gg \mathbf{R}_k$ ;  
 $\hat{\mathbf{z}}_{k/k-1} = (\hat{\mathbf{z}}_{1k/k-1}^T, \dots, \hat{\mathbf{z}}_{Mk/k-1}^T)^T$  — экстраполированное значение вектора наблюдения,  $\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$  — экстраполированное значение вектора состояния. При фиксации пропуска наблюдения

$i$ -го ОП  $\mathbf{z}_{ik}$  экстраполируется, то есть доопределяется вектором  $\hat{\mathbf{z}}_{ik/k-1}$ .

Начальная оценка вектора состояния и ее ковариационной матрицы может задаваться исходя из априорной информации

$$\hat{\mathbf{x}}_k = ((f_{\max} + f_{\min})/2, (X_{\max} + X_{\min})/2, 0, (Y_{\max} + Y_{\min})/2, 0, (Z_{\max} + Z_{\min})/2, 0)^T,$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k = \text{diag}\{(f_{\max} - f_{\min})^2/12, (X_{\max} - X_{\min})^2/12, D_{V_x}, (Y_{\max} - Y_{\min})^2/12, D_{V_y}, (Z_{\max} - Z_{\min})^2/12, D_{V_z}\}, \quad (5)$$

где  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  — минимальное и максимальное значения частоты сигнала ИРИ,  $D_{V_x}$ ,  $D_{V_y}$ ,  $D_{V_z}$  — априорные дисперсии проекций скорости.

Экстраполированная на следующий шаг оценка вектора состояния и ее ковариационная матрица определяются как

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \mathbf{f}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1},$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} = \mathbf{f}_k \hat{\mathbf{P}}_{k-1} \mathbf{f}_k^T + \mathbf{g}_k \mathbf{q}_{k-1} \mathbf{g}_k^T, \quad (6)$$

а экстраполированное значение вектора наблюдения и его ковариационная матрица определяются как

$$\hat{\mathbf{z}}_{k/k-1} = \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}),$$

$$\mathbf{C}_{k/k-1} = \mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} \mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})^T + \mathbf{R}_k, \quad (7)$$

где  $\mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_k(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}}$  — матрица частных производных.

## 2. Синтез алгоритмов оценивания

Фильтрация вектора состояния осуществляется на основе условно-линейного по отношению к пропускам наблюдений фильтра в соответствии с выражениями [2, 3]

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{W}_k \Delta \mathbf{z}_k, \quad \mathbf{W}_k = \mathbf{V}_k [\mathbf{U}_k]^+,$$

$$\mathbf{V}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} \mathbf{H}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})^T \mathbf{P}_{a_k},$$

$$\hat{\mathbf{P}}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k/k-1} - \mathbf{W}_k \mathbf{V}_k^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{a_k} = \text{diag}\{P_{a_{1k}} \mathbf{I}_n, \dots, P_{a_{Mk}} \mathbf{I}_n\},$$

$$P_{a_{gk}} = (1 - C_{gk})(1 - P_{an}), \quad g = \overline{1, M},$$

$\mathbf{U}_k = \|\mathbf{U}_{gk}\|$ ,  $\mathbf{U}_{gk} = P_{a_{gk}} \mathbf{C}_{ggk/k-1} + P_{b_{gk}} \mathbf{S}_{ggk}$  при  $g = l$

$$\text{и } \mathbf{U}_{glk} = P_{a_{gk}} P_{d_{lk}} \mathbf{C}_{glk/k-1} + P_{b_{gk}} P_{b_{lk}} \mathbf{S}_{glk} \text{ при } g \neq l,$$

$$g = \overline{1, M}, l = \overline{1, M}, P_{b_{gk}} = (1 - C_{gk}) P_{an},$$

где  $\Delta \mathbf{z}_k$  — невязка текущего  $\mathbf{z}_k$  и экстраполированного  $\hat{\mathbf{z}}_{k/k-1}$  наблюдений, вычисляемая с учетом цикличности угловых координат;  $^+$  — псевдообращение;  $P_{an}$  — вероятность получения аномального наблюдения.

Если из уравнений состояния и наблюдения убрать частоту, с соответствующей корректировкой матрицы частных производных, то из (8) получим условно-линейный фильтр декартовых координат ИРИ только по измеренным значениям азимутов и углов места. Если в указанном фильтре вероятности пропуска наблюдения и получения аномального наблюдения положить равными нулю ( $P_{pn} = 0$  и  $P_{an} = 0$ ), то условно-линейный фильтр (УЛФ) становится традиционным расширенным фильтром Калмана (РФК) декартовых координат ИРИ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренные варианты фильтров сравнивались между собой. На рис. 2 приведены полученные по результатам 10000 испытаний зависимости средней квадратичной ошибки (СКО) вычисления местоположения ИРИ ( $R_{ск}$ ) от шага наблюдения ( $N_s$ ) для различного количества пеленгаторов ( $M = 2, 3, 4, 5$ ). Кривые 1 соответствуют расширенному фильтру Калмана декартовых координат ИРИ, кривые 2 — условно-линейному фильтру декартовых координат ИРИ, кривые 3 — условно-линейному фильтру частоты и декартовых координат ИРИ. Указанные зависимости получены при одинаковых для всех пеленгаторов значениях нормальных ошибок измерения частоты  $\sigma_f = 0,1$  кГц, ошибок измерения пеленга и угла места  $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = 2$  градуса (значения аномальных ошибок превышали значения нормальных в 10 раз), интер-

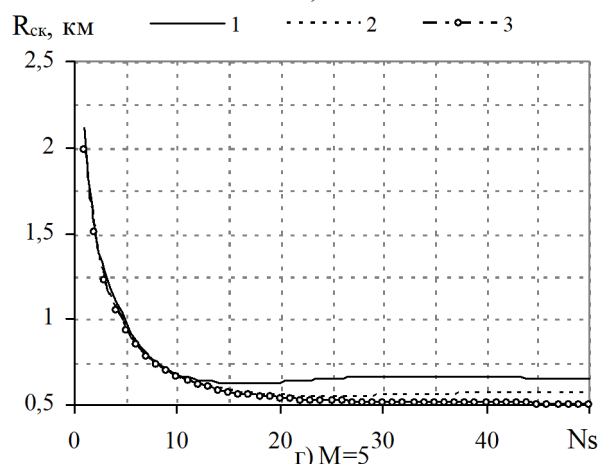
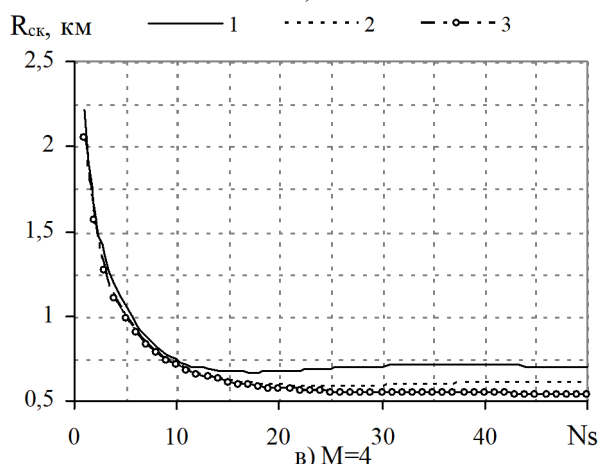
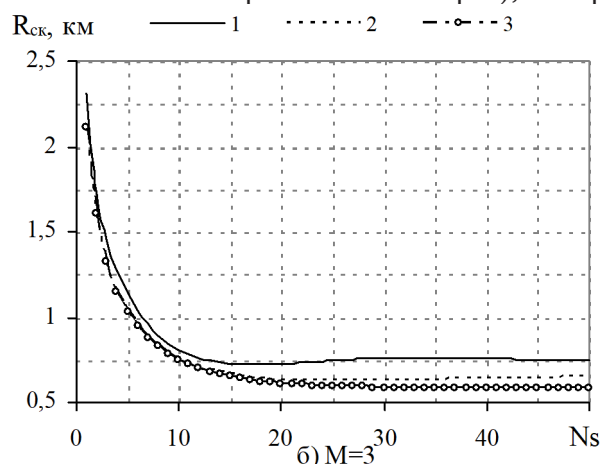
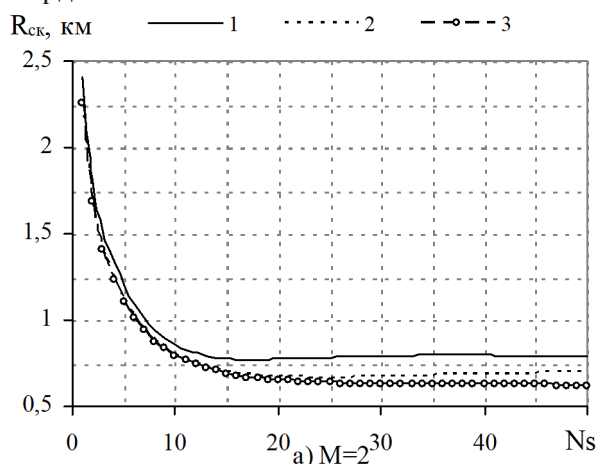


Рис. 2. Зависимости СКО вычисления местоположения ИРИ от шага наблюдения [Fig. 2. Dependence of the mean squared error of the calculation of the location of the radio source on the observation step]

вале дискретизации времени между шагами наблюдения  $\tau = 1$  секунда, минимальном и максимальном значениях скорости цели соответственно  $V_{\min} = 0,04$  и  $V_{\max} = 0,05$  км/с, максимальном значении ускорения объекта  $a_{\max} = 0,01$  км/с<sup>2</sup>. Размер области ответственности МРС задавался равным  $10 \times 10 \times 10$  км. Минимальное и максимальное значения частоты сигнала ИРИ задавались равными  $f_{\min} = 1990$  и  $f_{\max} = 2000$  МГц. Были приняты значения вероятности пропуска (неполучения) наблюдения  $P_{pn} = 0,05$  и вероятности получения аномального наблюдения  $P_{an} = 0,05$ .

При этом начальные значения дисперсий скоростей объекта вычислялись как

$$D_{V_x} = (V_{\max}^2 + V_{\max} V_{\min} + V_{\min}^2) / 12,$$

$$D_{V_y} = (V_{\max}^2 + V_{\max} V_{\min} + V_{\min}^2) / 12,$$

$$D_{V_z} = (V_{\max}^2 + V_{\max} V_{\min} + V_{\min}^2) / 6,$$

а СКО ускорения объекта как

$$\sigma_a = a_{\max} \sqrt{1/3} \text{ км/с}^2.$$

Анализ полученных результатов свидетельствует о преимуществе учитывающего возможность получения аномальных наблюдений УЛФ перед традиционным РФК декартовых координат ИРИ. Так, использование УЛФ декартовых координат ИРИ вместо РФК в трехпозиционной МРС позволяет на 30 шаге фильтрации уменьшить ошибку местоопределения на 17 %, а использование в тех же условиях УЛФ частоты и декартовых координат ИРИ позволяет уменьшить ошибку местоопределения на 23 % по отношению к РФК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе проведен сравнительный анализ алгоритмов оценивания координат маневрирующего объекта в трехмерном пространстве по многократным угломерным или частотно-угломерным наблюдениям в условиях наличия потерь первичной информации на основе традиционного расширенного фильтра Калмана и условно-линейных фильтров. Показано преимущество условно-линейного фильтра, осуществляющего обработку частотно-угломер-

ных наблюдений, позволяющего отслеживать не только траекторию движения маневрирующего объекта, но и изменение частоты сигнала ИРИ вследствие эффекта Доплера.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев, В. И.* Нейросетевые и статистически оптимальные алгоритмы оценки координат источников радиоизлучения в многопозиционных радиосистемах / В. И. Афанасьев, Э. А. Кирсанов, А. А. Сирота // Радиотехника. – 2003. – № 10. – С. 87–91.

2. *Радзиевский, В. Г.* Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – Москва : Радиотехника, 2004. – 352 с.

3. *Кирсанов, Э. А.* Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы / Э. А. Кирсанов, А. А. Сирота. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 344 с.

4. *Мельников, Ю. П.* О беспеленговых методах позиционирования летательных аппаратов относительно источников излучения / Ю. П. Мельников, С. В. Попов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1991. – № 6. – С. 8–14.

5. *Тисленко, В. И.* Оценка местоположения наземного источника радиоизлучения в космической системе с измерениями частоты сигналов / В. И. Тисленко, А. А. Савин // Радиотехника. – 2006. – № 11. – С. 24–30.

6. *Савин, А. А.* Квазиоптимальная оценка координат наземного источника излучения в космической системе с измерениями частоты радиосигналов / А. А. Савин, В. И. Тисленко // Доклады ТУСУРа. – 2006. – № 6. – С. 96–102.

7. Оценка возможности координатометрии источника радиоизлучения подвижным приемником на основе эффекта Доплера / Козирацкий А. Ю. [и др.] // Радиотехника. – 2017. – № 9. – С. 64–67.

8. Chan, Y. T. Target localization and tracking from Doppler-shift measurements / Y. T. Chan, F. L. Jardine // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1990. – № 3. – P. 251–257. DOI: 10.1109/48.107154

9. A new approach for Doppler-only target tracking / Battistelli G. [et al.] // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. – IEEE, 2013. – P. 1616–1623.

10. Networked target tracking with Doppler sensors / Battistelli G. [et al.] // IEEE Transac-

tions on Aerospace and Electronic Systems. – 2015. – No 4. – P. 3294–3306. DOI: 10.1109/TAES.2015.140340

11. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – Москва : Радио и связь, 2004. – 608 с.

12. Информационные технологии в радиотехнических системах / В. А. Васин [и др.]; под ред. И. Б. Федорова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 846 с.

**Кирсанов Эдуард Александрович** — д-р техн. наук, проф., начальник кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
E-mail: ekir74@mail.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2079-5333>

**Колесников Сергей Анатольевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
E-mail: kolesnikov\_2004@mail.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4234-2223>

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2020.1/2592>

ISSN 1995-5499

Received 20.11.2019

Accepted 15.03.2020

## FILTRING OF COORDINATES OF A MANEUVERING OBJECT IN THREE-DIMENSIONAL SPACE BASED ON FREQUENCY AND GONIOMETRIC MEASUREMENTS

© 2020 E. A. Kirsanov✉, S. A. Kolesnikov

*Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin  
54 «А», Starykh Bol'shevikov Srt., 394064 Voronezh, Russian Federation*

**Abstract.** The Markov theory of discrete-time nonlinear filtering was used to develop and analyse filtering algorithms for the Cartesian coordinates and for the frequency and Cartesian coordinates of a manoeuvring object. The filtering is performed by a multiposition radio-location system in three-dimensional space, using goniometric measurements and frequency and goniometric measurements respectively, and taking into account the non-detection probability and outlying observations. The maximum set of the state vector components of a mobile radio emission source includes the frequency, the Cartesian coordinates, and projections of speed in three-dimensional space. The maximum set of the observation vector components contains the measured values of frequency, azimuth and elevation of the radio emission source. The measurement data comes from the output ends of the radio-receiving devices in the radio direction finders of the multiposition radio-location system. The observation vector takes into account

✉ Kirsanov Eduard A.  
e-mail: ekir74@mail.ru

the possibility of receiving abnormal measurements. When the signal is lost, the data from the corresponding radio direction finder is extrapolated. The filtering of the state vector is based on a quasi-linear filter of the lost signals. The initial estimate of the state vector and its covariance matrix can be set using the a priori information. The suggested method takes into account the changes in the angular coordinates of the manoeuvring radio emission source, as well as the changes in the frequency of its signal occurring due to the Doppler effect, which results in significantly reduced positioning errors as compared to the extended Kalman filter.

**Keywords:** manoeuvring objects, Markov filtering, filtering of coordinates, Doppler effect.

### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

### REFERENCES

1. *Afanasiev V. I., Kirsanov E. A., Sirota A. A.* Neural Network and statistically optimal algorithms for estimating the coordinates of radio emission sources in multi-position radio systems. *Radio Engineering*. 2003. No. 10. P. 87–91.
2. *Radziyevsky V. G., Sirota A. A.* Theoretical foundations of electronic intelligence. Moscow : *Radio Engineering*, 2004. – 352 p.
3. *Kirsanov E. A., Sirota A. A.* Information processing in spatially distributed radio monitoring systems: statistical and neural network approaches. Moscow : FIZMATLIT, 2012. 344 p.
4. *Melnikov Y. P., Popov S. V.* On non-directional methods for positioning aircraft relative to radiation sources. *Foreign Radioelectronics. Successes of modern radio electronics*. 1991. No. 6. P. 8–14.
5. *Tislenko V. I., Savin A. A.* Estimation of the location of a ground source of radio emission in a space system with measurements of the signal frequency. *Radio Engineering*. 2006. No. 11. P. 24–30.
6. *Savin A. A., Tislenko V. I.* Quasi-optimal estimation of the coordinates of a ground source of radiation in a space system with measurements of the frequency of radio signals. *Reports of TUSUR*. 2006. No. 6. P. 96–102.
7. *Koziratsky A. Y. [et al.]* Evaluation of the possibility of coordinating radio sources with a mobile receiver based on the Doppler effect. *Radio Engineering*. 2017. No. 9. P. 64–67.
8. *Chan Y. T., Jardine F. L.* Target localization and tracking from Doppler-shift measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. No 3. P. 251–257. DOI: 10.1109/48.107154
9. *Battistelli G. [et al.]* A new approach for Doppler-only target tracking. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*. IEEE, 2013. P. 1616–1623.
10. *Battistelli G. [et al.]* Networked target tracking with Doppler sensors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2015. No 4. P. 3294–3306. DOI: 10.1109/TAES.2015.140340
11. *Tikhonov V. I., Kharisov V. N.* Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow : *Radio and communications*, 2004. 608 p.
12. *Vasin V. A. [et al.]* Information technology in radio engineering systems; under the editorship of I. B. Fedorov. Moscow : Publishing house of N. E. Bauman MSTU, 2011. 846 p.

**Kirsanov Eduard A.** — DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

E-mail: [ekir74@mail.ru](mailto:ekir74@mail.ru)

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2079-5333>

**Kolesnikov Sergei A.** — PhD in Technical Sciences, Researcher, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin (Voronezh).

E-mail: [kolesnikov\\_2004@mail.ru](mailto:kolesnikov_2004@mail.ru)

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4234-2223>