

ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ВЕСА АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В БАЙЕСОВСКОМ АЛГОРИТМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В. И. Павлов¹✉, Т. Ю. Дорохова¹, С. В. Артемова², С. В. Толстых¹

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
pravl@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;*

*кафедра КБ-1 «Защита информации» (2),
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия*

Ключевые слова: априорная информация; информационно-измерительная и управляющая система; оперативная коррекция.

Аннотация: Предложен новый метод оперативной коррекции веса априорной информации в байесовском алгоритме распознавания состояния информационно-измерительной и управляющей системы, повышающий ее помехоустойчивость. В методе применяются так называемые индикаторы сопутствующих признаков сигналов и помех. Указан признак несоответствия действительности априорной информации в текущей сессии функционирования информационной системы. Предложенный метод является универсальным и применим, в том числе к информационным системам с открытыми входными каналами.

Обозначения

\mathbf{x} – вектор фазовых координат объекта;
 \mathbf{z} – вектор сигналов измерений;
 \mathbf{r} – вектор индикации сопутствующих признаков сигналов и помех;
 \mathbf{u} – вектор управлений объектом;
 ξ – вектор шумов состояния объекта;
 ζ – вектор шумов измерений;
 J – индикаторная функция входного сигнала;
 P_r – признак сигнала (помехи);
 k – шаг счета;
 n – номер признака помехи;
 r – выходной сигнал индикатора помехи;
 σ – СКО выходного сигнала измерителя;
 I – количество измеряемых фазовых координат;

s – номер сигнально-помеховой ситуации/структуры ИИУС;
 N – множество сопутствующих признаков P_r воздействия помех на ИИУС;
 π – матрица условных вероятностей переходов индикаторов помех;
 d – оптимизируемый коэффициент;
 Δt – промежуток времени от момента изменения состояния любого из индикаторов сопутствующих признаков помех до момента изменения номера ситуации s ;
 $\hat{P}_k^{(s)}$ – вероятность сложившейся сигнально-помеховой ситуации;
 \wedge – знак оценки;
 \sim – знак априорного значения.

Введение

Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС), получившие широкое распространение при управлении технологическими процессами, на транспорте, в системах радиолокации, связи, как правило, подвержены действию естественных и преднамеренных помех в спектральном диапазоне их датчиков информации. Из-за действия помех, особенно преднамеренных, измерения фазовых координат процессов (объектов), выполняемые ИИУС, как правило,

осуществляются с ошибками [1]. Одним из приемов обеспечения помехоустойчивости ИИУС является адаптация их структуры к изменениям сигнально-помеховой обстановки, которую целесообразно выполнять методами теории систем со случайной сменой структуры в пространстве состояний [2, 3]. В соответствии с данной теорией необходимо предварительно классифицировать возможную при функционировании ИИУС сигнально-помеховую обстановку и в последующем выполнять распознавание складывающейся в текущий момент времени сигнально-помеховой ситуации.

В работе [4] разработан байесовский алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, возникающих в результате воздействия помех на информационно-измерительную систему, в котором помимо измерителей фазовых координат объекта и априорной информации об интенсивностях смены сигнально-помеховых ситуаций используются так называемые индикаторы сопутствующих признаков (ИСП) сигналов и помех [5, 6]. Исследования алгоритма показали, что одной из причин снижения достоверности распознавания, а также увеличения задержек в принятии решения о сложившейся сигнально-помеховой ситуации является существенное несоответствие между априорной и апостериорной информацией. В данном алгоритме при задержках принятия решений предусмотрена возможность оперативной коррекции априорной информации, в том числе за счет использования ИСП помех. Достоинством алгоритма является повышение достоверности и сокращение задержки в принятии решений, недостатком – снижение веса всего массива априорной информации при принятии последующего решения.

В настоящей статье предлагается новый метод коррекции веса априорной информации в байесовском алгоритме распознавания сигнально-помеховых ситуаций. Метод рассматривается на примере бортовой радиолокационной станции подвижного объекта в силу открытости и, соответственно, подверженности помехам ее информационных каналов. Выбор примера обусловлен как высоким уровнем развития науки и техники в данной предметной области, так и разнообразием условий функционирования технических средств, в том числе из-за воздействия естественных и преднамеренных помех. Обеспечение требуемой эффективности функционирования ИИУС во многих других предметных областях может быть реализовано по аналогии или в результате упрощения.

Постановка задачи

В качестве подвижного объекта рассматривается летательный аппарат, располагающий ИИУС на базе бортовой радиолокационной станции. Векторы фазовых координат летательного аппарата \mathbf{x} , сигналов измерений \mathbf{z} и индикации сопутствующих признаков сигналов и помех \mathbf{r} имеют вид моделей:

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

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}^{(s)}(\mathbf{x}_k, \zeta_k); \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_k = \boldsymbol{\pi}(J_k, \text{Pr}_k), \quad (3)$$

где \mathbf{f} , \mathbf{h} – известные вектор-функции векторных аргументов; $\boldsymbol{\pi}(J_k, \text{Pr}_k)$ – матрица условных вероятностей переходов индикаторов из r_{k-1} в r_k состояние с элементами $\pi_n(J_k, \text{Pr}_k) = \pi_n(r_k, k | J_{n,k-1}, \text{Pr}, r_{k-1}, k-1)$, $J_{n,k} = q_n(\text{Pr}, k | s_k^T, k)$ – входная индикаторная функция, характеризующая наличие признака преднамеренной помехи, $n = 1, N$; Pr – регистрируемый признак, $\text{Pr} = 0, 1$; $s_k^T = [s_{1,k}, \dots, s_{k,k}]$ – вектор множества скалярных индексов возможных помеховых ситуаций и соот-

ветствующих им структур ИИУС; s – номер структуры (состояния) информационно-измерительной системы, $s = \overline{1, S}$; S – число структур; $x_k^T = [x_{1,k}, \dots, x_{i,k}]$ – вектор множества скалярных значений i -й фазовой координаты подвижного объекта, $i = \overline{1, I}$.

По итогам анализа возможной помеховой обстановки определены: перечень преднамеренных помех; возможные сигнально-помеховые ситуации, составляющие полную группу несовместных событий; априорные интенсивности смены $\tilde{\gamma}^{(s_l)}$ из s -й в l -ю и $\tilde{\gamma}^{(l_s)}$ – из l -й в s -ю сигнально-помеховых ситуаций; множество N сопутствующих признаков R_T воздействия помех на ИИУС. Вариант классификации сигнально-помеховых ситуаций при функционировании ИИУС показан в виде табл. 1, ожидаемые выходные сигналы измерителей и ИСП в соответствующих ситуациях – в табл. 2, в которых обозначены: ШШ, УШ, СШ – соответственно широкополосная, узкополосная, скользящая шумовые помехи; ХИ – хаотическая импульсная помеха; УД, УС, УН – соответственно удаляющие по дальности, скорости, направлению помехи; $\alpha\beta$, D , V – соответственно измерители угла, дальности и скорости сближения с лоцируемым объектом; ИМ, СИ, ЧФ – соответственно индикатор мощности, счетчик импульсов, частотный фильтр, выступающие в роли индикаторов сопутствующих признаков помех. На рисунке 1 показан фрагмент графа возможных взаимных переходов между ситуациями, на рис. 2 – возможная реализация их смены.

Таблица 1

Классификация сигнально-помеховых ситуаций

s	Маскирующие помехи					Имитирующие помехи			
	ШШ	УШ	СШ	ХИ	...	УД	УС	УН	...
1	–	–	–	–		–	–	–	
2	+	–	–	–		+	+	–	
...									
s	–	–	–			+	–	–	
...									
l	–	–	+	+		–	–	+	
...									
S	–	+	–	–		–	+	–	

Таблица 2

Выходные сигналы информационных устройств

s	Измерители				Индикаторы			
	$\alpha\beta$	D	V	...	ИМ	СИ	ЧФ	...
1	$\alpha\beta$	D	V		0	0	0	
2	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	0	0	
...								
s	$\alpha\beta$	D_n	V_n		1	1	0	
...								
l	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	1	1	
...								
S	$\alpha\beta$	σ_D	σ_V		1	0	1	

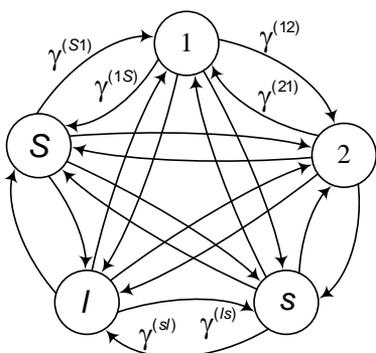


Рис. 1. Граф переходов сигнально-помеховых ситуаций

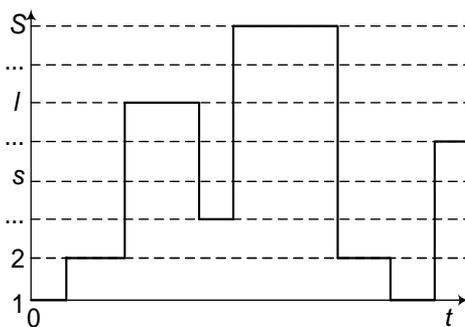


Рис. 2. Вариант реализации смены сигнально-помеховых ситуаций

Алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций

Алгоритм распознавания сигнально-помеховых ситуаций, в котором предусматривается возможность коррекции веса априорной информации, имеет вид [4]:

$$\hat{P}_k^{(s)} = \left[\frac{\tilde{P}^{(s)} \pi(J, Pr) \exp[-0,5 g^{(s)}(z)]}{\sum_{s=1}^S \tilde{P}^{(s)} \pi(J, Pr) \exp[-0,5 g^{(s)}(z)]} \right]_k; \quad (4)$$

$$\tilde{P}_k^{(s)} = \left[\hat{P}^{(s)} - D \Delta t \left(\hat{P}^{(s)} \sum_{s=1 \neq l}^S \tilde{\gamma}^{(sl)} - \sum_{l=1 \neq s}^S \tilde{\gamma}^{(ls)} \hat{P}^{(l)} \right) \right]_{k-1}; \quad D = \frac{1}{d \Delta t + 1}; \quad (5)$$

$$g^{(s)}(z) = \sum_{i=1}^I g^{(s)(i)}(z^{(i)}), \quad s = \overline{1, S}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (6)$$

$$g^{(s)(i)}(z^{(i)}) = \left[\frac{z^{(i)} - \hat{x}^{(s)(i)}}{\sigma^{(i)}} \right]^2; \quad (7)$$

$$\hat{s} = \arg \max_s \left(\hat{P}_k^{(s)} \right), \quad (8)$$

где $z^{(i)}, \sigma^{(i)}$ – соответственно выходной сигнал i -го измерителя и его СКО; $\hat{x}^{(s)(i)}$ – среднее значение i -й фазовой координаты в s -й сигнально-помеховой ситуации; $\tilde{\gamma}^{(ls)}, \tilde{\gamma}^{(sl)}$ – априорные интенсивности смены сигнально-помеховых ситуаций из s -й в l -ю и наоборот из l -й в s -ю соответственно; Δt – промежуток времени от момента изменения состояния любого из ИСП помех до момента изменения номера ситуации s в соответствии с критерием (8); Δt – длительность шага счета, $\Delta t = t_k - t_{k-1}$.

Требуется на основании (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 предложить рациональный вариант коррекции веса априорной информации в случаях ее несоответствия фактической.

Сущность предлагаемого варианта оперативной коррекции априорной информации

Эффективность применения байесовских алгоритмов в ИИУС существенно зависит от соответствия реальности априорной информации в текущий момент времени. Проблема заключается в том, что для значимого изменения априорной информации требуется статистика, то есть неизбежные временные затраты, что для критически важных ИИУС неприемлемо. Снижение веса всего массива априорной информации в существующем алгоритме в соответствии с выражением (5) весьма положительно сказывается на достоверности и скорости принятия решений в краткосрочной перспективе, однако при последующих решениях в случае большой интенсивности шумов измерителей из-за воздействия помех (большие значения $\sigma^{(i)}$ в выражении (7)) значимость априорной информации понижается. Сущность предлагаемого варианта оперативной коррекции априорной информации заключается в трансформации выражения (5) для априорной вероятности s -й сигнально-помеховой ситуации, включая коэффициент D и область его применения.

При изменении состояния (выходного сигнала) любого из ИСП алгоритм (1) – (8) с некоторой задержкой принимает решение (8) об изменении текущей сигнально-помеховой ситуации и, соответственно, структуры ИИУС, при этом величина задержки характеризует степень несоответствия априорной и фактической интенсивностей переходов в ту ситуацию (ситуации и, соответственно, структуры ИИУС), о которой сигнализирует ИСП. Соответствие выходных сигналов ИСП номерам сигнально-помеховых ситуаций фиксируется при предварительной классификации возможных сигнально-помеховых ситуаций в виде табл. 1 и 2. Возможные варианты оперативной коррекции веса априорной информации следующие: либо уменьшение априорных интенсивностей переходов в другие от сигнализируемой ИСП ситуации; либо повышение априорных интенсивностей переходов из других ситуаций в сигнализируемую изменившим свое состояние ИСП. Оба варианта примерно равнозначны, однако второй более предпочтителен в связи с тем, что при последующих изменениях сигнально-помеховой обстановки его применение быстрее приводит весь массив оперативно корректируемой априорной информации к соответствию фактической в текущей сессии применения ИИУС. В соответствии со вторым вариантом предлагаемой оперативной коррекции априорной информации выражение (5) имеет вид

$$\hat{P}_k^{(s)} = \left[\hat{P}^{(s)} - \Delta t \left(\hat{P}^{(s)} \sum_{s=1 \neq l}^S \tilde{\gamma}^{(sl)} - \sum_{l=1 \neq s}^S D \tilde{\gamma}^{(ls)} \hat{P}^{(l)} \right) \right]_{k-1} ; \quad D = 1 + d\Delta\tau. \quad (9)$$

В соответствии с (9) повышаются числовые значения априорных интенсивностей переходов в те сигнально-помеховые ситуации, о которых сигнализирует изменивший свое состояние ИСП, при этом остальные предварительно рассчитанные интенсивности переходов в другие сигнально-помеховые ситуации в текущий момент времени остаются неизменными. Скорректированные в соответствии с (9) числовые значения интенсивностей переходов $\tilde{\gamma}^{(ls)}$ запоминаются для последующего использования в текущей сессии применения ИИУС.

Заключение

Новые существенные признаки предлагаемого метода:

1. Использование ИСП сигналов и помех для оперативной коррекции априорной информации, которой являются предварительно рассчитанные интенсивности переходов только между теми сигнально-помеховыми ситуациями, о которых сигнализируют индикаторы в текущий момент времени;

2. Повышение числовых значений априорных интенсивностей переходов только между теми сигнально-помеховыми ситуациями, о которых сигнализируют индикаторы в текущей сессии применения ИИУС;

3. Повышение степени соответствия априорной и фактической интенсивностей переходов между сигнально-помеховыми ситуациями при очередном изменении состояния какого-либо из индикаторов для текущей сессии применения ИИУС.

Информационные системы 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 оперативной коррекции ее веса в алгоритме распознавания сложившейся в текущий момент времени сигнально-помеховой ситуации и, соответственно, управления структурами информационной системы. Поиск правил решения (алгоритмов обработки информации), обеспечивающих минимизацию условного риска при изменяющихся параметрах сигналов и помех в процессе функционирования ИИУС объектов (процессов), является актуальной задачей.

Список литературы

1. Баранов, И. В. Влияние помех на алгоритмы обработки сигнала разностной частоты дальномера ближнего действия / И. В. Баранов, В. В. Езерский // Цифровая обработка сигналов. – 2022. – № 1. – С. 14 – 18.

2. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалёв. – М. : Физматлит, 1993. – 272 с.

3. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д. Ю. Муромцев, Ю. Л. Муромцев // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241 – 251.

4. Bayesian Recognition of Amovingobjectin Formation-Measuring System State: Aprioriin Formation Weight Correction / S. M. Muzhichek, G. G. Sebryakov, V. I. Pavlov, S. V. Tolstych, M. B. Kenzhekhanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2020 Workshopon Materials and Engineeringin Aeronautics (MEA2020). – P. 1 – 5.

5. Бухалёв, В. А. Рекуррентные алгоритмы распознавания и оценивания состояния динамического объекта по информации от измерителей и индикаторов / В. А. Бухалёв // Известия Академии Наук СССР. Техническая кибернетика. – 1992. – № 1. – С. 148 – 156.

6. Павлов, В. И. Оптимальное обнаружение изменения свойств случайных последовательностей по информации измерителя и индикатора / В. И. Павлов // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 1. – С. 86 – 94.

Operational Correction of the Weight of a Priori Information in the Bayesian Algorithm for State Recognition of the Information-Measuring and Control System

V. I. Pavlov^{1✉}, T. Yu. Dorokhova¹, S. V. Artemova², S. V. Tolstykh¹

Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems (1),

vpavl@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia;

KB-1 Department of Information Protection (2),

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Keywords: a priori information; information-measuring and control system; operational correction.

Abstract: The paper proposes a new method of operative correction of a priori information weight in Bayesian algorithm of state recognition of information-measuring and control system, increasing its noise immunity. The method uses so-called indicators of accompanying signs of signals and interference. The sign of inconsistency with the validity of a priori information in the current session of the information system functioning is indicated. The proposed method is universal and is applicable, including to information systems with open input channels.

References

1. Baranov I.V., Yezerskiy V.V. [Effect of interference on algorithms for processing the difference frequency signal of a short-range rangefinder], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2022, no. 1, pp. 14-18. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kazakov I.Ye., Artem'yev V.M., Bukhalov V.A. *Analiz sistem sluchaynoy struktury* [Analysis of random structure systems], Moscow: Fizmatlit, 1993, 272 p. (In Russ.)
3. Muromtsev D.Yu., Muromtsev Yu.L. [Analysis and synthesis of radio systems on a set of operating states], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 241-251. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Muzhichek S.M., Sebryakov G.G., Pavlov V.I., Tolstykh S.V., Kenzhekhanova M.V. Bayesian Recognition of Moving Object in Formation-Measuring System State: A Priori in Formation Weight Correction, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2020 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics (MEA2020)*, pp. 1-5.
5. Bukhalov V.A. [Recursive Algorithms for Recognizing and Estimating the State of a Dynamic Object Based on Information from Measuring Instruments and Indicators], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics], 1992, no. 1, pp. 148-156 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Pavlov V.I. [Optimal detection of changes in the properties of random sequences based on information from a meter and indicator], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1998, no. 1, pp. 86-94 (In Russ., abstract in Eng.)

Operative Korrektur des Gewichts der Apriori-Informationen im Bayes'schen Algorithmus zur Erkennung des Zustands des informationsmessenden und Steuersystems

Zusammenfassung: Es ist eine neue Methode zur operativen Korrektur des Gewichts von A-priori-Informationen im Bayes'schen Algorithmus zur Zustandserkennung des Informationsmess- und Steuerungssystems vorgeschlagen, wodurch dessen Störfestigkeit erhöht wird. Das Verfahren nutzt sogenannte Indikatoren für Begleitzeichen von Signalen und Störungen. Es ist auf das Zeichen der Unstimmigkeit der a priori Gültigkeit der Information in der aktuellen Phase der Funktion des Informationssystems hingewiesen. Die vorgeschlagene Methode ist universell und anwendbar, auch auf Informationssysteme mit offenen Eingabekanälen.

Correction rapide du poids des informations a priori dans l'algorithme bayésien de reconnaissance de l'état du système d'information, de mesure et de contrôle

Résumé: Est proposée une nouvelle méthode de correction rapide du poids de l'information a priori dans l'algorithme bayésien de reconnaissance de l'état du système d'information, de mesure et de contrôle, ce qui augmente sa résistance aux interférences. Dans la méthode sont utilisés les indicateurs dits de signes concomitants de signaux et d'interférences. Est indiqué un signe d'incohérence dans la validité des informations a priori lors de la session en cours du système d'information. La méthode proposée est universelle et applicable, notamment aux systèmes d'information avec des canaux d'entrée ouverts.

Авторы: *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Дорохова Татьяна Юрьевна* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ, Тамбов, Россия; *Артемova Светлана Валерьевна* – доктор технических наук, профессор кафедры КБ-1 «Защита информации», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия; *Толстых Сергей Владимирович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ, Тамбов, Россия.