

УПРАВЛЕНИЕ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
И В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 517.977

СИСТЕМА ВЗАИМОСВЯЗАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ¹

© 2022 г. В. А. Болдинов^{a,*}, В. А. Бухалёв^b, А. А. Скрынников^{a,c}

^a МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

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

^c ФАУ “ГосНИИАС”, Москва, Россия

*e-mail: viktorboldinov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 01.08.2022 г.

Рассматривается задача взаимосвязанного управления группой беспилотных летательных аппаратов, наводящихся на группу объектов, часть которых является ложными, создаваемыми с помощью имитационных помех и усиливаемыми маскирующими помехами, которые вызывают перерывы информации. Разработан информационно-управляющий алгоритм взаимодействующих беспилотных летательных аппаратов, осуществляющий распознавание помеховых ситуаций, оценивание координат объектов и наведение с требуемой точностью к заданной дистанции между соседними беспилотными летательными аппаратами. Приведен пример построения информационно-управляющего взаимосвязанного алгоритма в задаче наведения двух беспилотных летательных аппаратов на один и тот же объект, прикрываемый имитационной и маскирующей помехами.

DOI: 10.31857/S000233882206004X

Введение. Современные наземные, морские и воздушные объекты обладают высокоразвитыми эффективными системами информационного противодействия управлению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1–4].

Информационное противодействие создается с помощью *маскирующих* помех, предназначенных для “подавления” приемных устройств систем наведения БПЛА, и *имитационных* помех, способных дезориентировать БПЛА. Для защиты от противодействия кроме технических и алгоритмических способов и средств распознавания помех и соответствующего изменения технических характеристик систем наведения применяются различные тактические приемы, одним из которых является наведение *группы взаимодействующих* БПЛА [5].

Для повышения эффективности противодействия, а также из-за ограничений по электромагнитной совместимости при выполнении других задач объект осуществляет резкую внезапную и, как правило, скрытую перестройку параметров и характеристик противодействия, что приводит к возникновению случайных скачкообразных процессов в системах наведения БПЛА.

В настоящей статье рассматривается задача построения алгоритмов *взаимодействия* БПЛА в группе при *распознавании* помеховой ситуации и *оценивании* координат объектов и расстояния между соседними участниками группы БПЛА. Задача решается на основе теории систем со случайной скачкообразной структурой (ССС) [3, 4, 6–13].

1. Постановка задачи. Группа БПЛА наводится на некоторый объект. С учетом ложных целей число *одновременно* наблюдаемых объектов i в системе наведения каждого БПЛА равно m ; число классов объектов j равно n , из них первый класс – цель (Ц), остальные – различные помехи (П). В системе наведения производится *разделение* сигналов от пространственно разнесенных источников излучения и сигналов по информационным признакам различия по каналам. Предварительный анализ информации осуществляется отдельно в каждом канале, а затем выполняется ее

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

Таблица 1. Ситуации противодействия в СН БПЛА при захвате цели

s	$i = 1$	$i = 2$
1	$j = 1$ (Ц)	$j = 2$ (П)
2	$j = 2$ (П)	$j = 1$ (Ц)
3	$j = 2$ (П)	$j = 2$ (П)
4	0	0

комплексирование, в результате чего происходит распознавание текущей ситуации противодействия и оценивание пространственных координат объекта.

В зависимости от конкретных условий (тип системы наведения, класс объектов и пр.) в качестве используемых признаков могут быть выбраны различные пространственные, геометрические, кинематические, спектральные и энергетические информационные различительные признаки. При выборе признака различия основную роль играют три фактора: *сложность* определения признака, *точность* его оценивания и *инвариантность* к условиям применения. Идеальным вариантом является независимость характеристик признака от условий применения, приемлемым – незначительная зависимость от тех условий, которые в системе не определяются.

Выбранные признаки делятся на две группы: 1) континуальные (принадлежащие к непрерывному множеству значений) и 2) принадлежащие конечному множеству значений. Первая группа наблюдается с помощью измерителей, вторая – с помощью индикаторов. Число возможных ситуаций противодействия (состояний структуры $s(i)$), составляющих полную группу несовместных случайных событий, равно $N: s = \overline{1, N}$.

Состояния структуры представляют собой различные сочетания наблюдаемых объектов i и классов j . Например, множество возможных ситуаций противодействия (состояний структуры s), составляющих полную группу несовместных случайных событий для $m = 2, n = 2$, представлено в табл. 1.

Как видно из таблицы, s -я ситуация при $s = \overline{1, 3}$ состоит в том, что i -й объект принадлежит j -му классу ($j = 1$ – цель, $j = 2$ – ложная цель (помеха)), $i = 1, 2; j = 1, 2$. Ситуация $s = 4$ означает, что система наведения подавлена мощной шумовой помехой. Ситуации, когда подавлен только один из каналов ($i = 1$ или 2), а другой – нет, принципиально возможны, но их вероятность по сравнению с вероятностями перечисленных в таблице ситуаций ничтожно мала.

Динамика и измерение непрерывнозначных различительных признаков описываются линейными уравнениями (в дискретной форме), позволяющими применить фильтры Калмана для синтеза алгоритмов, что широко используется на практике при конструировании систем управления летательных аппаратов:

$$x_{k+1}(j) = A_k(j)x_k(j) + B_k(j)u_k(j) + H_k(j)w_k(j) + F_k(j)\xi_k(j), \quad (1.1)$$

$$z_k^{(i)}(j) = x_k(j) + \zeta_k(j), \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (1.2)$$

где $x_k(j)$ – вектор континуальных различительных признаков j -го класса объектов; $z_k^{(i)}(j)$ – вектор континуальных измерений различительных признаков i -го объекта; $\xi_k(j)$ и $\zeta_k(j)$ – векторы возмущений и помех – последовательности независимых случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и с ковариациями $G_k(j)$ и $Q_k(j)$ соответственно; $u_k(j)$ – вектор управляющих сигналов; $w_k(j)$ – вектор известных функций времени k ; $A_k(j), B_k(j), H_k(j), F_k(j)$ – матрицы известных коэффициентов соответствующих размерностей.

Различительные признаки, принадлежащие к конечному множеству, распознаются с помощью индикаторов признаков, которые используются для составления формул, описывающих индикаторы структуры s_k :

$$\begin{aligned} \pi_{k+1}(r_{k+1} | r_k, s_{k+1}) &= \prod_{v=1}^l \pi_{k+1}(r_{k+1}^{(v)} | r_k^{(v)}, s_{k+1}), \\ \pi_{k+1}(r_{k+1}^{(v)} | r_k^{(v)}, s_{k+1}) &= \begin{cases} 1 - \pi_{k+1}^{*(v)} & \text{при } r_{k+1}^{(v)} \neq r_k^{(v)}, \\ \pi_{k+1}^{*(v)} & \text{при } r_{k+1}^{(v)} = r_k^{(v)}, \end{cases} \\ \pi_{k+1}^{*(v)} &= \pi_k^{*(v)} e^{-\frac{\Delta t}{T}} + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right) \bar{\pi}_{k+1}(r_{k+1}^{(v)} | s_{k+1}), \\ r_k^{(v)} &= \overline{1, N}; \quad s_k = \overline{1, N}; \quad v = \overline{1, l}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где s_k – состояние структуры – марковская цепь, заданная вероятностями переходов из s_k в s_{k+1} : $q_k(s_{k+1} | s_k)$; r_k – состояние индикатора структуры, описываемое формулой (1.3); l – число индикаторов; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$; T – параметр инерционности индикатора; $\pi_{k+1}(r_{k+1}^{(v)} | r_k^{(v)}, s_{k+1})$ – вероятность показаний v -го индикатора структуры, представляющего собой условную марковскую цепь, которая описывается вероятностью перехода состояния индикатора из r_k в r_{k+1} при фиксированном состоянии структуры s_{k+1} ; $\bar{\pi}_{k+1}(r_{k+1}^{(v)} | s_{k+1})$ – известные установившиеся значения вероятностей *правильных* (при $r_{k+1} = s_{k+1}$) и *ошибочных* (при $r_{k+1} \neq s_{k+1}$) показаний индикатора.

Индикаторы структуры применяются в системах наведения для обнаружения и распознавания ситуаций противодействия и помех. Например, индикаторы скачков мощности и амплитуды предназначены для обнаружения факта отстрела инфракрасных и радиолокационных ловушек, а также включения форсажа двигателей истребителя при маневре, указывающего на увеличение его ускорения. Индикаторы, измеряющие отношение “сигнал–шум”, используются для обнаружения шумовых маскирующих помех, гребенчатые доплеровские фильтры – для разрешения целей в группе. Индикаторы таких геометрических признаков, как, например, площадь или конфигурация изображения объектов применяются в фокальной плоскости приемников телевизионных и тепловизионных систем, индикаторы эффективной площади рассеивания электромагнитного излучения – в радиолокационных системах наведения и др. [1, 4, 14].

Основными алгоритмическими характеристиками индикаторов являются *вероятность обнаружения* или *распознавания* и *время обработки информации* от момента поступления входного сигнала до момента принятия решения, характеризуемое параметром инерционности T .

В научно-технической литературе используются такие хорошо известные специалистам по теории и системам управления общепринятые понятия, как, например, “вероятность пропуска сигнала” и “вероятность ложной тревоги” в задачах различения двух альтернативных гипотез [4, 5, 15, 16].

Требуется построить алгоритм взаимосвязанного *распознавания* помеховых ситуаций, *оценивания* координат объекта и *определения* расстояния между соседними участниками *группы* БПЛА.

2. Алгоритм распознавания помеховых ситуаций, оценивания координат объекта и управления БПЛА. Информационно-управляющий алгоритм, основанный на теории ССС, состоит из пяти блоков [3, 4, 6–8]:

- классификатор структуры,
 - идентификатор структуры,
 - фильтр Калмана,
 - дисперсиометр,
 - регулятор,
- которые описываются следующими формулами.

1. *Классификатор структуры*:

$$\hat{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \frac{\vartheta_{k+1}(s_{k+1})}{\sum_{s_{k+1}} \vartheta_{k+1}(s_{k+1})}, \quad \hat{p}_0(s_0) = p_0(s_0), \quad (2.1)$$

$$\vartheta_{k+1}(s_{k+1}) \triangleq \tilde{p}_{k+1}(s_{k+1})\pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})\exp[-\Delta_{k+1}(s_{k+1})], \quad (2.2)$$

$$\Delta_{k+1}(s_{k+1}) \triangleq \left[\sum_{j=1}^m \sum_{j^*(s)\beta=1}^b \frac{(z^{j\beta} - \tilde{x}^{j^*(s)\beta})^2}{2\Theta^{j^*(s)\beta}} \right]_{k+1}, \quad (2.3)$$

где индекс $k+1$ у квадратной скобки $[\cdot]_{k+1}$ относится ко всем переменным внутри нее (т.е. z , \tilde{x} , Θ и s); $j^*(s) = \overline{1, n}$ – номер объекта $j = \overline{1, n}$, соответствующего номеру структуры $s = \overline{1, N}$; $\beta = \overline{1, b}$ – номер непрерывнозначного различительного признака;

$$\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \sum_{s_k=1}^N q_k(s_{k+1}|s_k)\hat{p}_k(s_k), \quad s_k = \overline{1, N}, \quad (2.4)$$

$$\Theta^{j^*(s)\beta} \triangleq [\tilde{R}^{j^*(s)\beta} + Q^{j^*(s)\beta}]_{k+1}, \quad (2.5)$$

где $\hat{p}_k(s_k)$ и $\tilde{p}_k(s_k)$ – соответственно апостериорная и прогнозируемая на один шаг вперед вероятности состояния структуры; $\tilde{x}_k^{j^*(s_k)\beta}$ – прогнозируемая оценка β -го различительного признака $j^*(s_k)$ -го объекта; $\tilde{R}_k^{j^*(s_k)\beta}$ – прогнозируемая дисперсия оценивания β -го признака $j^*(s_k)$ -го объекта; $Q_k^{j^*(s_k)\beta}$ – дисперсия ошибки измерения β -го признака $j^*(s_k)$ -го объекта.

Например, для частного случая, приведенного в табл. 1 ($m = 2, n = 2, N = 4$) и при двух ($b = 2$) непрерывнозначных различительных признаках $\beta = 1, 2$, формула (2.3) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{k+1}(1) &= \frac{1}{2} \sum_{\beta=1}^2 \left[\frac{(z^{1\beta} - \tilde{x}^{1\beta})}{\Theta^{1\beta}} + \frac{(z^{2\beta} - \tilde{x}^{2\beta})}{\Theta^{2\beta}} \right]_{k+1}, & \Delta_{k+1}(2) &= \frac{1}{2} \sum_{\beta=1}^2 \left[\frac{(z^{1\beta} - \tilde{x}^{2\beta})}{\Theta^{2\beta}} + \frac{(z^{2\beta} - \tilde{x}^{1\beta})}{\Theta^{1\beta}} \right]_{k+1}, \\ \Delta_{k+1}(3) &= \frac{1}{2} \sum_{\beta=1}^2 \left[\frac{(z^{1\beta} - \tilde{x}^{2\beta})}{\Theta^{2\beta}} + \frac{(z^{2\beta} - \tilde{x}^{2\beta})}{\Theta^{2\beta}} \right]_{k+1}, & \Delta_{k+1}(4) &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

2. Идентификатор структуры:

$$\hat{s}_k = \arg \max_{s_k} \hat{p}_k(s_k), \quad \tilde{s}_k = \arg \max_{s_k} \tilde{p}_k(s_k). \quad (2.7)$$

3. Фильтр Калмана:

$$\hat{X}_{k+1} = [\tilde{X} + \tilde{R}\Theta^{-1}(Z - \tilde{X})]_{k+1}, \quad (2.8)$$

$$\tilde{X}_{k+1} = [A\hat{X} + BU + HW]_k, \quad (2.9)$$

где \hat{X} , \tilde{X} , Z – блочные векторы с элементами соответственно $\hat{x}(j)$, $\tilde{x}(j)$, $z(j)$, описываемые формулами (1.1), (1.2); A , B , H – блочные диагональные матрицы с элементами $A(j)$, $B(j)$, $H(j)$ из (1.1); \tilde{R} и Θ – блочные диагональные матрицы с элементами $\tilde{R}^{j^*\beta}$ и $\Theta^{j^*\beta}$ из (2.5).

4. Дисперсиометр:

$$\hat{R}_{k+1} = [\tilde{R} + \tilde{R}\Theta^{-1}\tilde{R}]_{k+1}, \quad (2.10)$$

$$\tilde{R}_{k+1} = [A\hat{R}A^T + FGF^T]_k, \quad (2.11)$$

где

$$\Theta_k \triangleq \tilde{R}_k + Q_k, \quad (2.12)$$

F_k , G_k – блочные диагональные матрицы с элементами соответственно $F_k(j)$, $G_k(j)$ из (1.1); \hat{R}_k – блочная диагональная матрица с элементами $\hat{R}_k^{j^*\beta}$ (апостериорными дисперсиями оценивания β -го признака j^* -го объекта).

5. Регулятор. Представляет собой закон управления БПЛА u_k^* , зависящий от \hat{x}_k^{Π} , \hat{L}_k и их производных, где \hat{x}_k^{Π} – оценка вектора пространственных координат цели; \hat{L}_k – оценка расстояния

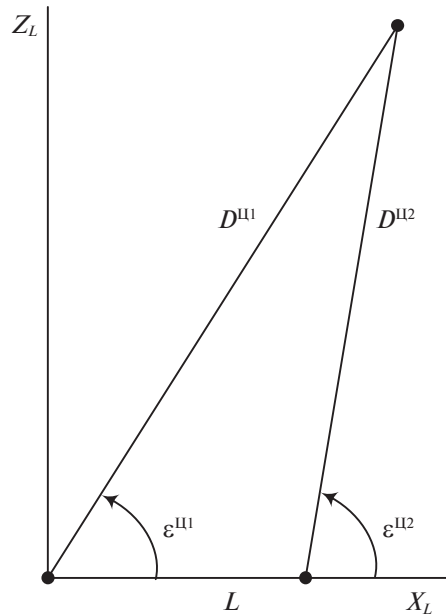


Рис. 1.

между двумя соседними БПЛА. Вектор x_k^{Π} — это часть общего вектора различительных признаков x_k , описываемого уравнением (1.1).

В зависимости от условий конкретной задачи (типы и характеристики объектов и БПЛА) закон управления может иметь различный вид. Оценка расстояния \hat{L}_k также может иметь различную форму зависимости от $\hat{x}_k^{\Pi 1}$ и $\hat{x}_k^{\Pi 2}$, вычисляемых в системах управления двух соседних БПЛА (см. п. 3).

3. Пример. В горизонтальной плоскости декартовой прямоугольной системы координат (z_L, x_L) , ось x_L которой совпадает с направлением L_k , с различных направлений на одну цель, прикрываемую одной ложной целью (“помехой”), наводится два БПЛА (рис. 1).

Непрерывнозначными различительными признаками являются: D_k^{Π} — дальность до цели; D_k^{Π} — дальность до помехи; ε_k^{Π} — угол пеленга цели; ε_k^{Π} — угол пеленга помехи. Различительные признаки принадлежат конечному множеству: “геометрические” σ^{Π} , σ^{Π} и “спектральные” λ^{Π} , λ^{Π} (σ^{Π} , σ^{Π} , λ^{Π} , λ^{Π} — константы). Таким образом, $m = 2$, $n = 2$, $b = 2$, $l = 2$.

Множество возможных помеховых ситуаций (состояний структуры s) представлено в табл. 2.

Системы наведения обоих БПЛА по двухсторонней линии связи обмениваются информацией об оценках дальностей и углов. На основании этой информации в обеих системах вычисляется расстояние L_k между БПЛА, которое затем регулируется в заданных пределах.

Число состояний структуры $N = 3$ (см. табл. 1). В общем случае структура s_k — марковская цепь с вероятностями переходов $q_k(s_{k+1} | s_k)$, которые учитывают возможность пересечения трасс объектов в фокальной плоскости приемного устройства в промежутке времени между двумя соседними измерениями. При малом Δt пересечение трасс фиксируется с высокой вероятностью.

Таблица 2. Ситуации противодействия в СН БПЛА при автосопровождении цели

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

Тогда происходит обмен номерами каналов L , и это равносильно тому, что пересечения как бы не произошло. Математически это формулируется в следующем виде: при $s_k, s_{k+1} = 1, 2$

$$q_k(s_{k+1}|s_k) = \begin{cases} 1 & \text{при } s_{k+1} = s_k, \\ 0 & \text{при } s_{k+1} \neq s_k, \end{cases} \quad (3.1)$$

а при $s_k = 3$

$$q_k(1|3) = q_k(2|3) = d, \quad q_k(3|1) = q_k(3|2) = g, \quad (3.2)$$

$$d, g \in [0, 0.5].$$

Представим математическую модель изменения дальностей, углов пеленга и угловых скоростей линии визирования до Ц и до П, также спектральных (λ) и геометрических (σ) информационных различительных признаков и всех их измеряемых значений уравнениями [3]

$$\begin{aligned} D_{k+1}^j &= [D^j - \Delta t v + \zeta^{Dj}]_k, \quad j = \text{Ц, П}; \quad D_0^{\text{Ц}} \neq D_0^{\text{П}}, \\ \varepsilon_{k+1}^j &= [\varepsilon^j + \Delta t \omega^j]_k, \quad \varepsilon_0^{\text{Ц}} \neq \varepsilon_0^{\text{П}}, \\ \omega_{k+1}^j &= \left[\omega^j + \frac{\Delta t}{\tau} (2\omega^j + u + w^j + \zeta^{\varepsilon j}) \right]_k, \quad \omega_0^{\text{Ц}} \neq \omega_0^{\text{П}}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\check{D}_k^i = [D^i + \zeta^{Dj}]_k [1 - \delta(s_k, 3)], \quad \check{\varepsilon}_k^i = [\varepsilon^i + \zeta^{\varepsilon j}]_k [1 - \delta(s_k, 3)], \quad (3.4)$$

$$\pi(\check{\lambda}_k^i | \lambda^j), \quad \pi(\check{\sigma}_k^i | \sigma^j); \quad i = 1, 2; \quad j = \text{Ц, П}. \quad (3.5)$$

Здесь символом $\check{}$ обозначены *измеряемые* значения соответствующих переменных: D_k^j – дальности БПЛА до Ц и до П; ε_k^j – углы пеленга Ц и П; ω_k^j – скорости изменения углов пеленга; u_k – сигнал управления БПЛА; w_k^j – известные детерминированные функции k ; ξ_k^{Dj} , $\xi_k^{\varepsilon j}$ – возмущения – последовательности независимых случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и с дисперсиями соответственно G^{Dj} и $G^{\varepsilon j}$; v_k – априорная оценка скорости сближения БПЛА с объектами – известная функция времени; ζ_k^{Dj} , $\zeta_k^{\varepsilon j}$ – ошибки измерений – последовательности независимых случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и с дисперсиями соответственно Q^{Dj} , $Q^{\varepsilon j} / (\tau_k^j)^2$; $\tau_k^j = D_k^j / v_k$ – время, оставшееся до конца наведения БПЛА соответственно на цель и на помеху.

Символ Кронекера

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

описывает перерывы поступления информации при подавлении приёмного устройства маскирующей помехой. Вероятности $\pi(\check{\lambda}_k^i | \lambda^j)$, $\pi(\check{\sigma}_k^i | \sigma^j)$ – соответственно вероятности ошибочных (при $\check{\lambda}^i \neq \lambda^j$, $\check{\sigma}^i \neq \sigma^j$) и правильных (при $\check{\lambda}^i = \lambda^j$, $\check{\sigma}^i = \sigma^j$) показаний индикаторов в первом и во втором каналах наблюдения спектрального λ и геометрического σ признаков; $i = 1, 2$; $j = \text{Ц, П}$.

Как видно из выражений для дисперсий ошибок измерения углов пеленга, они обратно пропорциональны квадратам дальностей до Ц и до П. Это объясняется тем, что в активных и полуактивных радиолокационных системах, а также в корреляционных оптико-электронных системах ошибки измерения угла пеленга – так называемое “блуждание центра отражения” – зависят от линейного размера объекта [12].

Информационно-управляющий алгоритм, согласно (2.1)–(2.12), с учетом (3.1) имеет следующий вид.

Классификатор структуры:

$$\hat{p}_k(s_k) = \frac{\vartheta_k(s_k)}{\sum_{s_k} \vartheta_k(s_k)}, \quad x\hat{p}_0(s_0) = \begin{cases} 0.5 & \text{при } s_0 = 1, 2, \\ 0 & \text{при } s_0 = 3, \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_k(1) &= \left[\tilde{p}(1)\pi^\lambda(\tilde{\lambda}^1|\lambda^{\text{II}})\pi^\sigma(\tilde{\sigma}^1|\sigma^{\text{II}})\pi^\lambda(\tilde{\lambda}^2|\lambda^{\text{II}})\pi^\sigma(\tilde{\sigma}^2|\sigma^{\text{II}})e^{-\Delta(1)} \right]_k, \\ \vartheta_k(2) &= \left[\tilde{p}(2)\pi^\lambda(\tilde{\lambda}^1|\lambda^{\text{II}})\pi^\sigma(\tilde{\sigma}^1|\sigma^{\text{II}})\pi^\lambda(\tilde{\lambda}^2|\lambda^{\text{II}})\pi^\sigma(\tilde{\sigma}^2|\sigma^{\text{II}})e^{-\Delta(2)} \right]_k, \\ \vartheta_k(3) &= \tilde{p}_k(3); \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta_k(1) &= \frac{1}{2} \left[[K^D(\tilde{D}^1 - \hat{D}^{\text{II}})]^2 + [K^\varepsilon(\tilde{\varepsilon}^1 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}})]^2 + [K^D(\tilde{D}^2 - \hat{D}^{\text{II}})]^2 + [K^\varepsilon(\tilde{\varepsilon}^2 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}})]^2 \right]_k, \\ \Delta_k(2) &= \frac{1}{2} \left[[K^D(\tilde{D}^1 - \hat{D}^{\text{II}})]^2 + [K^\varepsilon(\tilde{\varepsilon}^1 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}})]^2 + [K^D(\tilde{D}^2 - \hat{D}^{\text{II}})]^2 + [K^\varepsilon(\tilde{\varepsilon}^2 - \hat{\varepsilon}^{\text{II}})]^2 \right]_k, \\ \Delta_k(3) &= 0; \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{k+1}(1) &= \hat{p}_k(1) + d\hat{p}_k(3), \\ \tilde{p}_{k+1}(2) &= \hat{p}_k(2) + d\hat{p}_k(3), \\ \tilde{p}_{k+1}(3) &= g[\hat{p}_k(1) + \hat{p}_k(2)] + (1 - 2d)\hat{p}_k(3). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Идентификатор структуры:

$$\hat{s}_k = \arg \max_{s_k} \hat{p}_k(s_k), \quad s_k = \overline{1, 3}. \quad (3.10)$$

Фильтр дальности:

$$\begin{aligned} \hat{D}_{k+1}^j &= [\tilde{D}^j + (1 - \delta(\hat{s}, 3))K^{Dj}(\tilde{D}^{i(s)} - \tilde{D}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{D}_{k+1}^j &= [\hat{D}^j - \Delta tv]_k. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Фильтр углов пеленга:

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_{k+1}^j &= [\tilde{\varepsilon}^j + (1 - \delta(\hat{s}, 3))K^{\varepsilon j}(\tilde{\varepsilon}^{i(s)} - \tilde{\varepsilon}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{\varepsilon}_{k+1}^j &= [\hat{\varepsilon}^j - \Delta t \hat{\omega}^j]_k. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Фильтр угловых скоростей пеленга:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{k+1}^j &= [\tilde{\omega}^j + (1 - \delta(\hat{s}, 3))(K^{\omega j} + K^{\varepsilon j} \tau^{-1})(\tilde{\varepsilon}^{i(s)} - \tilde{\varepsilon}^j)]_{k+1}, \\ \tilde{\omega}_{k+1}^j &= [\hat{\omega}^j + \Delta t \tau^{-1}(2\hat{\omega}^j + u^* + w^j)]_k, \\ \hat{D}_0^j &= D_0^j; \quad \hat{\varepsilon}_0^j = \varepsilon_0^j; \quad \hat{\omega}_0^j = \omega_0^j, \\ i &= 1, 2; \quad s = 1, 2, 3; \quad j = \text{Ц, П}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

При $j = \text{Ц}$

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } \hat{s}_k = 1, \\ 2 & \text{при } \hat{s}_k = 2, \end{cases} \quad (3.14)$$

при $j = \text{П}$

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } \hat{s}_k = 2, \\ 2 & \text{при } \hat{s}_k = 1. \end{cases} \quad (3.15)$$

В формулах (3.11)–(3.13): u_k^* – оптимальное управление БПЛА, зависящее от оценок координат цели (см. блок Регулятор), $K_k^{\beta j}$ – так называемый коэффициент доверия, $\beta = D, \varepsilon, \omega; j = \text{Ц, П}$ (см. блок Дисперсиометр).

Как видно из рисунка, расстояние L_k между соседними БПЛА определяется как

$$L_k = [D^{\text{II1}} \sin \varepsilon^{\text{II1}} - D^{\text{II2}} \sin \varepsilon^{\text{II2}}]_k,$$

откуда следует выражение для оценки \hat{L}_k :

$$\hat{L}_k = [\hat{D}^{\text{II1}} \sin \hat{\varepsilon}^{\text{II1}} - \hat{D}^{\text{II2}} \sin \hat{\varepsilon}^{\text{II2}}]_k. \quad (3.16)$$

Дисперсиометр. Алгоритм дисперсиометра состоит из формул для коэффициентов $K_k^{\beta j}$, полученных в результате решений уравнений (2.10)–(2.12) для \hat{R}_k в *установившемся* режиме (т.е. при $\hat{R}_{k+1} = \hat{R}_k = \hat{R}$) [3]:

$$K^{Dj} = \Delta\omega^j \left(\sqrt{1 + \frac{G^{Dj}}{Q^{Dj}}} - 1 \right), \quad K^{\varepsilon j} = \sqrt{2K^{\omega j}}, \quad K^{\omega j} = \sqrt{\frac{G^{\omega j}}{Q^{\omega j}}}, \quad j = \text{Ц, П}, \quad (3.17)$$

где $\Delta\omega^j$ – ширина спектра дискретного белого шума ξ_k^{Dj} в (3.3).

Как видно из (3.16), чем меньше дисперсия ошибки измерения $Q^{\beta j}$ ($\beta = D, \varepsilon, \omega; j = \text{Ц, П}$), тем больше коэффициент доверия $K^{\beta j}$ и тем самым, как следует из (3.11)–(3.13), меньше разность между оценкой \hat{X}_k и измерением Z_k ($\hat{X}_k = \hat{D}_k^j, \varepsilon_k^j, \hat{\omega}_k^j; Z_k = \bar{D}_k, \bar{\varepsilon}_k$).

Регулятор. Регулятор – это закон управления движением БПЛА. В зависимости от конкретной задачи (типы и характеристики объектов и БПЛА и другие условия наведения) закон управления может иметь тот или иной вид из перечня известных стандартных методов наведения. Например, можно применить закон управления, задаваемый формулой [3]

$$u_k^* = - \left[\frac{c^\varepsilon}{\tau} (\hat{\varepsilon}^{\text{II}} - \bar{\varepsilon}) + c^\omega (\hat{\omega}^{\text{II}} - \bar{\omega}) + c^L (\hat{L} - \bar{L}) + c^v (\hat{v} - \bar{v}) \right]_k, \quad (3.18)$$

где $\bar{\varepsilon}_k, \bar{\omega}_k, \bar{L}_k, \bar{v}_k$ – требуемые значения переменных $\varepsilon_k, \omega_k, L_k, v_k$; $v \triangleq \hat{L}, \hat{v} = \hat{L}; c^\varepsilon, c^\omega, c^L, c^v$ – коэффициенты усиления обратной связи, определяемые способом параметрической оптимизации в процессе имитационного математического моделирования.

В целом, информационно-управляющий алгоритм каждого из соседних взаимодействующих БПЛА описывается замкнутой системой рекуррентных уравнений (3.6)–(3.18).

Заключение. Представлены взаимосвязанные информационно-управляющие алгоритмы соседних участников *группы* БПЛА, наводящихся на группу объектов, часть из которых – ложные цели, создаваемые с помощью имитационных помех. Кроме того, противодействие осуществляется путем постановки маскирующих помех, приводящих к перерывам информации в системах управления.

Алгоритмы, основанные на теории систем со случайной скачкообразной структурой [3, 5–11], осуществляют распознавание помеховых ситуаций, оценивание координат объектов и соседних участников группы БПЛА и управление БПЛА, обеспечивающее требуемые точность наведения и дистанцию между соседними БПЛА.

Приведен пример наведения двух соседних взаимодействующих БПЛА на одну и ту же цель, прикрываемую одной имитационной помехой, которая дезориентирует систему управления БПЛА, и маскирующей помехой, вызывающей перерывы информации в двух каналах наблюдения. В каждом из информационных каналов измеряются координаты объектов – дальности и углы пеленга, а также спектральные и геометрические различительные признаки наблюдаемых объектов.

Представлены взаимосвязанные информационно-управляющие алгоритмы двух соседних участников группы БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М.: Физматлит, 2003.
3. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2018.
4. Бухалёв В.А. Обработка информации и управление ракетами в условиях противодействия. М.: Изд-во Военно-воздушной акад. им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2009.
5. 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.
6. Бухалёв В.А. Распознавание, оценивание и управление в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Наука, 1996.
7. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Игровое управление системами со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2021.
8. Бухалёв В.А., Скрынников А.А., Болдинов В.А. Системы со случайной скачкообразной структурой. М.: ИД Академии Жуковского, 2022.
9. 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.
10. Kazakov Y.E., Artemiev V.M., Bukhalev V.A. Principles of the Construction on Complex Algorithms for Information Processing and Control in System with Stochastic Exchange Structure // II IFAC Sympos on Stochastic Control. Tallinn, 1986. Pt 1.
11. 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.
12. Mariton M. Jump Linear Systems in Automatic Control. N.Y.: CRC Press, 1990.
13. Kats I.Ya., Martynyuk A.A. Stability and Stabilization of Nonlinear Systems with Random Structures. CRC Press, 2003.
14. Дудник П.И., Чересов Ю.А. Авиационные радиолокационные устройства. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974.
16. Патрик Э. Основы теории распознавания образов. М.: Сов. радио, 1980.