

УПРАВЛЕНИЕ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
И В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 517.977

ИГРОВОЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ
ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ¹

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

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

^b Московский научно-исследовательский телевизионный ин-т, Москва, Россия

^c Государственный научно-исследовательский ин-т авиационных систем, Москва, Россия

*e-mail: viktorboldinov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 05.12.2022 г.

Рассматривается задача игрового управления группой беспилотных летательных аппаратов в условиях информационного противодействия со стороны группы неподвижных объектов. Получены два рекуррентных информационно-управляющих алгоритма: алгоритм взаимосвязанного управления группой беспилотных летательных аппаратов и алгоритм управления постановщика помех, основанные на теории стохастических многошаговых игр и теории систем со случайной скачкообразной структурой.

DOI: 10.31857/S0002338823020063, EDN: JDHTCO

Введение. В [1] рассматривалась задача построения алгоритмов взаимосвязанного управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при наведении на группу объектов, часть из которых является ложными, создаваемыми с помощью имитационных помех и усиливаемыми маскирующими помехами, вызывающими перемены информации.

Если система противодействия обладает способностью оценивать какие-то параметры процесса наведения, то она может активно влиять на управление им [2–4].

В этих условиях задача построения информационно-управляющих алгоритмов может быть сформулирована как антагонистическая дифференциальная или многошаговая стохастическая игра [3, 5–10]. Эта задача рассматривается в настоящей статье.

1. Постановка задачи. Группа БПЛА наводится на группу неподвижных объектов, прикрываемых имитационными и маскирующими помехами, в результате чего в информационных каналах систем БПЛА появляются сигналы от ложных объектов и возникают перемены информации. Соседние БПЛА обмениваются информацией по двухсторонней линии связи для поддержания требуемой дистанции между ними. В системе управления каждого участника группы измеряются наблюдаемые координаты объектов и их некоторые различительные признаки. На основании измерений формируются необходимые оценки и сигналы управления БПЛА.

Управление БПЛА направлено на повышение точности наведения, управление системы противодействия – на ее снижение. При этом каждый из противников рассчитывает на наилучшее для себя поведение соперника.

Математически задача формулируется как антагонистическая многошаговая стохастическая игра, описываемая следующими уравнениями.

Схема наведения двух БПЛА (соседних участников группы) на два неподвижных объекта в вертикальной плоскости декартовой прямоугольной системы координат (O, y_L, x_L) представлена на рис. 1. Здесь через L обозначена дистанция между соседними БПЛА (1 и 2), наводящихся на два неподвижных объекта (1' и 2'), которые отстоят друг от друга на расстоянии l . Дальности от БПЛА до объектов и углы пеленга объектов обозначены как $D^{(1)}$, $D^{(2)}$ и $\varepsilon^{(1)}$, $\varepsilon^{(2)}$ соответственно.

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

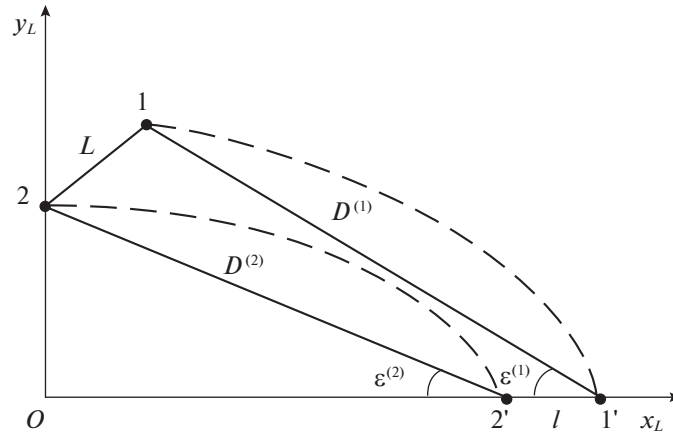


Рис. 1. Траектории наведения двух БПЛА на два объекта

Наведение осуществляется по заданным траекториям, описываемым уравнениями (в непрерывной форме):

$$\dot{\bar{\epsilon}}(t) = \bar{\omega}(t), \quad \dot{\bar{\omega}}(t) = \tau^{-1}(t)(1 - \nu)\bar{\omega}(t), \quad (1.1)$$

где $\bar{\epsilon}(t)$, $\bar{\omega}(t)$ – требуемые угол и угловая скорость пеленга с заданными начальными и конечными условиями $\bar{\epsilon}(0) = \bar{\epsilon}_0$, $\bar{\epsilon}(t_n) = \bar{\epsilon}_n$, $\bar{\omega}(0) = t_n^{-1}\nu(\bar{\epsilon}_n - \bar{\epsilon}_0)$, $\bar{\omega}(t_n) = 0$; ν – коэффициент крутизны траектории, $\nu = \text{const}$, $\nu > 1$; t_n – конечный момент времени наведения; $\tau = t_n - t$ – время, оставшееся до конца наведения.

Согласно выражению (1.1), заданная траектория – это кривая, описываемая формулами

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}(t) &= (\bar{\epsilon}_0 - \bar{\epsilon}_n) \left(\frac{\tau}{t_n} \right)^\nu + \bar{\epsilon}_n, \\ \bar{\omega}(t) &= \frac{\nu}{t_n} (\bar{\epsilon}_0 - \bar{\epsilon}_n) \left(\frac{\tau}{t_n} \right)^{\nu-1} \end{aligned} \quad (1.2)$$

и проходящая через две точки с углами наклона $\bar{\epsilon}_0$ и $\bar{\epsilon}_n$.

Форма кривой зависит от коэффициента крутизны ν . В частности, при $\nu = 1$ $\bar{\omega}(t) = t_n^{-1}(\bar{\epsilon}_n - \bar{\epsilon}_0) = \text{const}$, что соответствует движению с постоянной угловой скоростью по траектории, близкой к баллистической. Влияние ν на форму траектории показано на рис. 2.

В общем случае заданные траектории обоих БПЛА не одинаковы: $\nu^{(1)} \neq \nu^{(2)}$, а требуемая дистанция \bar{L} между ними определяется, как следует из рис. 1, формулой

$$\bar{L} = \sqrt{(\bar{D}^{(1)})^2 + (\bar{D}^{(2)})^2 - 2\bar{D}^{(1)}\bar{D}^{(2)} \cos(\bar{\epsilon}^{(1)} - \bar{\epsilon}^{(2)})}, \quad (1.3)$$

где $\bar{D}^{(1)}$, $\bar{D}^{(2)}$, $\bar{\epsilon}^{(1)}$, $\bar{\epsilon}^{(2)}$ – требуемые дальности и углы пеленга первого и второго БПЛА.

В каждом БПЛА измеряются пространственные координаты истинного объекта, условно именуемого “цель” (Ц), и ложного объекта, условно именуемого “помеха” (П). Динамика и измерение параметров объектов описываются следующими формулами и уравнениями в дискретной форме:

$$\begin{aligned} D_{k+1}^j &= [D^j - \Delta t \nu + \xi^{D^j}]_k, & D_0^{\text{Ц}} &\neq D_0^{\text{П}}, \\ \epsilon_{k+1}^j &= [\epsilon^j + \Delta t \omega^j]_k, & \epsilon_0^{\text{Ц}} &\neq \epsilon_0^{\text{П}}, \\ \omega_{k+1}^j &= \left[\omega^j + \frac{\Delta t}{\tau} (2\omega + u + \xi^{\epsilon^j}) \right]_k, & \omega_0^{\text{Ц}} &\neq \omega_0^{\text{П}}, \quad j = \text{Ц, П}; \end{aligned} \quad (1.4)$$

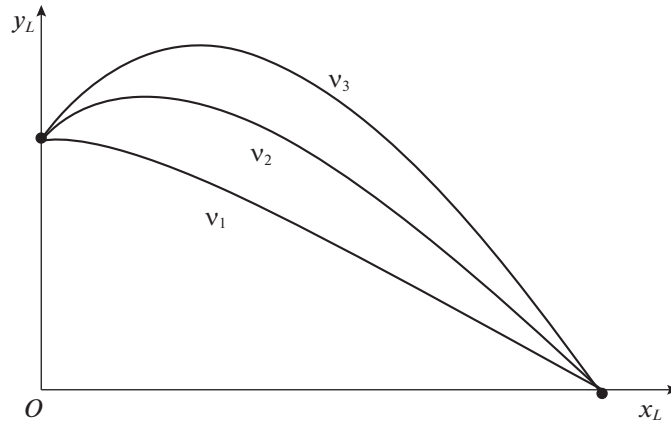


Рис. 2. Зависимость траектории от коэффициента крутизны v

$$\check{D}_k^i = [D^j + \zeta^{D^j}]_k [1 - \delta(s_k, 3)], \tag{1.5}$$

$$\check{\varepsilon}_k^i = [\varepsilon^j + \zeta^{\varepsilon^j}]_k [1 - \delta(s_k, 3)], \quad i = 1, 2, \quad j = \text{Ц, П};$$

$$\pi(\check{r}_k^i | r_k^j), \quad i = 1, 2, \quad j = \text{Ц, П}. \tag{1.6}$$

Здесь символом $\check{}$ обозначены измерения соответствующих переменных; k – дискретный момент времени, $k = \overline{0, n}$ (индекс k у квадратных скобок $[\bullet]_k$ относится ко всем переменным внутри этих скобок); $\Delta t = t_{k+1} - t_k$; j – индекс объекта: Ц, П; i – номер канала наблюдения, $i = 1, 2$; D_k^j – дальности до Ц и до П; ε_k^j – углы пеленга Ц и П; ω_k^j – угловые скорости пеленгов; u_k – сигнал управления БПЛА; $\xi_k^{D^j}, \xi_k^{\varepsilon^j}$ – центрированные гауссовские дискретные белые шумы возмущений с дисперсиями соответственно G^{D^j} и G^{ε^j} ; $\zeta_k^{D^j}, \zeta_k^{\varepsilon^j}$ – центрированные гауссовские дискретные белые шумы ошибок измерения с дисперсиями соответственно Q^{D^j} и $Q^{\varepsilon^j}/(\tau_k^j)^2$; $\tau_k^j = D_k^j/v_k$ – время, оставшееся до конца наведения БПЛА соответственно на Ц и на П; v_k – априорная оценка скорости сближения БПЛА с объектами (известная функция времени);

$$\delta(s_k, 3) = \begin{cases} 1 & \text{при } s_k = 3, \\ 0 & \text{при } s_k \neq 3 \end{cases}$$

– символ Кронекера, описывает перерыв поступления информации, вызванный воздействием маскирующей помехи; s_k – индекс структуры, $s_k = 1, 2, 3$; $\pi(\check{r}_k^i | r_k^j)$ – условные вероятности правильных (при $\check{r}_k^i = r_k^j$) и ошибочных (при $\check{r}_k^i \neq r_k^j$) показаний индикатора \check{r}_k^j информационного различительного признака r_k^j (известная функция времени) Ц и П ($j = \text{Ц, П}$) в первом ($i = 1$) и втором ($i = 2$) каналах наблюдения.

Индекс структуры (помеховой ситуации) s_k – марковская цепь, заданная вероятностями переходов $q_k(s_{k+1}|s_k)$ из состояния s_k в состояние s_{k+1} ($s_k, s_{k+1} = \overline{1, 3}$):

$$\begin{aligned} q_k(2|1) = q_k(1|2) = 0, \quad q_k(1|3) = q_k(2|3) = d_k = d^{\min}, d^{\max}, \\ q_k(3|1) = q_k(3|2) = g_k = g^{\min}, g^{\max}, \quad 0 < d, \quad g < 0.5. \end{aligned} \tag{1.7}$$

Множество возможных состояний структуры представлено в таблице 1.

Как видно из таблицы, при $s = 1$ в первом информационном канале ($i = 1$) наблюдается цель, во втором – помеха; при $s = 2$ – в $i = 1$ – помеха, в $i = 2$ – цель; при $s = 3$ – перерыв информации.

Таблица 1. Множество возможных состояний структуры

s	$i = 1$	$i = 2$
1	$j = \Pi$	$j = \Pi$
2	$j = \Pi$	$j = \Pi$
3	0	0

Состояния структуры s_k фиксируются с ошибками индикаторами маскирующих помех, которые описываются условными вероятностями $\pi_{k+1}^\psi(\tilde{s}_k^\psi | s_k)$ правильных (при $\tilde{s}_k^\psi = s_k$) и ошибочных (при $\tilde{s}_k^\psi \neq s_k$) показаний индикаторов, где s_k – индекс структуры, $s_k = \overline{1,3}$; \tilde{s}_k^ψ – показания индикатора, $\tilde{s}_k^\psi = \overline{1,3}$; $\psi = \text{Б, П}$; символ Б означает БПЛА, символ П – постановщик помехи (помеха).

Критерии оптимальности управлений описываются формулами

$$J^* = \min_{u_{0,n-1}} J; \quad (1.8)$$

$$J = \sum_{k=1}^n M[W_k^u | \tilde{D}_{0,k-1}, \tilde{\varepsilon}_{0,k-1}, \tilde{r}_{0,k-1}, \tilde{s}_{0,k-1}^{\text{Б}}]; \quad (1.9)$$

$$W_k^u \triangleq \alpha_\varepsilon \tau_k^{-2} (\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}_k)^2 + \alpha_\omega (\omega_k - \bar{\omega}_k)^2 + \beta u_{k-1}^2; \quad (1.10)$$

$$J^{\text{Б}*} = \min_{d_{0,n-1}} \max_{g_{0,n-1}} J^{\text{Б}}; \quad J^{\text{П}*} = \max_{g_{0,n-1}} \min_{d_{0,n-1}} J^{\text{П}}; \quad (1.11)$$

$$J^{\text{Б}} = \sum_{k=1}^n M[W_k^{\text{Б}}(s_k, d_{k-1}, g_{k-1}) | \tilde{D}_{0,k-1}, \tilde{\varepsilon}_{0,k-1}, \tilde{r}_{0,k-1}, \tilde{s}_{0,k-1}^{\text{Б}}]; \quad (1.12)$$

$$J^{\text{П}} = \sum_{k=1}^n M[W_k^{\text{П}}(s_k, d_{k-1}, g_{k-1}) | \tilde{s}_{0,k-1}^{\text{П}}]; \quad (1.13)$$

$$W_k^{\text{Б}} = \delta(s_k, 3) + \lambda^{\text{Б}} d_{k-1} - \mu^{\text{Б}} g_{k-1}; \quad (1.14)$$

$$W_k^{\text{П}} = \delta(s_k, 3) + \lambda^{\text{П}} d_{k-1} - \mu^{\text{П}} g_{k-1}, \quad (1.15)$$

где J^* , $J^{\text{Б}*}$, $J^{\text{П}*}$ – критерии оптимальности управлений; J , $J^{\text{Б}}$, $J^{\text{П}}$ – показатели эффективности; $W_k^u(\cdot)$, $W_k^{\text{Б}}(\cdot)$, $W_k^{\text{П}}(\cdot)$ – текущие функции потерь; α_ε , α_ω , β , λ , μ – положительные константы – весовые коэффициенты, регулирующие распределение приоритетов между частными показателями в (1.8)–(1.15).

В начальный момент известны математические ожидания и ковариации фазовых координат процесса наведения, а также вероятности структуры $p_0^{\text{Б}}(s_0)$, $p_0^{\text{П}}(s_0)$. Весовые коэффициенты либо задаются, либо определяются путем параметрической оптимизации в процессе имитационного математического моделирования синтезированной системы.

Требуется найти оптимальные управления u_k^* , d_k^* , g_k^* в классе детерминированных зависимостей от наблюдений $\tilde{D}_{0,k}$, $\tilde{\varepsilon}_{0,k}$, $\tilde{r}_{0,k}$, $\tilde{s}_{0,k}^{\text{Б}}$, $\tilde{s}_{0,k}^{\text{П}}$.

2. Информационно-управляющие алгоритмы. Оптимальные игровые алгоритмы управления линейными системами с марковской структурой рассмотрены в [3, 5, 8, 9]. Их особенностью по сравнению с системами с детерминированной структурой является многоканальность, обусловленная числом состояний структуры.

Как показано в [3], способом приближенной замены состояния структуры s_k его оценкой \hat{s}_k можно получить более простые одноканальные алгоритмы. Схема игрового управления БПЛА приведена на рис. 3.

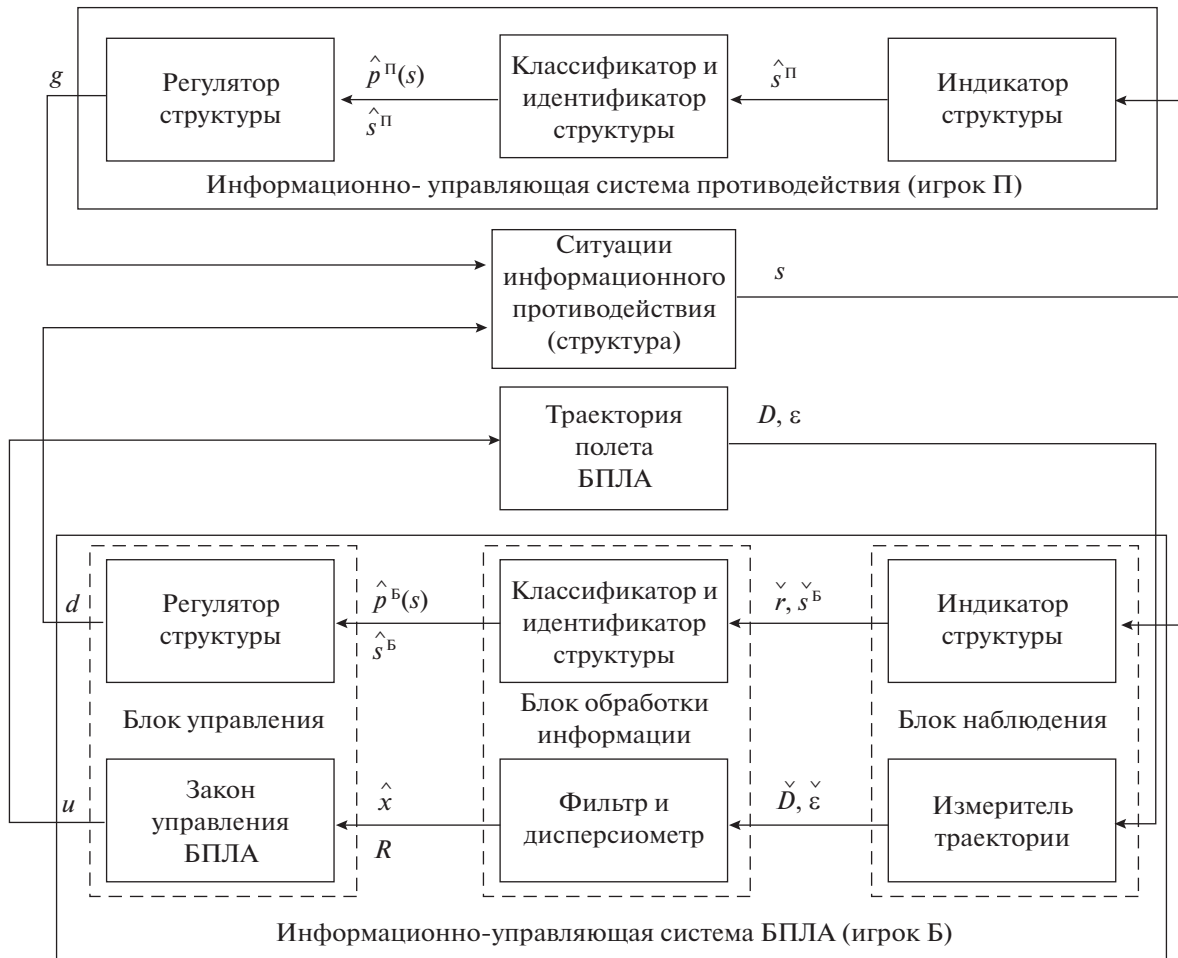


Рис. 3. Схема игрового управления БПЛА

2.1. Алгоритм игрока Б (БПЛА). 1. *Закон управления БПЛА*. Структурно-адаптивный одноканальный алгоритм, основанный на приближенной замене состояния структуры s_k его оценкой \tilde{s}_k^B , согласно условиям задачи (1.1)–(1.15), имеет следующий вид:

$$u_k^* = -[\tau^{-1}C_\epsilon(\hat{\epsilon} - \bar{\epsilon}) + C_\omega(\hat{\omega} - \bar{\omega}) + (v + 1)\bar{\omega} + C_l(\hat{L} - \bar{L}) + C_v(\hat{v} - \bar{v})]_k, \quad (2.1)$$

где $v \triangleq \dot{L}$, $\hat{v}_k = \dot{\hat{L}}_k$, $\bar{v}_k = \dot{\bar{L}}_k$, коэффициенты C_L, C_v определяются путем параметрической оптимизации, а коэффициенты C_ϵ, C_ω находятся из уравнений

$$\begin{aligned} C_\epsilon(C_\epsilon - C_\omega + 2) - \beta^{-1}\alpha_\epsilon &= 0, \\ C_\omega^2 - 3C_\omega - 2C_\epsilon - \beta^{-1}\alpha_\omega &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

2. *Регулятор структуры (помеховых ситуаций)*. Применяя метод динамического программирования Беллмана [11], обобщенный на класс систем со случайной скачкообразной структурой (ССС) [3, 5, 8], и критерий оптимальности J^{B^*} – (1.12), (1.14), получаем приближенно-оптимальный алгоритм регулятора:

$$d_k^* = \begin{cases} d^{\min} & \text{при } \hat{p}_k^B(3) \leq \tilde{\lambda}^B, \\ d^{\max} & \text{при } \hat{p}_k^B(3) > \tilde{\lambda}^B; \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\tilde{g}_k = \begin{cases} g^{\min} & \text{при } \hat{p}_k^B(3) \geq 1 - \tilde{\mu}^B, \\ g^{\max} & \text{при } \hat{p}_k^B(3) < 1 - \tilde{\mu}^B; \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\tilde{\lambda}^B = \frac{\lambda^B(d^{\max} + g^{\max})}{1 + \lambda^B(d^{\max} - d^{\min}) + \mu^B(g^{\max} - g^{\min})}, \quad \tilde{\mu}^B = \frac{\mu^B}{\tilde{\lambda}^B}, \quad (2.5)$$

где d_k^* – оптимальное управление игрока Б; \tilde{g}_k – предполагаемое игроком Б оптимальное управление игрока П, основанное на наблюдениях игрока Б; $\hat{p}_k^B(1)$ – апостериорная вероятность состояния структуры $s_k = 1$, определяемая классификатором.

3. *Фильтр*. Структурно-адаптивный одноканальный фильтр с учетом условий задачи описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \hat{D}_{k+1}^j &= [\tilde{D}^j + (1 - \delta(\hat{s}^B, 3))K^{D^j}(\tilde{D}^{i(\hat{s}^B)} - \tilde{D}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{D}_{k+1}^j &= [\hat{D}^j - \Delta t v]_k; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_{k+1}^j &= [\tilde{\varepsilon}^j + (1 - \delta(\hat{s}^B, 3))K^{\varepsilon^j}(\tilde{\varepsilon}^{i(\hat{s}^B)} - \tilde{\varepsilon}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{\varepsilon}_{k+1}^j &= [\hat{\varepsilon}^j - \Delta t \hat{\omega}^j]_k; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{k+1}^j &= [\tilde{\omega}^j + (1 - \delta(\hat{s}^B, 3))(K^{\omega^j} + K^{\varepsilon^j} \tau^{-1})(\tilde{\omega}^{i(\hat{s}^B)} - \tilde{\omega}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{\omega}_{k+1}^j &= [\hat{\omega}^j + \Delta t \tau^{-1}(2\hat{\omega}^j + u^*)]_k; \\ \hat{D}_0^j &= D_0^j, \quad \hat{\varepsilon}_0^j = \varepsilon_0^j, \quad \hat{\omega}_0^j = \omega_0^j, \\ i &= 1, 2, \quad \hat{s} = 1, 2, 3, \quad j = \text{Ц, П}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

При $j = \text{Ц}$:

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } \hat{s}_k^B = 1, \\ 2 & \text{при } \hat{s}_k^B = 2, \end{cases} \quad (2.9)$$

при $j = \text{П}$:

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } \hat{s}_k^B = 2, \\ 2 & \text{при } \hat{s}_k^B = 1, \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\hat{L}_k = \left[\sqrt{(\hat{D}^{(\text{III})})^2 + (\hat{D}^{(\text{II}2)})^2 - 2\hat{D}^{(\text{III})}\hat{D}^{(\text{II}2)} \cos(\hat{\varepsilon}^{(\text{III})} - \hat{\varepsilon}^{(\text{II}2)})} \right]_k. \quad (2.11)$$

Здесь символ \wedge обозначает, как обычно, апостериорные оценки координат цели, вычисляемые первым и вторым БПЛА.

4. *Дисперсиометр*. Алгоритм дисперсиометра состоит из формул для положительных постоянных “коэффициентов доверия” K^{D^j} , K^{ε^j} , K^{ω^j} , получаемых в результате приближенного решения в установившемся режиме уравнений для ковариаций ошибок оценивания координат цели и помех [3]:

$$K^{D^j} = \Delta \omega^j \left(\sqrt{1 + \frac{G^{D^j}}{Q^{D^j}}} - 1 \right), \quad K^{\varepsilon^j} = \sqrt{2K^{\omega^j}}, \quad K^{\omega^j} = \sqrt{\frac{G^{\omega^j}}{Q^{\omega^j}}}, \quad j = \text{Ц, П}. \quad (2.12)$$

5. *Классификатор структуры*. Алгоритм классификатора, согласно [3], с учетом условий задачи описывается следующими уравнениями:

$$\hat{p}_k^B(s_k) = \frac{\vartheta_k^B(s_k)}{\sum_{s_k} \vartheta_k^B(s_k)}, \quad \hat{p}_0^B(s_0) = \begin{cases} 0.5 & \text{при } s_0 = 1, 2, \\ 0 & \text{при } s_0 = 3; \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_k^B(1) &= \left[\tilde{p}^B(1) \pi^r(\tilde{r}^1 | r^{\text{II}}) \pi^r(\tilde{r}^2 | r^{\text{II}}) \pi^B(\tilde{s}^B | 1) e^{-\Delta(1)} \right]_k, \\ \vartheta_k^B(2) &= \left[\tilde{p}^B(2) \pi^r(\tilde{r}^1 | r^{\text{II}}) \pi^r(\tilde{r}^2 | r^{\text{II}}) \pi^B(\tilde{s}^B | 2) e^{-\Delta(2)} \right]_k, \\ \vartheta_k^B(3) &= \tilde{p}_k^B(3) \pi^B(\tilde{s}^B | 3); \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta_k(1) &= \frac{1}{2} \left[\left[K^D (\tilde{D}^1 - \hat{D}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^\varepsilon (\tilde{\varepsilon}^1 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^D (\tilde{D}^2 - \hat{D}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^\varepsilon (\tilde{\varepsilon}^2 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}}) \right]^2 \right]_k, \\ \Delta_k(2) &= \frac{1}{2} \left[\left[K^D (\tilde{D}^1 - \hat{D}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^\varepsilon (\tilde{\varepsilon}^1 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^D (\tilde{D}^2 - \hat{D}^{\text{II}}) \right]^2 + \left[K^\varepsilon (\tilde{\varepsilon}^2 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}}) \right]^2 \right]_k, \\ \Delta_k(3) &= 0; \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{k+1}^B(1) &= [\hat{p}(1) + d^* \hat{p}(3)]_k^B, \\ \tilde{p}_{k+1}^B(2) &= [\hat{p}(2) + d^* \hat{p}(3)]_k^B, \\ \tilde{p}_{k+1}^B(3) &= [\tilde{g}(\hat{p}(1) + \hat{p}(2)) + (1 - 2d^*) \hat{p}(3)]_k^B. \end{aligned} \quad (2.16)$$

6. Идентификатор структуры:

$$\hat{s}_k^B = \arg \max_{s_k} \hat{p}_k^B(s_k), \quad s_k = 1, 2, 3. \quad (2.17)$$

В целом, алгоритм игрока Б описывается замкнутой системой уравнений (2.1)–(2.17) с входными сигналами \tilde{D}_k^{ij} , $\tilde{\varepsilon}_k^{ij}$, \tilde{r}_k^i , \tilde{s}_k^B и выходными сигналами u_k^* , d_k^* , \hat{D}_k^j , $\hat{\varepsilon}_k^j$, $\hat{\omega}_k^j$, $\hat{p}_k^B(s_k)$, \hat{s}_k^B , $i = 1, 2$; $j = \text{Ц, П}$.

2.2. Алгоритм игрока П. Алгоритм состоит из регулятора, классификатора и идентификатора, описываемых уравнениями соответственно (2.3)–(2.5), (2.13)–(2.16) и (2.17), в которых надо заменить $d_k^* \rightarrow \tilde{d}_k$, $\tilde{g}_k \rightarrow g^*$, $\tilde{\lambda}^B \rightarrow \tilde{\lambda}^{\text{II}}$, $\tilde{\mu}^B \rightarrow \tilde{\mu}^{\text{II}}$, $\hat{p}_k^B(s_k) \rightarrow \hat{p}_k^{\text{II}}(s_k)$, $\tilde{p}_k^B(s_k) \rightarrow \tilde{p}_k^{\text{II}}(s_k)$, $\hat{s}_k^B \rightarrow \hat{s}_k^{\text{II}}$.

1. Регулятор структуры:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_k &= \begin{cases} d^{\min} & \text{при } \hat{p}_k^{\text{II}}(3) \leq \tilde{\lambda}^{\text{II}}, \\ d^{\max} & \text{при } \hat{p}_k^{\text{II}}(3) > \tilde{\lambda}^{\text{II}}, \end{cases} \quad g_k^* = \begin{cases} g^{\min} & \text{при } \hat{p}_k^{\text{II}}(3) \geq 1 - \tilde{\mu}^{\text{II}}, \\ g^{\max} & \text{при } \hat{p}_k^{\text{II}}(3) < 1 - \tilde{\mu}^{\text{II}}, \end{cases} \\ \tilde{\lambda}^{\text{II}} &= \frac{\lambda^{\text{II}}(d^{\max} + g^{\max})}{1 + \lambda^{\text{II}}(d^{\max} - d^{\min}) + \mu^{\text{II}}(g^{\max} - g^{\min})}, \quad \tilde{\mu}^{\text{II}} = \frac{\mu^{\text{II}}}{\tilde{\lambda}^{\text{II}}}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где g^* и \tilde{d} – соответственно оптимальное управление игрока П и предполагаемое им оптимальное управление игрока Б, основанные на наблюдениях игрока П; $\hat{p}_k^{\text{II}}(1)$ – апостериорная вероятность состояния структуры $s_k = 1$.

2. Классификатор структуры:

$$\hat{p}_k^{\text{II}}(s_k) = \frac{\vartheta_k^{\text{II}}(s_k)}{\sum_{s_k} \vartheta_k^{\text{II}}(s_k)}, \quad \hat{p}_0^{\text{II}}(s_0) = \begin{cases} 0.5 & \text{при } s_0 = 1, 2, \\ 0 & \text{при } s_0 = 3, \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\vartheta_k^{\text{II}}(1) = \tilde{p}_k^{\text{II}}(s_k) \pi^{\text{II}}(\tilde{s}^{\text{II}} | s_k), \quad s_k = \overline{1, 3};$$

$$\tilde{p}_{k+1}^{\text{II}}(1) = [\hat{p}(1) + \tilde{d} \hat{p}(3)]_k^{\text{II}},$$

$$\tilde{p}_{k+1}^{\text{II}}(2) = [\hat{p}(2) + \tilde{d} \hat{p}(3)]_k^{\text{II}}, \quad (2.20)$$

$$\tilde{p}_{k+1}^{\text{II}}(3) = [g^*(\hat{p}(1) + \hat{p}(2)) + (1 - 2\tilde{d})\hat{p}(3)]_k^{\text{II}}.$$

3. Идентификатор структуры:

$$\hat{s}_k^{\text{II}} = \arg \max_{s_k} \hat{p}_k^{\text{II}}(s_k). \quad (2.21)$$

Заключение. Представлены взаимосвязанные информационно-управляющие алгоритмы соседних участников группы БПЛА, наводящихся на группу неподвижных объектов по заданным траекториям. Часть объектов является истинными целями, часть – ложными целями, создавае-

мыми с помощью имитационных помех. Кроме того, противодействие осуществляется путем постановки маскирующих помех, прерывающих поступление информации в системе управления БПЛА.

Задача построения алгоритмов поставлена и решена как антагонистическая стохастическая многошаговая игра в чистых стратегиях в системах ССС [8] двух противников (игроков) Б и П, управляющих процессом наведения. Игрок Б оптимизирует свое управление по минимаксному критерию, а игрок П – по максиминному критерию, основываясь каждый на показаниях своих измерителей и индикаторов.

Алгоритмы игроков основаны на теории систем ССС. Алгоритм игрока Б осуществляет распознавание помеховых ситуаций, оценивание координат объектов и соседних участников группы БПЛА и управление БПЛА для выполнения требуемых точности наведения и дистанции между соседними БПЛА.

Алгоритм игрока П осуществляет распознавание и управление перерывами информации, ухудшая тем самым точность наведения и соблюдение требуемой дистанции между соседними БПЛА.

Рассмотренная задача представляет собой игру с неполной информацией, ненулевой суммой и без седловой точки вследствие неодинаковой информированности игроков о состоянии игры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдинов В.А., Бухалёв В.А., Скрынников А.А. Система взаимосвязанного управления группой беспилотных летательных аппаратов в условиях информационного противодействия // Изв. РАН. ТиСУ. 2022. № 6. С. 11–19.
2. Баханов Л.Е., Давыдов А.Н., Корниенко В.Н. и др. Системы управления вооружением истребителей. Основы интеллекта многофункционального самолета / Под ред. Е.А. Федосова. М.: Машиностроение, 2005.
3. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Оркин С.Д. Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. М.: Изд. МАИ, 2015.
4. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Наука, 1996.
5. Piers B. D., Swarder D. D. Bayes and Minimax Controllers for a Linear Systems for Stochastic Jump Parameters // IEEE Trans. AC-16. 1971. № 4. P. 677–685.
6. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М.: Мир, 1967.
7. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Игровое управление системами со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2021.
8. Moon J.A Sufficient Condition for Linear-Quadratic Stochastic Zero-Sum Differential Games for Markov Jump Systems // IEEE Trans. Autom. Control. 2019. V. 64. № 4. P. 1619–1626.
9. Оуэн Г. Теория игр. М.: Вузовская книга, 2007.
10. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.