

УПРАВЛЕНИЕ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
И В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 623.465.756

НАВЕДЕНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
С ТЕПЛОВИЗИОННЫМ КОРРЕЛЯЦИОННО-КОНТРАСТНЫМ  
АЛГОРИТМОМ АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ  
ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. В. А. Болдинов<sup>a,\*</sup>, В. А. Бухалёв<sup>b</sup>, А. А. Скрынников<sup>a,c</sup>, Б. Л. Шапиро<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Московский авиационный ин-т (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

<sup>b</sup>Московский научно-исследовательский телевизионный ин-т, Москва, Россия

<sup>c</sup>Государственный научно-исследовательский ин-т авиационных систем, Москва, Россия

\*e-mail: viktorboldinov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.

После доработки 30.06.2023 г.

Принята к публикации 31.07.2023 г.

Рассматривается задача построения алгоритма автосопровождения наземного объекта для системы наведения беспилотного летательного аппарата. В состав системы наведения входят следящий тепловизионный координатор цели с комбинированным корреляционно-контрастным алгоритмом пеленгации и бесплатформенная инерциальная навигационная система. Наведение происходит в условиях информационного противодействия, вызывающего случайные перерывы информации и случайные изменения мощности помех, которые фиксируются соответствующими индикаторами. Получен комбинированный помехоустойчивый алгоритм автосопровождения, использующий показания индикаторов перерывов информации и мощности помех и измерения углов пеленга и основанный на теории систем со случайной скачкообразной структурой. Приведен пример, иллюстрирующий работу алгоритма и демонстрирующий удовлетворительную точность автосопровождения.

DOI: 10.31857/S0002338823060045, EDN: GPTPAT

**Введение.** Алгоритмы автосопровождения в тепловизионных и телевизионных системах наведения (СН) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на наземные объекты можно разделить на два класса: контрастные и корреляционные.

В *контрастных* алгоритмах происходит выделение некоторых элементов изображения по контрасту с окружающим фоном, формирование из них объектов, которые могут рассматриваться в качестве гипотетических целей, выбор одного из них как цели наведения, формирование угла рассогласования между направлениями на цель и продольной оси следящего координатора для выполнения автосопровождения и наведения БПЛА [1].

В *корреляционных* алгоритмах угол рассогласования определяется по критерию максимального совпадения наблюдаемого изображения с эталоном, первоначально записанным в памяти компьютера и периодически обновляемым в процессе наведения. При этом совпадение текущего наблюдаемого изображения и эталона формируется на основе определения их взаимной корреляционной функции [2].

В состав СН входит бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая работает либо автономно, либо корректируется с командного пункта или системой спутниковой навигации. Информационное противодействие наведению БПЛА приводит к увеличению мощности помех в измерительных каналах вплоть до полного прекращения поступления информации об угловых координатах цели [2–4].

В статье рассматривается задача построения комбинированного корреляционно-контрастно-го алгоритма автосопровождения при наведении БПЛА на наземный объект по заданной траектории в условиях информационного противодействия.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00708).

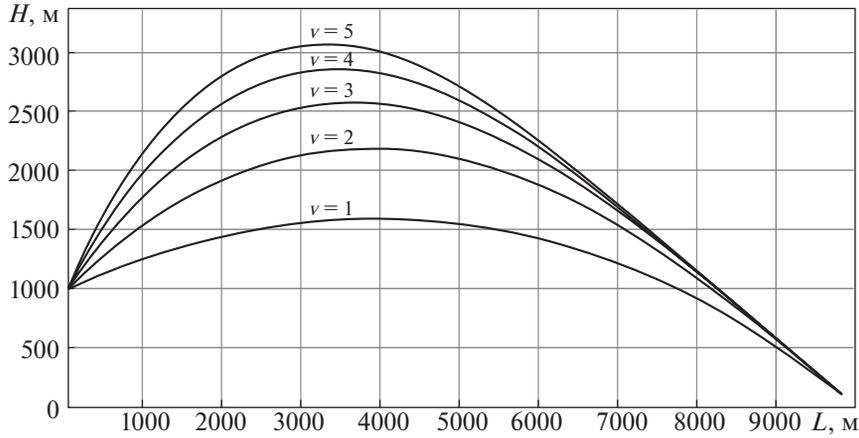


Рис. 1. Требуемые траектории наведения БПЛА в вертикальной плоскости

**1. Постановка задачи.** Математическая формулировка задачи имеет следующий вид. Требуемая траектория БПЛА в вертикальной плоскости описывается формулами [4]

$$\bar{\varepsilon}(t) = (\bar{\varepsilon}_0 - \bar{\varepsilon}_n) \left( \frac{\tau}{t_n} \right)^v + \bar{\varepsilon}_n, \quad \bar{\omega}(t) = \frac{v}{t_n} (\bar{\varepsilon}_0 - \bar{\varepsilon}_n) \left( \frac{\tau}{t_n} \right)^{v-1} \quad (1.1)$$

и проходит через две точки с углами наклона:  $\bar{\varepsilon}(t) = \bar{\varepsilon}_0$  при  $t = 0$  и  $\bar{\varepsilon}(t) = \bar{\varepsilon}_n$  при  $t = t_n$ , где  $\bar{\varepsilon}(t)$  и  $\bar{\omega}(t)$  – требуемые угол и угловая скорость линии визирования;  $t_n$  – конечный момент времени наведения;  $\tau = t_n - t$  – время, оставшееся до конца наведения;  $v$  – коэффициент крутизны траектории,  $v = \text{const}$ ,  $v > 1$ , характеризующий форму кривой  $\bar{\varepsilon}(t)$ . В частности, при  $v = 1$   $\bar{\omega}(t) = t_n^{-1}(\bar{\varepsilon}_n - \bar{\varepsilon}_0) = \text{const}$ , что соответствует движению с постоянной угловой скоростью по траектории, близкой к баллистической (рис. 1).

Формулы (1.1) эквивалентны системе уравнений [4]:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}(t) = \bar{\omega}(t), \quad \dot{\bar{\omega}}(t) = \tau^{-1}(t)(1 - v)\bar{\omega}(t), \quad (1.2)$$

$$\bar{\varepsilon}(0) = \bar{\varepsilon}_0, \quad \bar{\varepsilon}(t_n) = \bar{\varepsilon}_n, \quad \bar{\omega}(0) = t_n^{-1}v(\bar{\varepsilon}_n - \bar{\varepsilon}_0), \quad \bar{\omega}(t_n) = 0. \quad (1.3)$$

Реальная траектория отличается от требуемой и описывается уравнениями [4]

$$\dot{\varepsilon}(t) = \omega(t), \quad \dot{\omega}(t) = \tau^{-1}(t)[2\omega(t) + u(t) + \xi(t)], \quad (1.4)$$

с начальными условиями  $\varepsilon(0) = \bar{\varepsilon}_0$ ,  $\omega(0) = \bar{\omega}(0)$ , где  $\xi(t)$  – центрированный гауссовский белый шум с интенсивностью  $G(t)$ ;  $u(t)$  – параметр управления БПЛА, определяемый формулой [4]

$$u(t) = -\left[ \tau^{-1}(t)c_\varepsilon \hat{\varepsilon}^\circ(t) + c_\omega \hat{\omega}^\circ(t) + (v + 1)\bar{\omega}(t) \right]. \quad (1.5)$$

В законе управления (1.5)  $c_\varepsilon$  и  $c_\omega$  – параметрически оптимизированные постоянные коэффициенты, а  $\hat{\varepsilon}^\circ(t)$  и  $\hat{\omega}^\circ(t)$  – оценки переменных  $\varepsilon^\circ(t) \triangleq \varepsilon(t) - \bar{\varepsilon}(t)$  и  $\omega^\circ(t) \triangleq \omega(t) - \bar{\omega}(t)$ .

В угломерных каналах следящего координатора цели измеряются сигналы  $z^i(t)$ ,  $i = 1, 2$ :

$$\begin{aligned} z^1(t) &= \delta(s^{(1)}(t), 2)[\varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)] + \sqrt{Q^{(1)}(\sigma^{(1)}(t))} \zeta^{(1)}(t), \\ z^2(t) &= \delta(s^{(2)}(t), 2)[\varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)] + \tau^{-1} \sqrt{Q^{(2)}(\sigma^{(2)}(t))} \zeta^{(2)}(t), \end{aligned} \quad (1.6)$$

где  $i = 1$  – номер контрастного пеленгатора,  $i = 2$  – номер корреляционного пеленгатора;  $\hat{\varepsilon}(t)$  – оценка угла  $\varepsilon(t)$ , совпадающая с углом продольной оси координатора, которая оценивается

в координаторе на основании априорных данных и текущих измерений мощности сигнала  $z^{(i)}(t)$ ;

$$\delta(s^{(i)}(t), 2) = \begin{cases} 0 & \text{при } s^{(i)}(t) = 1, \\ 1 & \text{при } s^{(i)}(t) = 2 \end{cases}$$

– символ Кронекера, описывает перерывы поступления информации;  $s^{(i)}(t)$  (или в дискретной форме  $s_k^{(i)} = s^{(i)}(t_k)$ , где  $t_k$  – моменты времени, соответствующие дискретным моментам при  $k = \overline{0, n}$ ) – индекс структуры перерывов – марковская цепь [4, 5] с двумя альтернативными состояниями, заданная априорными вероятностями переходов из состояния  $s_k^{(i)}$  в состояние  $s_{k+1}^{(i)}$ :  $q_k^{(i)}(s_{k+1}^{(i)} | s_k^{(i)})$ ,  $s_k^{(i)} = 1, 2$ , где  $s_k^{(i)} = 2$  – наличие, а  $s_k^{(i)} = 1$  – отсутствие информации о координатах цели в сигнале измерения  $z^{(i)}(t_k)$ ;  $\zeta^{(i)}(t)$  – центрированный гауссовский белый шум с единичной интенсивностью;  $\sqrt{Q^{(i)}(\sigma^{(i)}(t))}$  – коэффициент усиления белого шума  $\zeta^{(i)}(t)$ :  $Q^{(i)}(\sigma^{(i)}(t) = j) = Q^{(ij)}$ ,  $j = \overline{1, N^{(i)}}$ ;  $\sigma^{(i)}(t)$  (или в дискретной форме  $\sigma_k^{(i)} = \sigma^{(i)}(t_k)$ ,  $\sigma_k^{(i)} = \overline{1, N^{(i)}}$ ) – марковская цепь с вероятностями переходов, равными  $\varphi_k^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)} | \sigma_k^{(i)})$  при  $\sigma_{k+1}^{(i)} \neq \sigma_k^{(i)}$  и

$$\varphi_k^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)} = j | \sigma_k^{(i)} = j) = 1 - \sum_{v=1, v \neq j}^{N^{(i)}} \varphi_k^{(i)}(v | j). \quad (1.7)$$

Структура  $s^{(i)}(t)$  наблюдается с помощью индикатора, выходной сигнал которого  $r^{(i)}(t)$  (или в дискретной форме  $r_k^{(i)} = r^{(i)}(t_k)$ ) – условная марковская цепь, заданная условными вероятностями переходов при фиксированном  $s_k^{(i)}$ :  $\pi_{k+1}^{(i)}(r_{k+1}^{(i)} | r_k^{(i)}, s_{k+1}^{(i)})$ .

Разница в формулах для  $z^{(1)}(t)$  и  $z^{(2)}(t)$  в (1.6) объясняется различным характером ошибок измерения в контрастных и корреляционных пеленгаторах: в первых отношение “сигнал–шум” по мере приближения к цели увеличивается приблизительно прямо пропорционально квадрату дальности до цели, а в корреляционных пеленгаторах, наоборот, уменьшается обратно пропорционально квадрату дальности вследствие роста дисперсии ошибки измерения угла рассогласования  $\varepsilon(t) - \hat{\varepsilon}(t)$ , вызванной периодической перезаписью эталона изображения.

Структура  $\sigma^{(i)}(t)$  наблюдается с помощью индикатора  $\rho^{(i)}(t)$  (или в дискретной форме  $\rho_k^{(i)} = \rho^{(i)}(t_k)$ ) – условная марковская цепь с  $N^{(i)}$  состояниями:  $\rho_k^{(i)} = \overline{1, N^{(i)}}$ , заданная условными вероятностями переходов  $\psi_{k+1}^{(i)}(\rho_{k+1}^{(i)} | \rho_k^{(i)}, \sigma_{k+1}^{(i)})$ .

Вероятности переходов индикаторов перерыва информации и индикаторов мощности помех описываются формулами (верхний индекс  $i$  опущен для простоты записи):

$$\pi_{k+1}^r(r_{k+1} | r_k, s_{k+1}) = \begin{cases} 1 - \pi_{k+1}^r, & r_{k+1} \neq r_k, \\ \pi_{k+1}^r, & r_{k+1} = r_k, \end{cases} \quad (1.8)$$

$$\pi_{k+1}^r = \pi_k^r e^{-\Delta/T_r} + (1 - e^{-\Delta/T_r}) \bar{\pi}_{k+1}^r(r_{k+1} | s_{k+1}), \quad r_k, s_k = 1, 2,$$

$$\psi_{k+1}(\rho_{k+1} | \rho_k, \sigma_{k+1}) = \begin{cases} 1 - \pi_{k+1}^\rho, & \rho_{k+1} \neq \rho_k, \\ \pi_{k+1}^\rho, & \rho_{k+1} = \rho_k, \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\pi_{k+1}^\rho = \pi_k^\rho e^{-\Delta/T_\rho} + (1 - e^{-\Delta/T_\rho}) \bar{\pi}_{k+1}^\rho(\rho_{k+1} | \sigma_{k+1}), \quad \rho_k, \quad \sigma_k = \overline{1, N},$$

где  $T_r, T_\rho$  – параметры инерционности индикаторов – постоянные времени ( $T_\mu, \mu = r, \rho$ ) аперидических звеньев, описывающих переходный процесс в виде экспоненты при смене показаний

индикатора  $\mu$ );  $\bar{\pi}_{k+1}^r(\bullet)$  – установившиеся значения правильных (при  $r_{k+1} = s_{k+1}$ ,  $\rho_{k+1} = \sigma_{k+1}$ ) и ошибочных решений (при  $r_{k+1} \neq s_{k+1}$ ,  $\rho_{k+1} \neq \sigma_{k+1}$ ) индикатора.

Требуется построить алгоритм автосопровождения цели, основанный на измерениях угловых координат  $z^{(i)}(t)$  и показаниях индикаторов перерывов информации  $r^{(i)}(t)$  и индикаторов мощности помех  $\rho^{(i)}(t)$  в контрастном ( $i = 1$ ) и корреляционном ( $i = 2$ ) пеленгаторах, а также на показаниях БИНС.

**2. Алгоритм автосопровождения.** Приближенно-оптимальный алгоритм, базирующийся на теории систем со случайной скачкообразной структурой (ССС) [4, 5] состоит из следующих блоков:

- 1) классификаторы перерывов информации, вычисляющие вероятности перерывов  $\hat{p}_{k+1}^{(i)}(s_k^{(i)})$ ;
- 2) идентификаторы перерывов информации, определяющие оценки  $\hat{s}^{(i)}(t)$  состояний  $s^{(i)}(t)$ ;
- 3) классификаторы и идентификаторы мощности помех, рассчитывающие оценки  $\hat{Q}^{(i)}(t)$ ,  $i = 1, 2$ ;
- 4) фильтр, вычисляющий оценку  $\hat{\varepsilon}(t)$  угла визирования цели  $\varepsilon(t)$ .

Алгоритм описывается следующими уравнениями.

1. Классификатор перерывов информации:

$$\hat{p}_{k+1}^{(i)}(1) = \left[ 1 + \frac{\tilde{p}_{k+1}^{(i)}(2) \pi_{k+1}^{(i)}(r_{k+1}^{(i)} | r_k^{(i)}, 2)}{\tilde{p}_{k+1}^{(i)}(1) \pi_{k+1}^{(i)}(r_{k+1}^{(i)} | r_k^{(i)}, 1)} \right]^{-1}, \quad \hat{p}_{k+1}^{(i)}(2) = 1 - \hat{p}_{k+1}^{(i)}(1), \quad (2.1)$$

$$\tilde{p}_{k+1}^{(i)}(1) = q_k^{(i)}(1|1) \hat{p}_k^{(i)}(1) + q_k^{(i)}(1|2) \hat{p}_k^{(i)}(2), \quad \tilde{p}_{k+1}^{(i)}(2) = 1 - \tilde{p}_{k+1}^{(i)}(1).$$

2. Идентификатор перерывов информации:

$$s^{(i)}(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } \hat{p}^{(i)}(1) \geq p_{\text{пор}}^{(i)}, \\ 2 & \text{при } \hat{p}^{(i)}(1) < p_{\text{пор}}^{(i)}, \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\hat{p}^{(i)}(1) = \hat{p}_{k+1}^{(i)}(1) + \frac{\hat{p}_k^{(i)}(1)}{2}, \quad i = 1, 2,$$

где  $p_{\text{пор}}^{(i)}$  – пороговое значение вероятности.

3. Классификатор мощности помех:

$$\hat{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) = \frac{\tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) \Psi_{k+1}^{(i)}(\rho_{k+1}^{(i)} | \rho_k^{(i)}, \sigma_{k+1}^{(i)})}{\sum_{\sigma_{k+1}^{(i)}} \tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) \Psi_{k+1}^{(i)}(\rho_{k+1}^{(i)} | \rho_k^{(i)}, \sigma_{k+1}^{(i)})}, \quad (2.3)$$

$$\tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) = \sum_{\sigma_k^{(i)}} \Phi_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)} | \sigma_k^{(i)}) \hat{P}_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}), \quad \sigma_k^{(i)} = \overline{1, N}.$$

4. Идентификатор мощности помех:

$$\hat{Q}_k^{(i)} = \sum_{\sigma_k^{(i)}} \hat{P}_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}) Q_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}), \quad \sigma_k^{(i)} = \overline{1, N}, \quad (2.4)$$

$$\hat{Q}^{(i)}(t) = \hat{Q}_{k+1}^{(i)} + \frac{\hat{Q}_k^{(i)}}{2}.$$

5. Фильтр:

$$\hat{\varepsilon}(t) = \hat{\omega}(t) + \delta(\hat{s}^{(1)}(t), 2) k_\varepsilon^{(1)}(t) \tau^{-1} z^{(1)}(t) + \delta(\hat{s}^{(2)}(t), 2) k_\varepsilon^{(2)}(t) z^{(2)}(t), \quad (2.5)$$

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = \tau^{-1} [2\hat{\omega}(t) + u(t)] + \delta(\hat{s}^{(1)}(t), 2) k_\omega^{(1)}(t) \tau^{-2} z^{(1)}(t) + \delta(\hat{s}^{(2)}(t), 2) (k_\omega^{(2)}(t) + \tau^{-1} k_\varepsilon^{(2)}(t)) z^{(2)}(t),$$

$$k_\varepsilon^{(1)}(t) = \sqrt{0.5(1 + \sqrt{1 + 16\gamma(t)})}, \quad k_\omega^{(1)}(t) = 0.5(1 + k_\varepsilon^{(1)}(t)) k_\varepsilon^{(1)}(t),$$

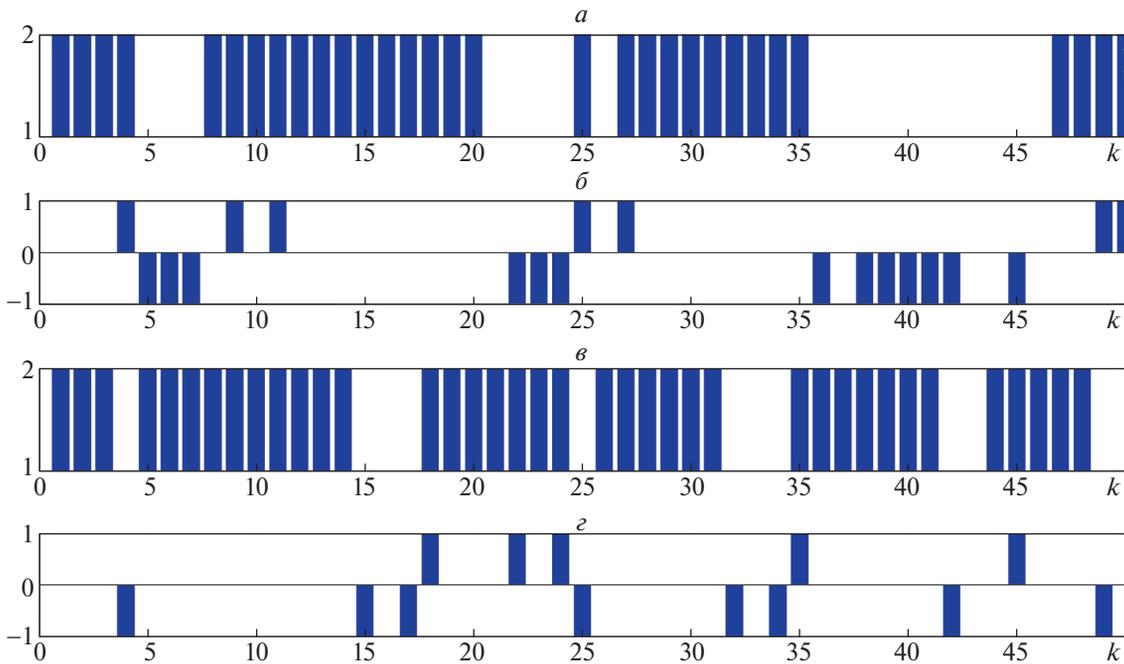


Рис. 2. Структура перерывов информации и их распознавание в контрастном и корреляционном пеленгаторах

$$k_{\varepsilon}^{(2)}(t) = \sqrt{2k_{\omega}^{(2)}(t)}, \quad k_{\omega}^{(2)}(t) = \sqrt{G^{(2)}(t)/\hat{Q}^{(2)}(t)},$$

$$\gamma(t) \triangleq G^{(1)}(t)\tau^2/\hat{Q}^{(1)}(t),$$

где  $\delta(\cdot)$  – символ Кронекера, а  $u(t)$  определяется формулами (1.1) и (1.5), где  $\varepsilon^0(t) \triangleq \hat{\varepsilon}(t) - \bar{\varepsilon}(t)$ ;  $\hat{\omega}^0(t) \triangleq \hat{\omega}(t) - \bar{\omega}(t)$ .

**3. Пример.** Рассмотрим пример представленной задачи при следующих исходных данных:  $\Delta f = 0.1$  Гц,  $\Delta t = 0.1$  с,  $s_k^{(i)} = 1, 2$ ,  $\sigma_k^{(i)} = 1, 2$ ,  $Q_k^{(i)} = [Q_{\min}^{(i)}, Q_{\max}^{(i)}]$ .

Результаты имитационного математического моделирования представлены на рис. 2–5.

На графиках рис. 2 изображено: *a* – перерывы информации в контрастном пеленгаторе, где  $s_k^{(1)} = 1$  – “есть перерыв”, а  $s_k^{(1)} = 2$  – “нет перерыва”; *б* – распознавание перерывов информации  $\Delta s_k^{(1)} = s_k^{(1)} - \hat{s}_k^{(1)}$ , где  $\Delta s_k^{(1)} = 0$  – “правильные решения”,  $\Delta s_k^{(1)} = 1$  – “пропуск сигнала”, а  $\Delta s_k^{(1)} = -1$  – “ложная тревога”; *в*, *г* – результаты, аналогичные *a* и *б*, только для второго (корреляционного) пеленгатора.

На графиках рис. 3 отображено: *a* – структура изменения мощности помех в контрастном пеленгаторе, где  $\sigma_k^{(1)} = 1$  – “минимальная мощность помех  $Q_{\min}^{(1)}$ ”, а  $\sigma_k^{(1)} = 2$  – “максимальная мощность помех  $Q_{\max}^{(1)}$ ”; *б* – распознавание мощности помех в контрастном пеленгаторе  $\Delta \sigma_k^{(1)} = \sigma_k^{(1)} - \hat{\sigma}_k^{(1)}$ , где  $\Delta \sigma_k^{(1)} = 0$  – “правильные решения”, а  $\Delta \sigma_k^{(1)} = 1$  – “ошибочные решения”; *в*, *г* – результаты, аналогичные *a* и *б*, только для корреляционного пеленгатора.

На графиках рис. 4 рассмотрены помехи (ошибок измерений) в контрастном ( $\zeta_k^{(1)}$ ) и корреляционном ( $\zeta_k^{(2)}$ ) пеленгаторах, представляющие собой центрированные гауссовские белые шумы с мощностью  $Q_k^{(1)}$  и  $Q_k^{(2)}$  соответственно.

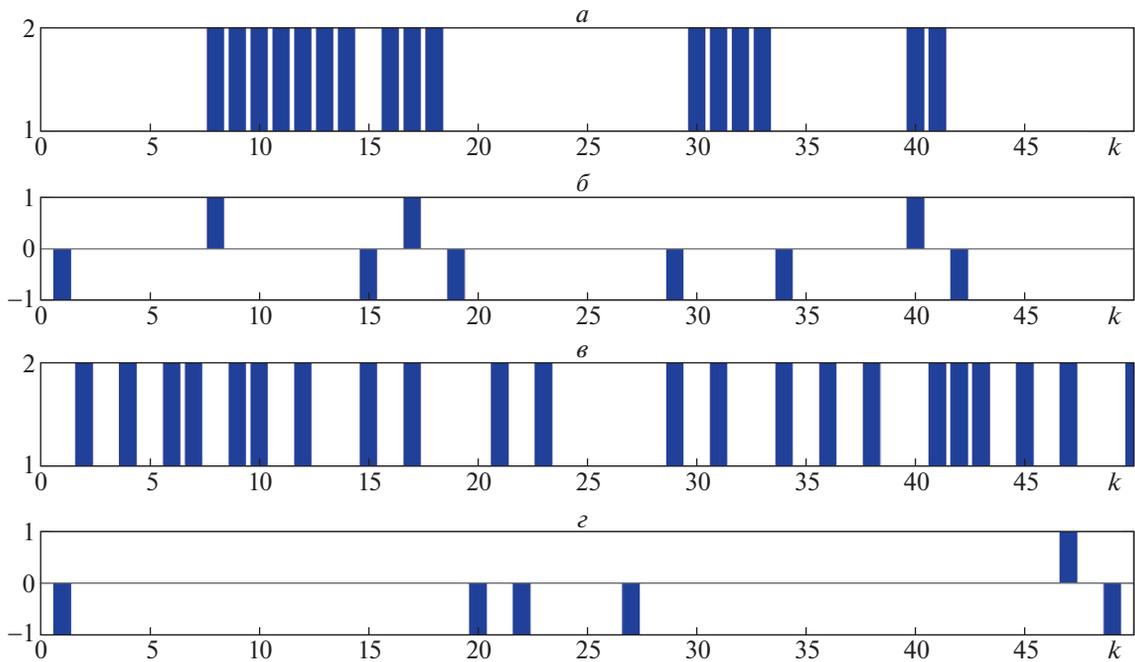


Рис. 3. Структура изменения мощности помех и распознавание изменения мощности помех в контрастном и корреляционном пеленгаторах

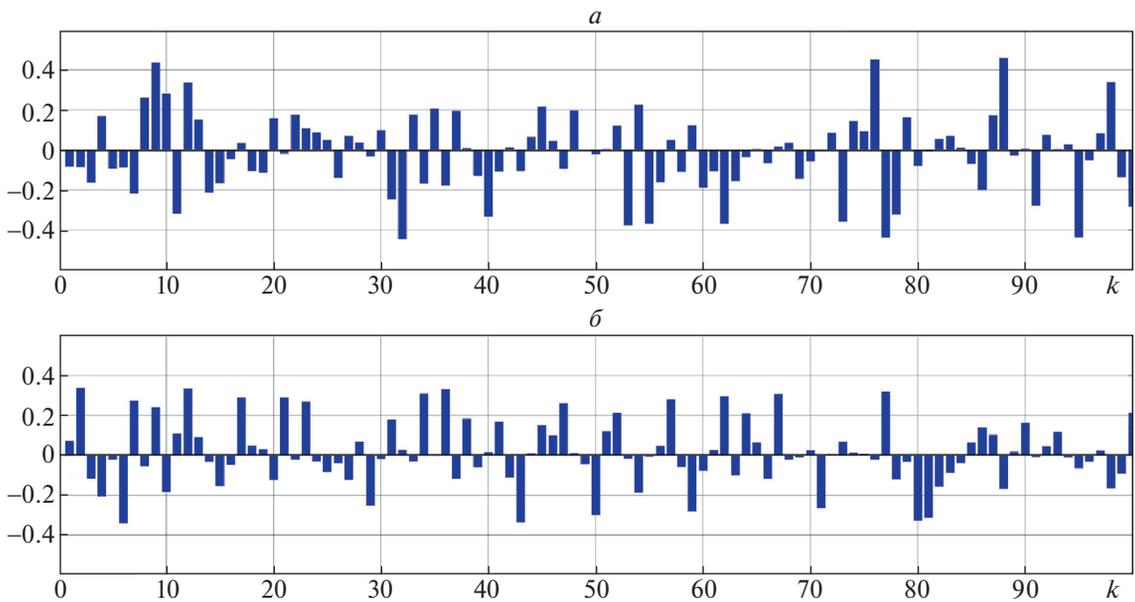


Рис. 4. Помехи в контрастном и корреляционном пеленгаторах

На рис. 5 приведены траектории полета БПЛА в вертикальной плоскости с углом пеленга цели  $\epsilon_k$  (траектория 1) и его оценкой  $\hat{\epsilon}_k$  (траектория 2), полученной разработанным корреляционно-контрастным алгоритмом автосопровождения цели тепловизионной СН БПЛА.

**Заключение.** Предложен метод построения приближенно-оптимального алгоритма автосопровождения неподвижного наземного объекта комбинированной СН БПЛА. СН включает в себя контрастный и корреляционный тепловизионные пеленгаторы и БИНС, которые могут

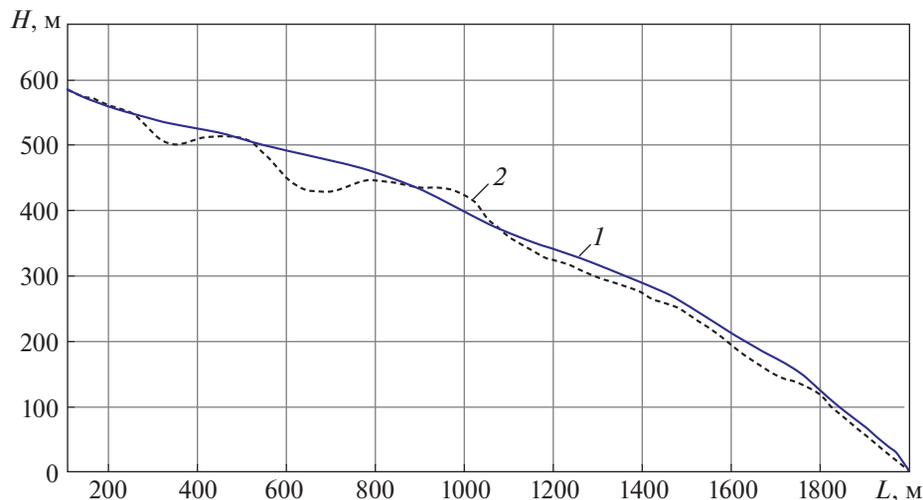


Рис. 5. Траектории наведения БПЛА с текущим углом пеленга и его оценкой

работать как вместе, так и по отдельности в зависимости от условий применения и характеристик информационного противодействия.

Противодействие приводит к значительному и неточно определяемому изменению отношения “сигнал—шум” вплоть до перерывов в поступлении информации о координатах объекта. Алгоритм автосопровождения, построенный на основе теории систем ССС, обладает свойством сходимости оценок угловых координат объекта в указанных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
2. Бухалёв В.А., Болдинов В.А., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Управление беспилотным летательным аппаратом с тепловизионным корреляционным координатором в условиях низкочастотных помех // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. № 7. Т. 17. С. 13–20.
3. Баханов Л.Е., Давыдов А.Н., Корниенко В.Н. и др. Системы управления вооружением истребителей. Основы интеллекта многофункционального самолета. Под ред. Федосова Е.А. М.: Машиностроение, 2005. 400 с.
4. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 192 с.
5. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 1996. 287 с.