

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАПРАВЛЕННОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ

С.Н. Данилов, А.П. Пудовкин

*Кафедра «Радиоэлектронные средства бытового назначения»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; resbn@jesbytst.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко*

**Ключевые слова и фразы:** летательный аппарат; модель движения; область неопределенности; пространственная ориентация; система связи; угловые координаты.

**Аннотация:** На основе использования данных об ориентации летательного аппарата синтезирован алгоритм оценки и прогноза координат воздушных объектов для обеспечения функционирования системы направленной связи в диапазоне сверхвысоких частот, и оценены характеристики его точности.

---

### Введение

Алгоритмы обеспечения направленной связи с несколькими летательными аппаратами (ЛА) в интересах передачи команд и обмена телеметрическими сообщениями и другой информацией требуют оценки координат и прогноза положения ЛА на следующий сеанс связи [1].

Известно, что обработка координатной информации в соответствии с тем или иным алгоритмом производится по следующей схеме: оценка вектора состояния и прогноз его изменения, сравнение оптимального выходного эффекта фильтра с реально наблюдаемым и коррекция вектора состояния на основе заданного критерия.

Модель состояния, включающая уравнения состояния, наблюдения и статистические характеристики шумов, обычно неадекватна реальному изменению координат цели при маневрах [2]. Это происходит как из-за плохого знания характеристик системы (априорная неопределенность), так и из-за преднамеренного упрощения уравнений системы с целью уменьшения объема вычислений, необходимых для реализации фильтра. Так как задача сопровождения цели решается, как правило, в условиях априорной неопределенности, то кроме оценивания вектора состояния необходимо параллельно производить оценку неизвестных параметров системы и фильтра, таких как неизвестные элементы ковариационных матриц шума системы и ошибок измерения.

Оценку поведения ЛА при маневре можно основывать на том, что ее кинематические параметры (скорость, ускорение) коррелированы во времени. Но обычно прием ответного сигнала дает возможность измерять только координаты ЛА (дальность, углы азимута и места). К тому же из-за того, что время задержки сигнала в ответчике точно не известно ошибка измерения времени задержки велика.

Для того чтобы улучшить точность оценки координат маневрирующего ЛА на основе оценки его ускорения, необходимо знать кинематические характеристики: скорость  $v_{\text{ЛА}}$ ; угол наклона траектории  $\theta_{\text{ЛА}}$ ; путевой угол  $\varphi_{\text{ЛА}}$ . Использование этих характеристик основано на довольно жесткой связи между ориентацией цели и ее ускорением [3, 4].

Таким образом, характеристики рассматриваемой системы связи могут быть дополнительно улучшены за счет использования передаваемой по этой или другой линии связи ЛА координатной информации.

### Исходные модели состояния и наблюдения

В настоящее время в алгоритмах фильтрации используется модель, основанная на предположении, что ЛА движется по прямой с постоянной скоростью. Однако способность ЛА к маневрированию делает перечисленные алгоритмы непригодными для точного слежения из-за несоответствия модели реальности.

Для маневрирующих ЛА модели состояния для угломерного канала должны учитывать эволюции бортовых пеленгов  $\varphi_r$  и  $\varphi_v$ , угловой скорости линии визирования и нормального ускорения [5]. Использование ускорений обусловлено необходимостью учета маневров ЛА в процессе экстраполяции.

Таким образом, модель состояния для угломерного канала может иметь вид:

$$\begin{cases} \varphi(k+1) = \varphi(k) + \omega(k)T - \hat{\omega}_\psi(k)T; \\ \omega(k+1) = a\omega(k) + bj_h(k)T; \\ j_h(k+1) = (1 - \alpha T)j_h(k) + \xi_j(k), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi$  – пеленг ЛА;  $\omega$  – угловая скорость линии визирования;  $\hat{\omega}_\psi$  – данные об угловой скорости курса ЛА;  $a < 1$  и  $b < 1$  – постоянные коэффициенты;  $j_h$  – данные о поперечном ускорении ЛА;  $\xi_j$  – формирующий шум с гауссовской плотностью вероятности,  $\xi_j \sim N[\xi_j | 0, \mathbf{R}]$ ;  $\alpha$  – величина, обратная средней длительности маневра;  $T$  – шаг по времени;  $k$  – номер шага.

Состав и тип измерителей, применяемых для формирования оценок координат, определяются исходя из необходимости выполнения условий наблюдаемости, обеспечения устойчивости формирования оценок, помехозащищенности. Для выполнения условий наблюдаемости должна измеряться величина наименьшей производной вектора состояния. Для угломерного канала это угол – пеленг ЛА.

Рассмотрим возможность оценки нормального ускорения на основе данных об ориентации ЛА в пространстве, полученных по линии связи в виде углов крена  $\gamma$ , тангажа  $\psi$  и курса  $\varphi$ .

Оценку маневра ЛА рассмотрим при следующих допущениях:

- вектор скорости цели  $v_{\text{ЛА}}$  совпадает с осью ЛА;
- во время маневра скорость по величине изменяется медленно  $v_{\text{ЛА}} \rightarrow 0$ .

Определим нормальную составляющую ускорения в горизонтальной плоскости как основной плоскости при маневрировании относительно точки наблюдения. Для нормального к линии визирования направления ускорение ЛА можно будет найти на основе выражения [3]:

$$j_h = v_{\text{ЛА}}[\dot{\vartheta} \sin \vartheta \sin \theta + \dot{\theta} \cos \vartheta \cos \theta]; \quad (2)$$

$$\theta = \psi - \varepsilon_r. \quad (3)$$

Таким образом, уравнения наблюдения для угломерного канала будут иметь вид:

$$\begin{cases} z_1(k) = \varphi(k) + \eta_\varphi(k); \\ z_2(k) = j_h(k) + \eta_j(k). \end{cases} \quad (4)$$

### Алгоритм фильтрации и экстраполяции

Используя алгоритмы калмановской фильтрации на основе разработанных моделей, можно получить:

$$\hat{\varphi}(k+1) = \hat{\varphi}(k) + \hat{\omega}(k)T - \hat{\omega}_\psi(k)T + \mathbf{K}_{11}(k)v_1(k) + \mathbf{K}_{12}(k)v_2(k); \quad (5)$$

$$\hat{\omega}(k+1) = a\hat{\omega}(k)T - b\hat{j}_h(k)T + \mathbf{K}_{21}(k)v_1(k) + \mathbf{K}_{22}(k)v_2(k); \quad (6)$$

$$\hat{j}_h(k+1) = (1 - \alpha T)\hat{j}_h(k)T + \mathbf{K}_{31}(k)v_1(k) + \mathbf{K}_{32}(k)v_2(k); \quad (7)$$

$$v_1(k) = z_1(k) - (\hat{\varphi}(k) + \hat{\omega}(k)T); \quad (8)$$

$$v_2(k) = z_2(k) - (1 - \alpha T)\hat{j}_h(k); \quad (9)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k))^{-1}; \quad (10)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{P}(k)(\mathbf{\Phi}(k))^T + \mathbf{Q}(k); \quad (11)$$

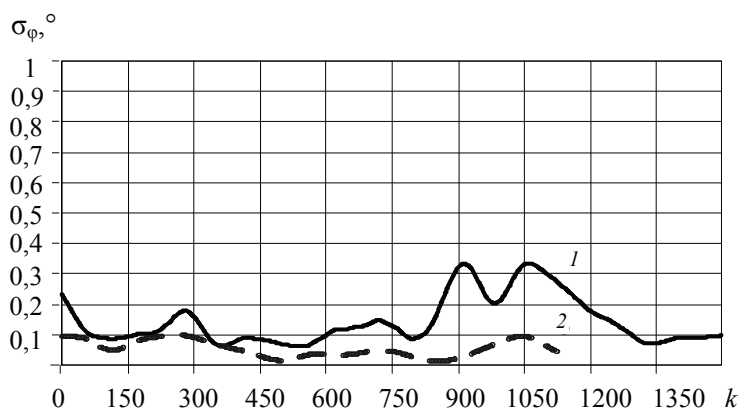
$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H})\mathbf{P}(k|k-1), \quad (12)$$

где  $\mathbf{K}(k)$  – матрица коэффициентов передачи дискретного фильтра;  $\mathbf{P}(k|k-1)$  и  $\mathbf{P}(k)$  – априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок фильтрации соответственно;  $\mathbf{R}(k)$  и  $\mathbf{Q}(k)$  – матрицы дисперсий возмущений и измерений;  $\mathbf{\Phi}$  и  $\mathbf{H}$  – матрицы состояния и наблюдения;  $v_i(k)$  – невязка.

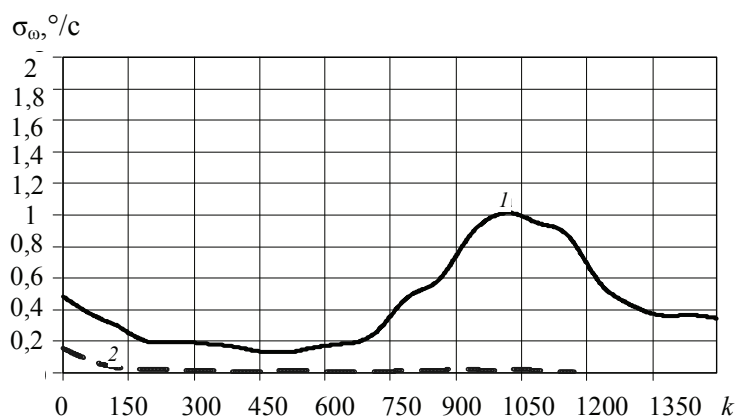
### Численное моделирование

Исследование производилось путем моделирования алгоритма (4) – (12) на примере реализации последовательных сеансов связи с одним ЛА при условии, что он совершает маневр «змейка» (с 800 по 1200 шаг). На рис. 1 показаны зависимости среднеквадратической ошибки фильтрации пеленга  $\sigma_\varphi$ , угловой скорости линии визирования  $\sigma_\omega$ , нормального ускорения  $\sigma_{j_h}$  от времени дискретизации для двух случаев. В первом использовался фильтр при измерении только пеленга ЛА, во втором – измерялся пеленг, и оценивалось нормальное ускорение.

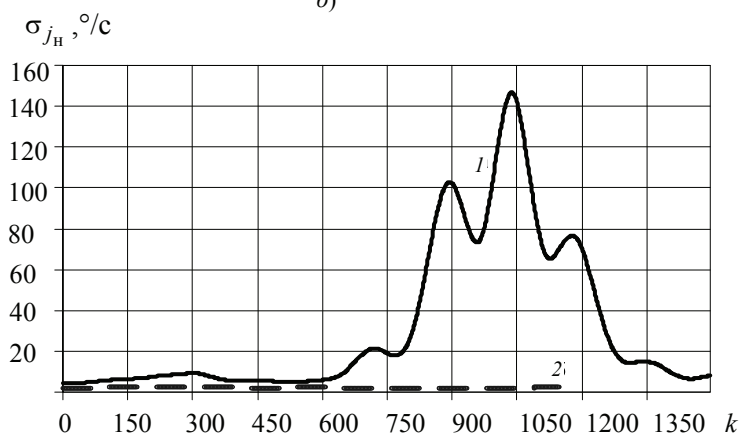
Как видно из рис. 1 в первом случае, при совершении ЛА маневра, оценка пеленга, угловой скорости линии визирования и нормального ускорения происходит с большими ошибками; во втором случае – при использовании информации о пространственной ориентации, оценка фазовых координат ЛА производится во время маневра со значительно меньшими ошибками.



a)



б)



в)

**Рис. 1. Ошибка фильтрации нормального ускорения :**

*1* –  $j_n$  не измерялось; *2* –  $j_n$  измерялось;

*a* –  $\sigma_\phi$ ; *б* –  $\sigma_\omega$ ; *в* –  $\sigma_{j_n}$

## Заключение

Таким образом, использование информации о пространственной ориентации позволяет значительно увеличить точность оценки и экстраполяции координат интенсивно маневрирующего ЛА. Это, в конечном итоге, приводит к повышению эффективности системы направленной связи при решении задач управления ЛА.

### Список литературы

1. Вотановский, В.И. Аппаратура цифровой обработки информации и управления изделия 46И6 / В.И. Вотановский, К.А. Климов, Н.П. Рак. – Тамбов : Изд-во Тамб. высш. авиацион. инженерн. ин-та, 2004. – 55 с.
2. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей : пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
3. Данилов, С.Н. Сопровождение маневренной цели при использовании датчиков ориентации в качестве индикаторов состояния / С.Н. Данилов // Авиакосм. приборостроение. – 2005. – № 7. – С. 6–10.
4. Данилов, С.Н. Методы повышения адекватности моделей с целью улучшения качества сопровождения маневренной воздушной цели / С.Н. Данилов // Информац.-измер. и управляющие системы. – 2007. – Т. 5, № 6. – С. 42–52.
5. Меркулов, В.И. Радиоэлектронные системы управления летательными аппаратами. Состояние и перспективы развития / В.И. Меркулов // Зарубеж. радиоэлектроника. Успехи соврем. радиоэлектроники. – 1997. – № 3. – С. 35–50.

---

## Algorithm for Evaluation and Forecast of Air Object Coordinates for Maintenance of Direct Communication System Using Data on Spatial Orientation

S.N. Danilov, A.P. Pudovkin

*Department "Radio-Electronic Systems of Household Purpose", TSTU;  
resbn@jesbytst.ru*

**Key words and phrases:** aircraft; angular coordinates; communication system; motion model; space orientation; uncertainty range.

**Abstract:** On the basis of data on space orientation of aircraft the algorithm of evaluation and forecast of air objects coordinates is synthesized for maintenance of direct communication system in the range of ultrahigh frequencies; the characteristics of its accuracy are estimated.

---

## Algorithmus der Einschätzung und der Prognose der Koordinaten der Luftobjekte für die Versorgung des Funktionierens des Systems der gerichteten Verbindung mit der Nutzung der Angaben über die Raumorientierung

**Zusammenfassung:** Auf Grund der Benutzung der Angaben über die Orientierung des Flugapparates ist der Algorithmus der Einschätzung und der Prognose

der Koordinaten der Luftobjekte für die Versorgung des Funktionierens des Systems der gerichteten Verbindung im Bereich der superhohen Frequenzen syntesiert und es sind die Charakteristiken seiner Genauigkeit bewertet.

---

**L'algorithme du pronostic des coordonnées des objets aériens pour la garantie du fonctionnement du système du lien dirigé c par l'utilisation des données sur l'orientation spatiale**

**Résumé:** Dans l'article à la base de l'utilisation des données sur l'orientation de l'appareil volant on synthétise l'algorithme de l'estimation et le pronostic des coordonnées des objets aériens pour la garantie du fonctionnement du système du lien dirigé dans la gamme des hyperfréquences et on estime les caractéristiques de son exactitude.

---

**Авторы:** *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные средства бытового назначения»; *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные средства бытового назначения», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Карпов Иван Георгиевич* – доктор технических наук, профессор кафедры 25, Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники (Военный институт).

---