

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 ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ¹

© 2023 г. В. А. Болдинов^{a,*}, В. А. Бухалёв^b, А. А. Скрынников^{a,c}, Б. Л. Шапиро^b

^aМосковский авиационный ин-т (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

^bМосковский научно-исследовательский телевизионный ин-т, Москва, Россия

^cГосударственный 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-контрастного алгоритма автосопровождения при наведении БПЛА на наземный объект по заданной траектории в условиях информационного противодействия.

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

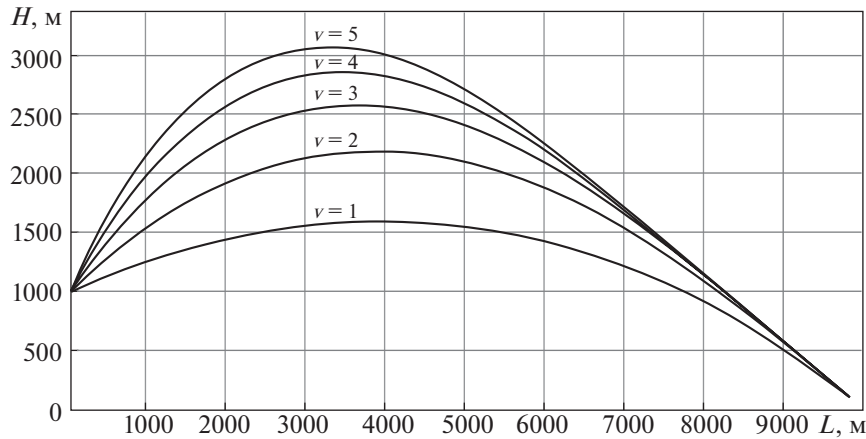


Рис. 1. Требуемые траектории наведения БПЛА в вертикальной плоскости

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_ε и c_ω — 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 $\epsilon(t) - \hat{\epsilon}(t)$, 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):

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

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

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

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

где T_r, T_ρ — параметры инерционности индикаторов — постоянные времени (T_μ , $\mu = r, \rho$) аperiодических звеньев, описывающих переходный процесс в виде экспоненты при смене показаний

индикатора μ); $\bar{\pi}_{k+1}^r(\bullet)$ — 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:

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

2. Идентификатор перерывов информации:

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

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

3. Классификатор мощности помех:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) &= \frac{\tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) \Psi_{k+1}^{(i)}(\rho_{k+1}^{(i)} | \rho_k^{(i)}, \sigma_{k+1}^{(i)})}{\sum_{\sigma_{k+1}^{(i)}} \tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) \Psi_{k+1}^{(i)}(\rho_{k+1}^{(i)} | \rho_k^{(i)}, \sigma_{k+1}^{(i)})}, \\ \tilde{P}_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)}) &= \sum_{\sigma_k^{(i)}} \Phi_{k+1}^{(i)}(\sigma_{k+1}^{(i)} | \sigma_k^{(i)}) \hat{P}_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}), \quad \sigma_k^{(i)} = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

4. Идентификатор мощности помех:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_k^{(i)} &= \sum_{\sigma_k^{(i)}} \hat{P}_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}) \hat{Q}_k^{(i)}(\sigma_k^{(i)}), \quad \sigma_k^{(i)} = \overline{1, N}, \\ \hat{Q}^{(i)}(t) &= \hat{Q}_{k+1}^{(i)} + \frac{\hat{Q}_k^{(i)}}{2}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

5. Фильтр:

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}(t) &= \hat{\omega}(t) + \delta(\hat{s}^{(1)}(t), 2) k_{\varepsilon}^{(1)}(t) \tau^{-1} z^{(1)}(t) + \delta(\hat{s}^{(2)}(t), 2) k_{\varepsilon}^{(2)}(t) z^{(2)}(t), \\ \dot{\hat{\omega}}(t) &= \tau^{-1} [2\hat{\omega}(t) + u(t)] + \delta(\hat{s}^{(1)}(t), 2) k_{\omega}^{(1)}(t) \tau^{-2} z^{(1)}(t) + \delta(\hat{s}^{(2)}(t), 2) (k_{\omega}^{(2)}(t) + \tau^{-1} k_{\varepsilon}^{(2)}(t)) z^{(2)}(t), \\ k_{\varepsilon}^{(1)}(t) &= \sqrt{0.5(1 + \sqrt{1 + 16\gamma(t)})}, \quad k_{\omega}^{(1)}(t) = 0.5(1 + k_{\varepsilon}^{(1)}(t)) k_{\varepsilon}^{(1)}(t), \end{aligned} \quad (2.5)$$

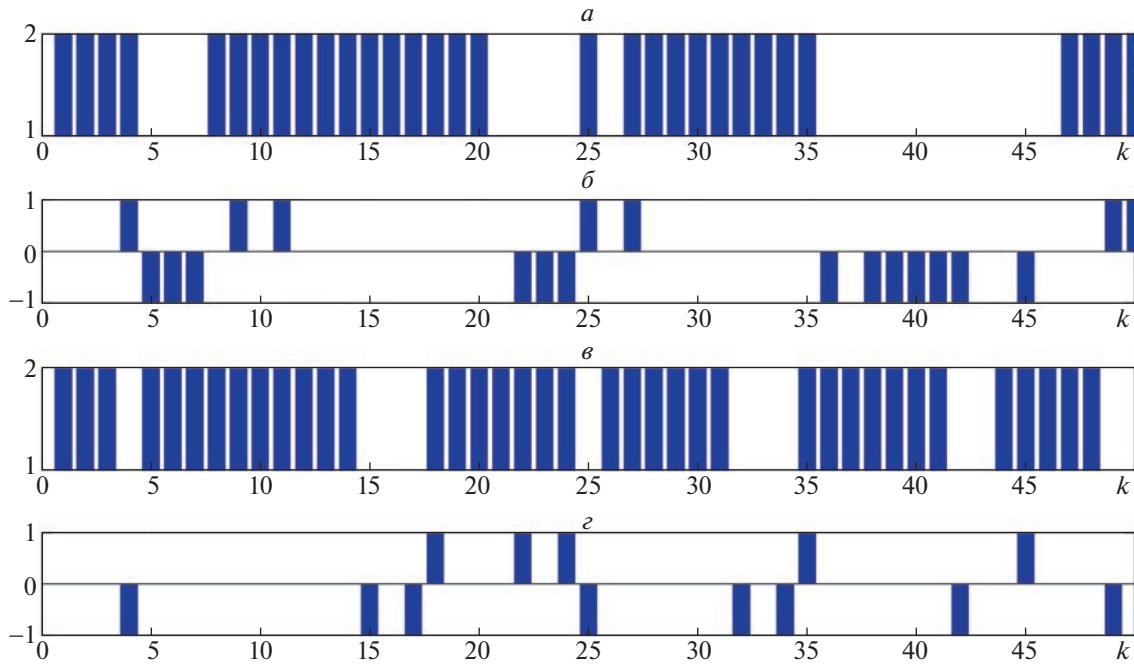


Рис. 2. Структура перерывов информации и их распознавание в контрастном и корреляционном пеленгаторах

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

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

где $\delta(\bullet)$ – 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: *а* – 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 *а* и *б*, только для второго (корреляционного) пеленгатора.

На графиках рис. 3 отображено: *а* – 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 *а* 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.

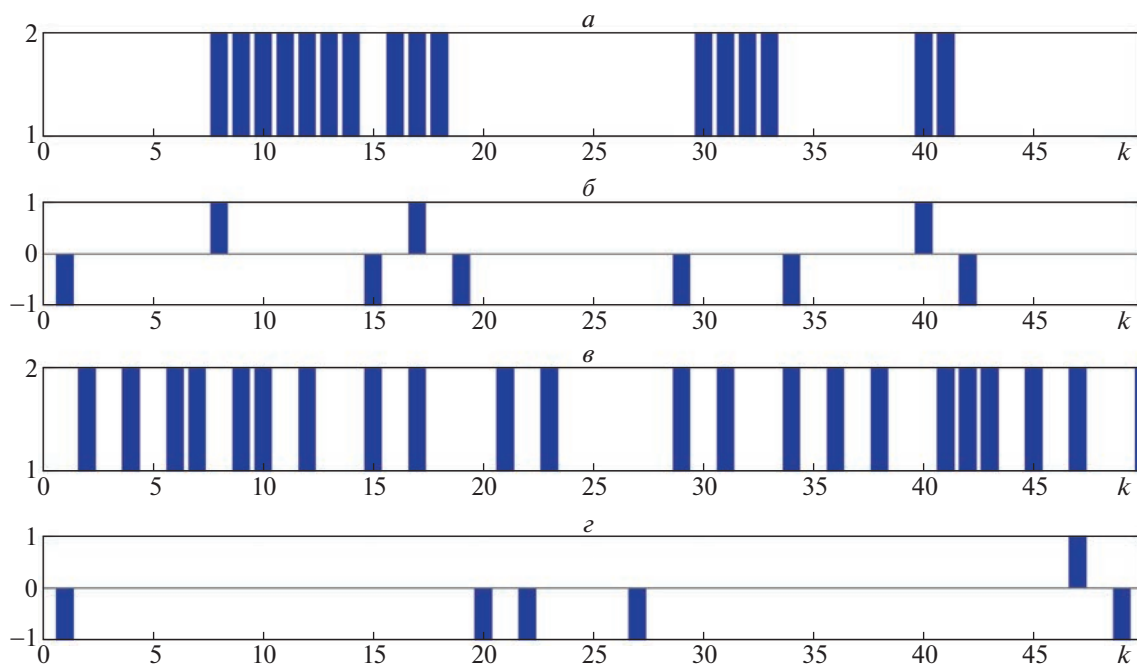


Рис. 3. Структура изменения мощности помех и распознавание изменения мощности помех в контрастном и корреляционном пеленгаторах

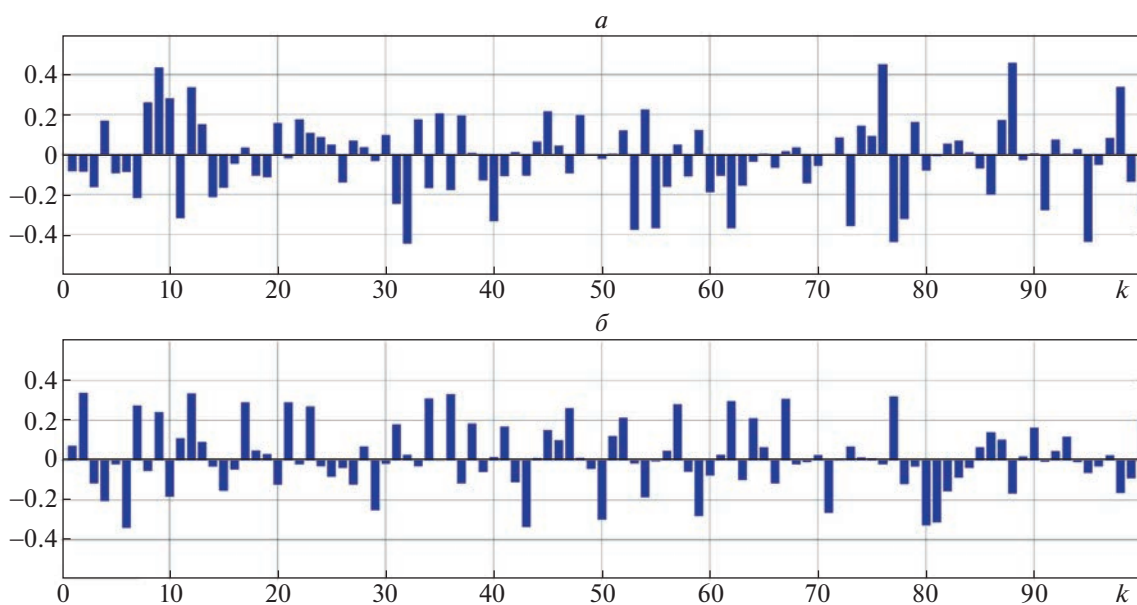


Рис. 4. Помехи в контрастном и корреляционном пеленгаторах

На рис. 5 приведены траектории полета БПЛА в вертикальной плоскости с углом пеленга цели ϵ_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

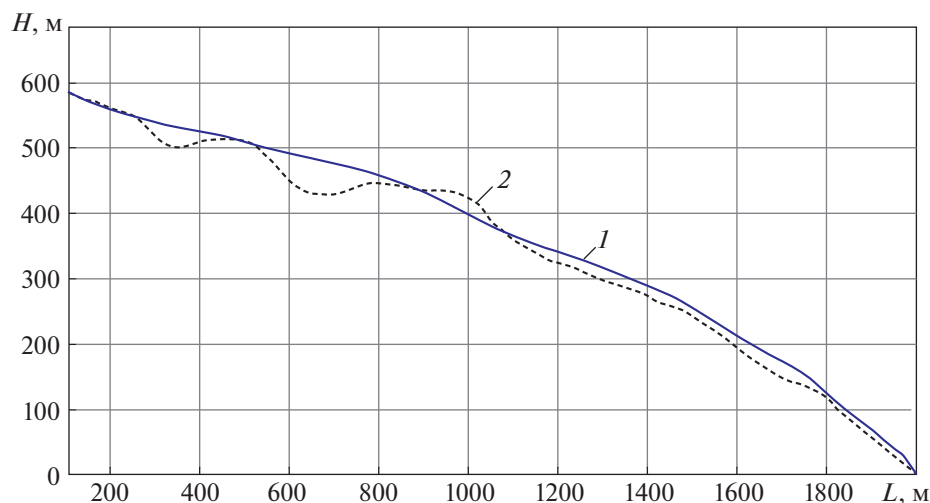


Рис. 5. Траектории наведения БПЛА с текущим углом пеленга и его оценкой

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.