

УПРАВЛЕНИЕ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
И В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 681.746.3

БАЙЕСОВСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА: ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
КОРРЕКЦИИ ВЕСА АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ<sup>1</sup>

© 2022 г. О. В. Ермолин<sup>a</sup>, С. М. Мужичек<sup>b</sup>, В. И. Павлов<sup>c,\*</sup>, Г. Г. Себряков<sup>b</sup>,  
А. А. Скрынников<sup>d</sup>, С. В. Толстых<sup>c</sup>

<sup>a</sup> ЦНИИ ВВС Минобороны России, Москва, Россия

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

<sup>c</sup> Тамбовский государственный технический ун-т, Тамбов, Россия

<sup>d</sup> МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

\*e-mail: vpavl@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 24.01.2022 г.

Принята к публикации 28.03.2022 г.

В рамках байесовского подхода разработан метод распознавания сигнально-помеховых ситуаций, возникающих при функционировании информационно-измерительной системы подвижного объекта. Предложен метод коррекции веса априорной информации в случае ее существенного отличия от апостериорной. Приведен вариант коррекции с использованием так называемых индикаторов сопутствующих признаков сигналов и помех. Показана целесообразность разработки новых методов обработки информации для конкретных практических приложений, в частности для информационно-измерительной системы подвижного объекта.

DOI: 10.31857/S0002338822040060

**Введение.** Информационно-измерительные системы (ИИС) подвижных объектов, как правило, подвержены действию естественных и преднамеренных помех в спектральном диапазоне их датчиков информации. Это, в частности, относится к бортовым радиолокационным станциям летательных аппаратов в силу открытости их информационных каналов [1–6]. Из-за действия помех, особенно преднамеренных [7–11], измерения фазовых координат относительного положения летательного аппарата и цели, выполняемые бортовой радиолокационной станцией, осуществляются с ошибками [12–14]. Одним из приемов обеспечения помехоустойчивости ИИС является адаптация их структуры к изменениям сигнально-помеховой обстановки [15–19]. Данную адаптацию целесообразно выполнять методами теории систем со случайной сменой структуры в пространстве состояний [20–23].

В [24] в рамках байесовского подхода разработан алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, возникающих в результате воздействия организованных помех на ИИС, в котором помимо измерителей фазовых координат и априорной информации об интенсивностях смены сигнально-помеховых ситуаций используются так называемые индикаторы сопутствующих признаков сигналов и помех [25, 26]. В данном алгоритме при задержках принятия решений предусмотрена возможность оперативной коррекции априорной информации, в том числе за счет использования индикаторов сопутствующих признаков помех. В статье на упрощенном примере применительно к бортовой радиолокационной станции летательного аппарата исследуется целесообразность коррекции веса априорной информации в алгоритме распознавания сигнально-помеховых ситуаций.

**1. Постановка задачи.** В качестве подвижного объекта рассматривается летательный аппарат, располагающий ИИС на базе бортовой радиолокационной станции. Математические модели

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-08-00091 а; 19-08-00487 а; 19-08-00502 а; 19-29-06077 мк).

**Таблица 1.** Классификация сигнально-помеховых ситуаций

$s$	Маскирующая помеха					Имитирующая помеха			
	ШШ	УШ	СШ	ХИ	...	УД	УС	МП	...
1	–	–	–	–		–	–	–	
2	+	–	–	–		+	+	–	
...									
$s$	–	–	–	–		+	–	–	
...									
$l$	–	–	+	+		–	–	+	
...									
$S$	–	+	–	–		–	+	–	

векторов фазовых координат подвижного объекта  $\mathbf{x}$ , сигналов измерений  $\mathbf{z}$  и индикации сопутствующих признаков сигналов и помех  $\mathbf{r}$ , размерность которых соответственно равна  $i_x, i_z, n_r$ , имеют вид

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}^{(s)}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \boldsymbol{\xi}_k), \quad (1.1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}^{(s)}(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\zeta}_k), \quad (1.2)$$

$$\mathbf{r}_k = \boldsymbol{\pi}(J_k, Pr_k). \quad (1.3)$$

Здесь  $k$  – номер дискрета времени;  $\mathbf{u}$  – вектор управлений размерностью  $n_u$ ;  $\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\zeta}$  – соответственно векторы шумов состояния и измерения с размерностями  $n_\xi = i_x, n_\zeta = i_z$ ;  $\mathbf{f}, \mathbf{h}$  – известные вектор-функции векторных аргументов;  $\boldsymbol{\pi}(J_k, Pr_k)$  – матрица-строка условных вероятностей переходов индикаторов из состояния  $r_{k-1}$  в состояние  $r_k$  с элементами  $\pi_{n,k}(r_k | r_{k-1}, Pr) = P[r_k, k, J_n, Pr | r_{k-1}, k-1, J_n, Pr]$ ,  $n = \overline{1, N}$  – номер признака;  $P[\cdot]$  – символ вероятности;  $J_n = q(Pr, k | s, k)$  – входная индикаторная функция, характеризующая наличие признака организованной помехи;  $Pr$  – регистрируемый признак,  $Pr = 0, 1$ ;  $s$  – номер сигнально-помеховой ситуации (см. табл. 1), каждой из которых соответствует аналогично обозначенная, предварительно разработанная структура ИИС,  $s = \overline{1, S}$ ;  $\mathbf{x}_k = [x_{1,k}, \dots, x_{i,k}]^\top$  – вектор фазовых координат подвижного объекта,  $i = \overline{1, I}$ ,  $I$  – количество измеряемых фазовых координат.

Алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, в котором предусматривается возможность коррекции веса априорной информации, имеет следующий вид [24]:

$$\hat{P}_k^{(s)} = \frac{\tilde{P}_k^{(s)} \boldsymbol{\pi}(J_k, Pr_k) \exp[-0.5g^{(s)}(\mathbf{z})]}{\sum_{s=1}^S \tilde{P}_k^{(s)} \boldsymbol{\pi}(J_k, Pr_k) \exp[-0.5g^{(s)}(\mathbf{z})]}, \quad (1.4)$$

$$\tilde{P}_k^{(s)} = \hat{P}_{k-1}^{(s)} - B\Delta t \left( \hat{P}_{k-1}^{(s)} \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq l}}^S \tilde{\gamma}^{(sl)} - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq s}}^S \tilde{\gamma}^{(ls)} \hat{P}_{k-1}^{(l)} \right), \quad B = \frac{1}{b\Delta\tau + 1}, \quad (1.5)$$

$$g^{(s)}(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^I g^{(s)(i)}(z^{(i)}), \quad s = \overline{1, S}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (1.6)$$

$$g^{(s)(i)}(z^{(i)}) = \left[ \frac{z^{(i)} - \hat{x}^{(s)(i)}}{\sigma^{(i)}} \right]^2, \quad (1.7)$$

$$\hat{s} = \arg \max_S (\hat{P}_k^{(s)}). \quad (1.8)$$

**Таблица 2.** Выходные сигналы информационных устройств

$s$	Измеритель				Индикатор			
	$\alpha\beta$	$D$	$V$	...	ИМ	СИ	ЧФ	...
1	$\alpha\beta$	$D$	$V$		0	0	0	
2	$\alpha\beta$	$\sigma_D$	$\sigma_V$		1	0	0	
...								
$s$	$\alpha\beta$	$D_{и}$	$V_{и}$		1	1	0	
...								
$l$	$\alpha\beta$	$\sigma_D$	$\sigma_V$		1	1	1	
...								
$S$	$\alpha\beta$	$\sigma_D$	$\sigma_V$		1	0	1	

Здесь  $z^{(i)}$ ,  $\sigma^{(i)}$  – соответственно выходной сигнал  $i$ -го измерителя и его среднего квадратического отклонения;  $\hat{x}^{(s)(i)}$  – среднее значение  $i$ -й фазовой координаты в  $s$ -й сигнально-помеховой ситуации;  $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ ,  $\tilde{\gamma}^{(sl)}$  – априорные интенсивности смены сигнально-помеховых ситуаций;  $b$  – оптимизируемый коэффициент;  $\Delta t$  – промежуток времени от момента изменения состояния любого из индикаторов сопутствующих признаков помех до момента изменения номера структуры  $s$  в соответствии с критерием (1.8);  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ .

Требуется на основании (1.1)–(1.8) определить степень влияния соответствия априорных  $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ ,  $\tilde{\gamma}^{(sl)}$  и фактических  $\gamma^{(ls)}$ ,  $\gamma^{(sl)}$  интенсивностей смены сигнально-помеховых ситуаций на эффективность принятия решения о сложившейся сигнально-помеховой ситуации и соответственно номере структуры ИИС подвижного объекта. Также требуется предложить рациональный вариант коррекции веса априорной информации в случаях ее несоответствия фактической.

**2. Вариант исследования алгоритма распознавания сигнально-помеховых ситуаций.** В общем случае основными измерительными каналами бортовой радиолокационной станции летательного аппарата являются угломерный  $\alpha\beta$ , дальности  $D$  и скорости сближения  $V$  с целью [27]. В качестве организованных помех измерительным каналам могут применяться маскирующие – широкополосные шумовые (ШШ), узкополосные шумовые (УШ), скользящие шумовые (СШ), хаотические импульсные (ХИ) и др., а также имитирующие – уводящие по дальности (УД), скорости (УС), мерцающие (МП) и др. в различных сочетаниях. При воздействии помех могут наблюдаться такие явления, как скачкообразное увеличение мощности принимаемого сигнала, увеличение количества принимаемых импульсов, интенсивное изменение частоты и др. Подобные явления могут регистрироваться соответствующими устройствами, называемыми индикаторами сопутствующих признаков – индикатором мощности (ИМ), счетчиком импульсов (СИ), частотным фильтром (ЧФ) и др.

Пусть по результатам предварительного анализа определены: перечень организованных помех; возможные сигнально-помеховые ситуации, составляющие полную группу несовместных событий; априорные интенсивности смены  $\tilde{\gamma}^{(sl)}$  из  $s$ -й в  $l$ -ю и  $\tilde{\gamma}^{(ls)}$  из  $l$ -й в  $s$ -ю сигнально-помеховых ситуаций; множество  $N$  сопутствующих признаков  $Pr$  воздействия помех на ИИС. Вариант классификации сигнально-помеховых ситуаций при функционировании ИИС показан в виде табл. 1. Ожидаемые выходные сигналы измерителей и индикаторов сопутствующих признаков в соответствующих ситуациях приведены в табл. 2. На рис. 1 представлен фрагмент графа возможных взаимных переходов между ситуациями, а на рис. 2 – возможная реализация их смены.

Исследование алгоритма (1.4)–(1.8) осуществлялось следующим образом. Моделировалось движение летательного аппарата и функционирование его бортовой радиолокационной станции в беспомеховой обстановке в соответствии с рекомендациями из [27]. Воздействие организованных помех моделировалось путем изменения в случайные моменты времени сигнально-помеховых ситуаций из табл. 1. При этом априорные интенсивности переходов  $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ ,  $\tilde{\gamma}^{(sl)}$  назначались в соответствии с правилами постановки помех, в то время как фактические  $\gamma^{(ls)}$ ,  $\gamma^{(sl)}$  задавались с

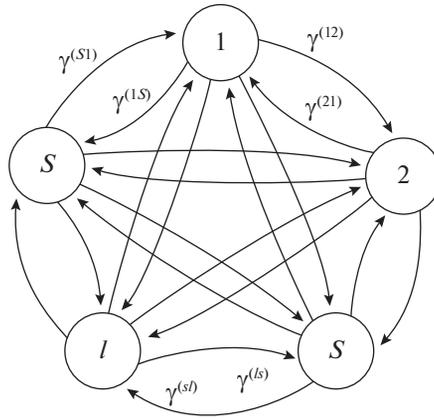


Рис. 1. Граф переходов

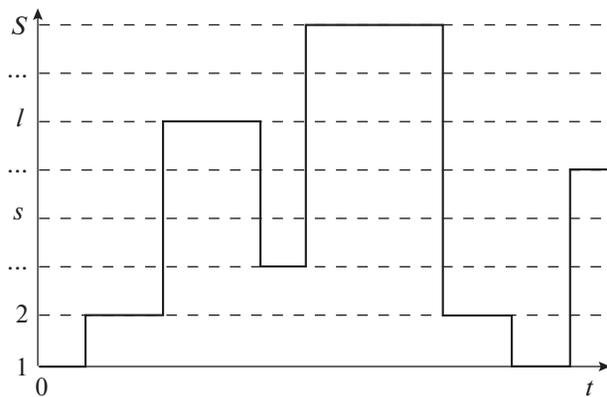


Рис. 2. Реализация смены структур

помощью ключа на базе датчика случайных чисел. Предполагалось, что воздействие организованных помех приводило к существенному изменению в выражении (1.7)  $\sigma^{(i)}$  из-за действия маскирующих и  $z^{(i)}$  из-за действия имитирующих помех.

Моделирование функционирования индикаторов сопутствующих признаков сигналов и помех является предметом отдельного исследования и в данной статье не рассматривается. Элементы матрицы  $\pi(J_k, Pr_k)$  условных вероятностей переходов индикаторов из состояния  $r_{k-1}$  в состояние  $r_k$  задавались в соответствии с физической сущностью воздействия помех на информационные каналы бортовой радиолокационной станции летательного аппарата.

В качестве показателей эффективности принятия решения о сложившейся сигнально-помеховой ситуации выступали: задержка  $\Delta\tau$  – промежуток времени от момента изменения состояния любого из индикаторов сопутствующих признаков помех до момента изменения номера  $s$  в соответствии с критерием (1.8); уровень вероятности  $\hat{P}_k^{(s)}$  сложившейся сигнально-помеховой ситуации относительно других ситуаций.

В процессе исследования рассматривались случаи изменения сигнально-помеховых ситуаций, при которых наблюдались низкие интенсивности шумов измерителей и корректное функционирование обнаружителей сопутствующих признаков помех. В первом случае априорно оцениваемые интенсивности переходов  $\tilde{\gamma}^{(sl)}$ , входящие в (1.5), соответствовали фактическим  $\gamma^{(sl)}$ . Время, затрачиваемое алгоритмом на принятие правильного решения, составляло величину порядка  $0.01 < \Delta\tau < 0.05$ , а значения апостериорных вероятностей ситуаций, складывающихся в текущий момент времени, находились в пределах  $0.95 < \hat{P}_k^{(s)} < 0.99$ . В описанных условиях

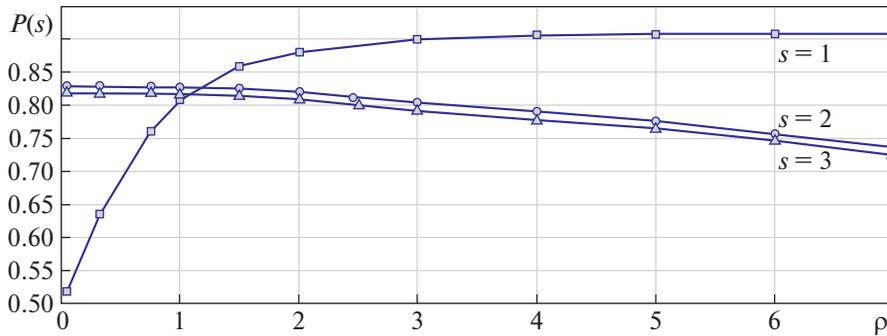


Рис. 3. Апостериорные вероятности структур

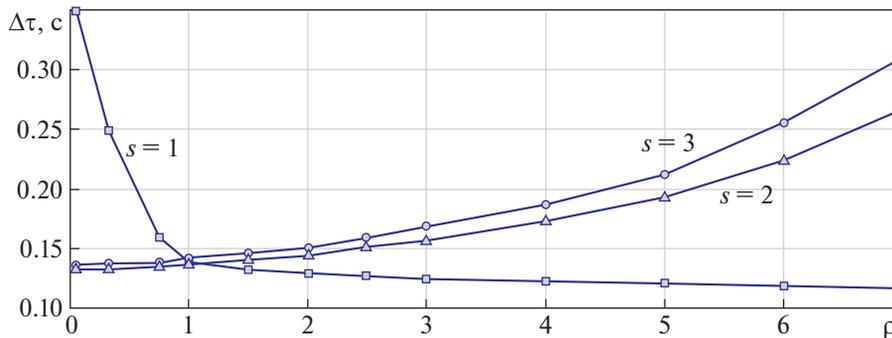


Рис. 4. Задержка принятия решения

алгоритм распознавания по своим динамическим характеристикам близок к ключевой схеме, что полностью подтверждает его работоспособность. Характеристики алгоритма существенно превосходят соответствующие характеристики оператора.

Во втором случае использовалась ложная априорная информация о переходах из  $s$ -й в  $l$ -ю помеховую ситуацию. Значения апостериорных вероятностей фиксировались после принятия решения об изменении помеховой ситуации. На рис. 3 и 4 показаны соответственно графики изменения  $\hat{P}_k^{(s)}$  и  $\Delta\tau$  в зависимости от  $\rho = \tilde{\gamma}^{(ls)}/\gamma^{(ls)}$  для различных значений  $b = 1 \dots 100 \text{ с}^{-1}$  в формуле (1.5). Моделирование проводилось на примере трех ( $S = 3$ ) сигнально-помеховых ситуаций с использованием одного измерителя и одного индикатора сопутствующего признака помехи. При этом ложная интенсивность переходов задавалась только в первую ситуацию ( $\gamma^{(s1)} = \text{false}$ ).

Из анализа графиков на рис. 3 и 4 можно сделать следующие выводы: при малых интенсивностях шумов измерителей и корректном функционировании индикаторов сопутствующих признаков причиной задержек в принятии решения о смене структуры ИИС подвижного объекта является несоответствие априорных и фактических интенсивностей смены ситуаций. Ошибки при назначении априорных интенсивностей переходов порядка  $0.5 < \rho < 5$  оказывают слабое влияние на работу алгоритма, однако приводят к “затяжке” в принятии правильного решения до величины  $\Delta\tau \approx 0.2 \text{ с}$ . Ложные решения появляются при значениях  $\rho < 0.1$  или  $\rho > 10$ , т.е. при априорных ошибках в 10 и более раз. Уменьшение  $\Delta\tau$  и соответственно увеличение  $\hat{P}_k^{(s)}$  может быть достигнуто путем оперативной коррекции веса априорной информации, например, путем введения коэффициента  $B$  в формуле (1.5). При этом снижение веса априорной информации для алгоритма (1.4)–(1.8) более чем в 5 раз нецелесообразно.

**Заключение.** Информационные системы подвижных объектов с открытыми входными каналами весьма часто функционируют в условиях сложной и изменчивой сигнально-помеховой обстановки. Для корректного функционирования информационных систем априорная информация о характеристиках помех становится особенно актуальной при их большой интенсивности.

Для случая, когда априорная информация является ложной, в статье предложен метод коррекции ее веса в алгоритме управления структурами информационной системы. Поиск правил решения (алгоритмов обработки информации), обеспечивающих минимизацию условного риска при изменяющихся параметрах сигналов и помех в процессе функционирования ИИС подвижных объектов, является актуальной задачей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба В. С.* Анализ состояния и тенденций развития бортовых РЛС авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 11. С. 2–15.
2. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / Под ред. П.И. Дудника. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
4. *Нечаев Е.Е., Дерябин К.С.* Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 90–105.
5. *Купряшкин И.Ф., Лихачёв В.П., Рязанцев Л.Б.* Малогабаритные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. М.: Радиотехника, 2020. 280 с.
6. *Буйлов Е.Н., Горшков С.А.* Моноимпульсный радиолокатор сопровождения по дальности и угловым координатам с широкополосным зондирующим сигналом // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. С. 1–24.
7. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2013. 232 с.
8. *Куприянов А.И., Шустов Л.Н.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.
9. *Леньшин А.В.* Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. Воронеж: Научная книга, 2014. 590 с.
10. *Емельянов Ю.* Взгляды руководства ВС США на ведение электронной войны в операциях XXI века с использованием сил воздушно-космического нападения // Зарубежное военное обозрение. 2015. № 9. С. 63–72.
11. *Погодин С.* Обновление парка самолетов электронной войны ВВС США // Зарубежное военное обозрение. 2020. № 3. С. 55–58.
12. *Артюшенко В.М., Воловач В.И.* Статистические характеристики смеси сигнала и аддитивно-мультипликативных помех с негауссовским характером распределения // Радиотехника. 2017. № 1. С. 95–102.
13. *Klemm R.* Principles of Space-Time Adaptive Processing, 3rd ed. Radar, Sonar, Navigation and Avionics. Ser. 21. The Institution of Electrical Engineers and Technology. UK, 2006. 670 p.
14. *Поздняков А.А., Шаталов А.А., Шаталова В.А.* Алгоритм распознавания медленно и быстро флуктуирующих целей на фоне помех многочастотной РЛС с ФАР // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. Вып. 2(22). С. 85–95.
15. *Abramovich Y.I., Spenser N.K., Gorokhov A.Y.* A Modified GLRT and AMF Framework for Diagonally Loaded and Fast Maximum-Likelihood Adaptive Detectors // IEEE Trans. on Aerospace and Electr. Systems. 2007. V. 43. № 3. P. 1017–1051.
16. *Анохин В.Д., Фаузи С., Кильдюшевская В.Г.* Обработка радиолокационных сигналов на фоне комбинированных помех // Радиотехника. 2009. № 5. С. 133–135.
17. *Макаров П.А., Колтышев Е.Е., Мухин В.В., Сусяков Д.Ю.* Адаптивная пространственно-временная обработка сигнала для селекции наземных движущихся целей в моноимпульсной РЛС // Вестник воздушно-космической обороны. 2014. № 4. С. 55–67.
18. *Xu J., Zhu S., Liao G.* Space-time-range Adaptive Processing for Airborne Radar Systems // IEEE Sensors J. 2015. V. 15. № 3. P. 1602–1610.
19. *Peto T., Seller R.* Space-time Adaptive Cancellation in Passive Radar Systems // Intern. J. Antennas Propag. 2018. V. 2018. P. 1–16.
20. *Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалёв В.А.* Анализ систем случайной структуры. М.: Физматлит, 1993. 272 с.
21. *Бухалёв В.А.* Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит. 2013. 188 с.

22. Болдинов В.А., Бухалёв В.А., Скрынников А.А. Игровое управление случайной скачкообразной структурой объекта в чистых стратегиях // Изв. РАН. ТиСУ. 2020. № 4. С. 18–27.
23. Павлов В.И. Синтез помехоустойчивых информационных систем методами теории систем со случайной структурой // Радиотехника. 2000. № 3. С. 89–92.
24. Muzhichek S.M., Sebryakov G.G., Pavlov V.I., Tolstych S.V., Kenzhekhanova M.B. Bayesian Recognition of a Moving Object Information-measuring System State: A Priori Information Weight Correction // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering: 2020 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA 2020). Moscow, 2020.
25. Бухалёв В.А. Рекуррентные алгоритмы распознавания и оценивания состояния динамического объекта по информации от измерителей и индикаторов // Изв. АН. Техн. кибернетика. 1992. № 1. С. 148–156.
26. Павлов В.И. Оптимальное обнаружение изменения свойств случайных последовательностей по информации измерителя и индикатора // АиТ. 1998. № 1. С. 86–94.
27. Авиационные системы радиоуправления. Т. 1. Принципы построения систем радиоуправления. Основы синтеза и анализа / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 192 с.