

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЦЕЛА\*

А. П. Пудовкин, Ю. Н. Панасюк, И. В. Князев

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
pyunikol@rambler.ru*

**Ключевые слова:** имитационное моделирование; модель наблюдения; модель состояния; радиоэлектронный комбинированный прицел; следящие системы; фильтрация.

**Аннотация:** Предложен алгоритм функционирования дальномерного канала радиоэлектронного комбинированного прицела с учетом информации о пространственном положении цели. Обоснован выбор моделей состояния и наблюдения, проведено имитационное моделирование на ЭВМ и представлены результаты исследования алгоритмов функционирования радиоэлектронного комбинированного прицела.

---

Выбор и обоснование исходных моделей состояния и наблюдения производится с учетом задач, решаемых радиоэлектронным комбинированным прицелом (РЭКП) при автосопровождении и наведении оружия по наземным целям и возможностей современных цифровых вычислительных систем по быстродействию и объему памяти.

Модель состояния траекторий наземных целей должна обеспечивать оптимальное оценивание всех фазовых координат, необходимых для современных и перспективных методов управления оружием по подвижным и неподвижным объектам. Для реализации при сопровождении маневрирующих целей модели состояния должны учитывать не только эволюции дальности  $D$ , скорости сближения  $V$ , пеленга цели  $\varphi_L$ , скорости изменения пеленга  $\omega_{\varphi_L}$ , но и ускорение сближения  $a$ . Ускорение цели по линии визирования относительно РЭКП зависит от положения цели (модуль скорости  $V_{\varphi}$  и путевой угол  $\varphi_{\varphi}$  цели), скорости изменения путевого угла  $\omega_{\varphi_{\varphi}}$ . Для оценки параметров движения цели выбираются [1] траекторная  $O X_T Z_T$  и нормальная  $O X_g Z_g$  системы координат на наземную цель; лучевая  $O X_L Z_L$  и нормальная  $O X_g Z_g$  системы координат в РЭКП (рис. 1).

С учетом рис. 1 получим скорость цели по линии визирования (**ЛВ**)

$$V_{\text{цЛВ}} = V_{\varphi} \cos \varphi_{\varphi} \cos \varphi_L + V_{\varphi} \sin \varphi_{\varphi} \sin \varphi_L. \quad (1)$$

---

\* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах».

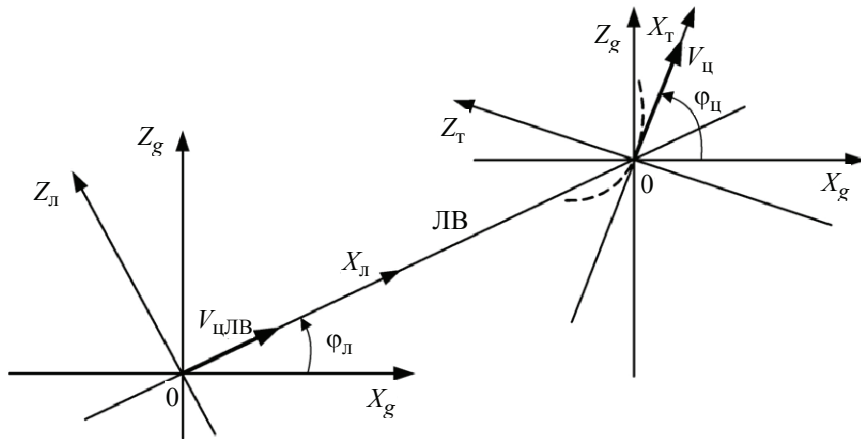


Рис. 1. Система координат

Если взять производную по времени в выражении (1), считая, что модуль  $V_{ц}$  не меняется, получим ускорение цели по ЛВ

$$a_{цЛВ} = V_{ц} (-\sin \varphi_{ц} \cos \varphi_{л} \omega_{\varphi_{ц}} - \cos \varphi_{ц} \sin \varphi_{л} \omega_{\varphi_{л}} + \cos \varphi_{ц} \sin \varphi_{л} \omega_{\varphi_{ц}} + \sin \varphi_{ц} \cos \varphi_{л} \omega_{\varphi_{л}}). \quad (2)$$

После приведения выражения (2), получим

$$a_{цЛВ} = V_{ц} (\omega_{\varphi_{л}} - \omega_{\varphi_{ц}}) \sin(\varphi_{ц} - \varphi_{л}). \quad (3)$$

С учетом (3) можно использовать следующую модель состояния в дискретном времени:

$$D(k+1) = D(k) + V(k)T + 0,5a(k)T^2; \quad (4)$$

$$V(k+1) = V(k) + a(k)T; \quad (5)$$

$$a(k+1) = V_{ц} (\omega_{\varphi_{л}} - \omega_{\varphi_{ц}}) \sin(\varphi_{ц} - \varphi_{л}); \quad (6)$$

$$\varphi_{ц}(k+1) = \varphi_{ц}(k) + \omega_{\varphi_{ц}}(k)T; \quad (7)$$

$$\omega_{\varphi_{ц}}(k+1) = (1 - \alpha T)\omega_{\varphi_{ц}}(k) + \xi_{\omega_{\varphi_{ц}}}(k); \quad (8)$$

$$\varphi_{л}(k+1) = \varphi_{л}(k) + \omega_{\varphi_{л}}(k)T; \quad (9)$$

$$\omega_{\varphi_{л}}(k+1) = (1 - \alpha T)\omega_{\varphi_{л}}(k) + \xi_{\omega_{\varphi_{л}}}(k), \quad (10)$$

где  $k$  – номер дискрета времени;  $T$  – период дискретизации;  $\alpha$  – постоянная маневра.

Состав и вид измерителей, используемых для формирования оценок фазовых координат, определяется из необходимости условий наблюдаемости [2], а также обеспечения устойчивости формирования оценок:

$$D_{и}(k) = D(k) + \xi_{ди}(k); \quad (11)$$

$$\varphi_{ц}(k) = \varphi_{ц}(k) + \xi_{\varphi_{ци}}(k); \quad (12)$$

$$\varphi_{л}(k) = \varphi_{л}(k) + \xi_{\varphi_{ли}}(k), \quad (13)$$

в которых  $\xi_{ди}$ ,  $\xi_{\varphi_{ци}}$ ,  $\xi_{\varphi_{ли}}$  – дискретные центрированные гауссовские шумы измерений с известными дисперсиями  $D_{ди}$ ,  $D_{\varphi_{ци}}$  и  $D_{\varphi_{ли}}$ .

Алгоритмы функционирования фильтров сопровождения зависят от модели состояния и наблюдения. На основании модели состояния (4) – (10) и модели наблюдения (11) – (13) и с учетом выражений нелинейной фильтрации [1 – 3], получен следующий рекуррентный алгоритм первого порядка:

$$D_o(k) = D_o(k) + K_{\phi 11}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 12}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 13}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (14)$$

$$V_o(k) = V_o(k) + K_{\phi 21}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 22}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 23}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (15)$$

$$a_o(k) = a_o(k) + K_{\phi 31}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 32}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 33}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (16)$$

$$\varphi_{\text{ло}}(k) = \varphi_{\text{лэ}}(k) + K_{\phi 41}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 42}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 43}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (17)$$

$$\omega_{\varphi_{\text{ло}}}(k) = \omega_{\varphi_{\text{лэ}}}(k) + K_{\phi 51}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 52}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 53}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (18)$$

$$\varphi_{\text{цо}}(k) = \varphi_{\text{цэ}}(k) + K_{\phi 61}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 62}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 63}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (19)$$

$$\omega_{\varphi_{\text{цо}}}(k) = \omega_{\varphi_{\text{цэ}}}(k) + K_{\phi 71}(k)\Delta D(k) + K_{\phi 72}(k)\Delta\varphi_{\text{л}}(k) + K_{\phi 73}(k)\Delta\varphi_{\text{ц}}(k); \quad (20)$$

$$\Delta D(k) = D_o(k) - D_{\text{и}}(k); \quad (21)$$

$$\Delta\varphi_{\text{л}}(k) = \varphi_{\text{лэ}}(k) - \varphi_{\text{ли}}(k); \quad (22)$$

$$\Delta\varphi_{\text{ц}}(k) = \varphi_{\text{цэ}}(k) - \varphi_{\text{ци}}(k), \quad (23)$$

где  $D_o$ ,  $V_o$ ,  $a_o$ ,  $\varphi_{\text{ло}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{ло}}}$ ,  $\varphi_{\text{цо}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{цо}}}$  – оценки фазовых координат;  $D_{\text{э}}$ ,  $V_{\text{э}}$ ,  $a_{\text{э}}$ ,  $\varphi_{\text{лэ}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{лэ}}}$ ,  $\varphi_{\text{цэ}}$ ,  $\omega_{\varphi_{\text{цэ}}}$  – экстраполированные значения фазовых координат;  $K_{\phi}$  – коэффициент усиления фильтра;  $\Delta D$ ,  $\Delta\varphi_{\text{л}}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{ц}}$  – невязки координат;  $D_{\text{ли}}$ ,  $\varphi_{\text{ли}}$ ,  $\varphi_{\text{ци}}$  – измеренные значения дальности, пеленга и путевого угла цели.

На основании алгоритма (14) – (23) проводилось имитационное моделирование на примере сопровождения одной цели при условии, что цель осуществляет маневр с ускорением по ЛВ (рис. 2). Имитационное моделирование проводилось для двух случаев: в первом случае не измеряется угол  $\varphi_{\text{ц}} = 0$ ; во втором – измеряется угол  $\varphi_{\text{ц}} \neq 0$ .

Результаты моделирования показаны на рис. 3, где представлены графики изменения во времени  $k$  среднеквадратической ошибки оценки фильтрации дальности  $\sigma_d$ , скорости  $\sigma_v$  и ускорения  $\sigma_a$  по ЛВ между радиоэлектронным комбинированным прицелом и целью.

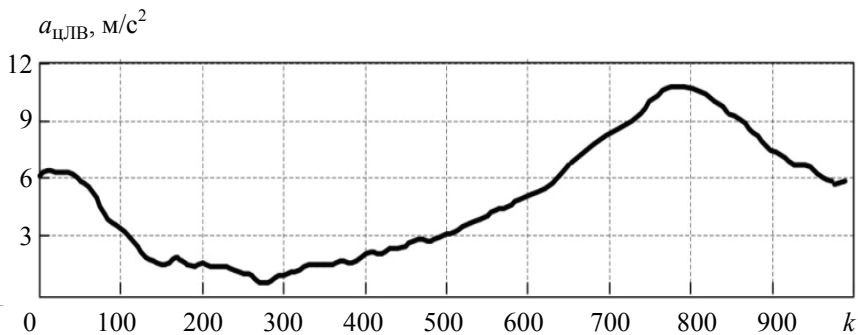
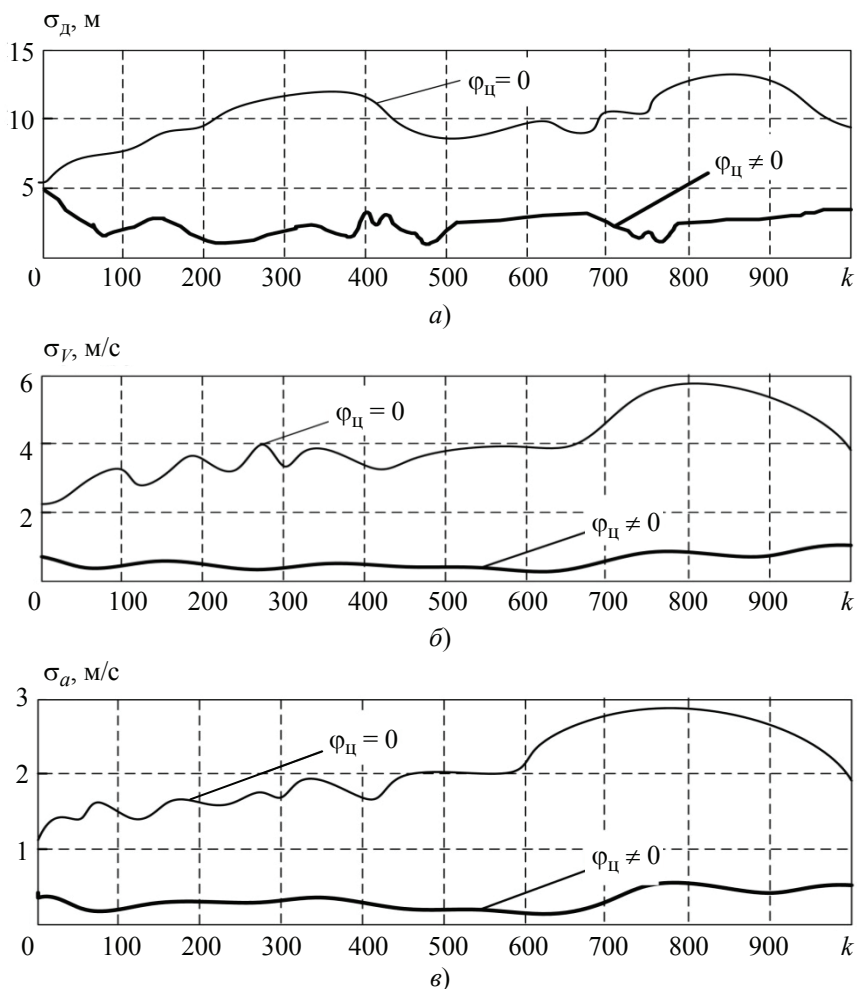


Рис. 2. Изменение ускорения цели по линии визирования



**Рис. 3. Изменение среднеквадратической ошибки:**  
*a* – по дальности; *б* – скорости; *в* – ускорению

Таким образом, синтезированный РЭКП с учетом информации о пространственном положении цели позволяет значительно улучшить точностные характеристики и устойчивость фильтра оценки дальности, скорости, ускорения по сравнению с существующими фильтрами.

#### Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
2. Данилов, С. Н. 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 // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 740 – 745.
3. Ефремов, Р. А. Помехоустойчивость метода передачи данных с модуляцией сменой структуры шумоподобного сигнала при одновременной связи со многими абонентами / Р. А. Ефремов, С. Н. Данилов // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Спец. вып. (52). – С. 37 – 41.

## Synthesis of Algorithms of Radio-Electronic Combined Sight

A. P. Pudovkin, Yu. N. Panasyuk, I. V. Knyazev

*Department of Radio Engineering; TSTU;  
pyunikol@rambler.ru*

**Keywords:** filtration; radio-electronic combined sight; simulation; state model; supervision model; watching systems.

**Abstract:** The algorithm of functioning of the ranging channel of the radio-electronic combined sight taking into account information on the spatial provision of the purpose is described. The choice of models of state and observation is justified; computer simulation was performed; the results of the study of algorithms of functioning of radio-electronic combined sight are presented.

### *References*

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* (Perspective methods of information processing in radio engineering systems), St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p.
2. Danilov S.N., Pudovkin A.P. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 740-745.
3. Efremov R.A., Danilov S.N. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet imeni V. I. Vernadskogo*, 2014, special issue (52), pp. 37-41.

---

## Synthese der Algorithmen des radioelektronischen kombinierten Visieres

**Zusammenfassung:** Es ist den Algorithmus des Funktionierens des Distanzkanals des radioelektronischen kombinierten Visieres mit Rücksicht auf die Information über der Raumlage des Ziels vorgeschlagen. Es ist die Wahl der Modelle des Zustandes und der Beobachtung begründet, es ist die Imitzionsmodellierung auf dem Computer durchgeführt und es sind die Ergebnisse der Untersuchung der Algorithmen des Fuktionierens des radioelektronischen kombinierten Visieres dargelegt.

---

## Synthèse d'algorithmes de la visée radioélectronique combinée

**Résumé:** Est proposé un algorithme de fonctionnement du canal à long rayon de mesure de la visée radioélectronique combinée compte tenu de l'information sur la position spatiale de la cible. Est justifié le choix des modèles de l'état et de la surveillance, est effectuée la simulation sur ordinateur et sont présentés les résultats de l'étude des algorithmes de fonctionnement de la visée radioélectronique combinée.

---

**Авторы:** *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»; *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Князев Иван Владимирович* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».