Решение задач линейной и нелинейной фильтрации при реализации процедур интервальной оценки качества электронных библиотек

Solving problems of linear and nonlinear filtering when implementing proce-dures for interval quality estimation of digital libraries

Ясинский / Yasinski S.
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи», ведущий научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

Паращук / Parashchuk I.
Игорь Борисович
(shchuk@rambler.ru)
доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого» МО РФ (ВАС им. С. М. Буденного), профессор.
г. Санкт-Петербург

Крюкова / Kryukova E.
Елена Сергеевна
(e.kkrukovaa69@yandex.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
адъюнкт.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: электронная библиотека – electronic library; фильтр Калмана – Kalman filter; интервальная оценка – interval estimation; показатель качества – quality indicator; модель – model; цепь Маркова – Markov chain; экстраполяция – extrapolation.

Статья посвящена исследованию теоретической возможности и перспектив практического применения методов линейной и нелинейной калмановской фильтрации в задачах интервальной оценки качества электронных библиотек. Предложены и обоснованы этапы (алгоритмы) и аналитические выражения для оптимальной фильтрации и экстраполяции показателей качества электронных библиотек, изменяющихся как линейно, так и нелинейно. Практическое применение предложенных подходов позволит унифицировать алгоритмы интервальной оценки качества систем такого класса, создавая тем самым предпосылки для унификации алгоритмов управления структурой, параметрами и режимами работы электронных библиотек.

The article is devoted to the study of the theoretical possibilities and prospects for the practical applica-tion of methods of linear and nonlinear Kalman filtering in the problems of interval estimation of the quality of digital libraries. The stages (algorithms) and analytical expressions for optimal filtering and extrapolation of quality indicators of digital libraries, which vary both linearly and nonlinearly, are pro-posed and substantiated. The practical application of the proposed approaches will make it possible to unify the algorithms for the interval estimation of the quality of systems of this class, thereby creating the preconditions for the unification of algorithms for controlling the structure, parameters of the operating modes of electronic libraries.

Введение

Эволюционный переход на новый уровень развития в области информатики и информационных технологий, вычислительной техники и кибернетических систем показал очевидность того факта, что для их успешного внедрения необходима надежная научно-методологическая база, позволяющая оценивать состояние и качество в интересах оптимального построения и управления системами такого класса.

Не последнее место в ряду современных и перспективных информационных систем, развертываемых в интересах различных министерств и ведомств, занимают автоматизированные информационно-поисковые системы, которые принято называть электронными библиотеками [1, 2]. Они предназначены для обеспечения

1-2021.indd 49 29.03.2021 14:15:32

поиска и управляемого доступа по информационно-телекоммуникационным сетям к электронным документам, профессиональным базам данных, информационным справочным и поисковым системам, а также иным информационным ресурсам [3–6].

Электронные библиотеки (ЭБ) являются ключевой технологической платформой Федеральной целевой программы «Электронный Вуз России» и относятся к классу сложных управляемых информационно-технологических систем, входящих в единое информационной пространство системы образования [7]. Элементами ЭБ являются программное обеспечение, фонд (контент) ЭБ, аппаратные (технические) средства, и обслуживающий персонал. Сочетание этих элементов в рамках единой архитектуры ЭБ, учет их взаимосвязи и взаимозависимости требуют создания новых, современных подходов к оценке их качества, новых методологических инструментов квалиметрии электронных библиотек.

Модель процесса функционирования электронных библиотек

Как и в любых иных вопросах теории и практики управления сложными информационными объектами, в вопросах оценки качества – как одного из этапов управления, важнейшими вопросами продолжают оставаться вопросы, математического моделирования процессов функционирования этих объектов, и уже на этой основе – создание алгоритмов и методов оценки их качества.

При этом математическая модель представляет собой аналитическое описание процесса смены состояний (значений) показателей качества (ПК) ЭБ во времени. Математическую модель, способную описать динамику смены дискретных состояний ПК ЭБ в непрерывном времени предложено, в рамках нашей задачи, создать на основе непрерывных марковских цепей. В этом случае переходы конкретного ПК ЭБ из состояния в состояние будут происходить в случайные (произвольные) моменты времени t [8, 9], а сами ПК представляют собой числовые (шкалированные) величины, характеризующие степень соответствия конкретных свойств ЭБ, предъявляемым к данным свойствам (аспектам свойств) требованиям. Причем конкретный ПК ЭБ есть функционал от параметров, характеризующих данное свойство, и вводимый для снижения размерности пространства параметров в интересах удобства сравнения нескольких ЭБ (объектов, процессов). Примером вектора ПК (векторного ПК) $\vec{X}$, характеризующих аспекты отдельного свойства ЭБ, может служить общая формальная запись, например,

$$\vec{X} = [x_1, x_2, \ldots, x_n]^{\text{т}}, \qquad (1)$$

где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – n конкретных ПК, характеризующих аспекты отдельного свойства ЭБ.

Тогда для формальной записи вектора ПК (векторного ПК) $\vec{X}_{\text{свр}}$, характеризующих, например, своевременность предоставления услуг ЭБ пользователям, может быть использовано выражение:

$$\vec{X}_{\text{свр}} = [t_{\text{дост}}, t_{\text{ож}}, t_{\text{преб}}, G_{\text{свр}}]^{\text{т}}, \qquad (2)$$

где $t_{\text{дост}}$ – время доступа легального (авторизованного) пользователя к запрашиваемому контенту (информационному ресурсу) ЭБ; $t_{\text{ож}}$ – время ожидания доступа легального (авторизованного) пользователя к запрашиваемому контенту (информационному ресурсу) ЭБ; $t_{\text{преб}}$ – время пребывания запрашиваемого контента (информационного ресурса) в системе; $G_{\text{свр}}$ – коэффициент своевременности предоставления услуг (контента, информационного ресурса), определяемый как отношение реального времени ожидания доступа к конкретной услуге к суммарному времени ожидания всех услуг. Таким образом, выражение (2) описывает пример вектора ПК (векторного ПК) $\vec{X}_{\text{свр}}$ ЭБ, характеризующих ее способность обеспечивать доступ пользователей к запрашиваемым информационным ресурсам и предоставление им требуемого перечня услуг в установленные сроки или в реальном масштабе времени. Примером ПК, характеризующих затраты различных ресурсов (временных, вычислительных, финансовых, частотных, человеческих (персонал), ресурсов систем хранения данных и т.д.), используемых для реализации процесса функционирования ЭБ, может выступать, допустим, $t_{\text{обр}}$ – время обработки системой единичного запроса легального (авторизованного) пользователя к конкретному контенту (информационному ресурсу) ЭБ.

Таким образом, математическую модель ЭБ в интересах оценки ее качества представим как унифицированное формализованное аналитическое описание динамики смены состояний (значений) различных ПК библиотеки. При этом ПК численно характеризуют существенные свойства ЭБ в пространстве состояний на непрерывном отрезке времени $\tau + \Delta\tau$. Задачи подобного вида для оценки нижней и верхней границы качества и надежности сложных управляемых объектов и процессов описаны в работе [10]. Тогда математическую модель можно записать в виде непрерывной марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений для интервалов времени $\tau + \Delta\tau$:

$$\vec{x}(\tau + \Delta\tau) = C^{\text{т}}(\tau + \Delta\tau)\,\vec{\Theta}(\tau + \Delta\tau); \qquad (3)$$

$$\vec{\Theta}(\tau + \Delta\tau) = \Lambda^{\text{т}}(\tau + \Delta\tau, \tau, u)\,\vec{\Theta}(\tau) + \Delta\vec{\Theta}(\tau + \Delta\tau); \qquad (4)$$

$$\vec{z}(\tau + \Delta\tau) = H(\tau, \vec{x}(\tau))\,\vec{\Theta}(\tau + \Delta\tau) + \vec{\omega}(\tau + \Delta\tau). \qquad (5)$$

Эти интервалы времени, обозначенные в модели $\tau + \Delta\tau$, предназначены для определения интервальных состояний (оценки) качества ЭБ. Это, по сути, доверительные интервалы, в течение которых оцениваемая и моделируемая величина x – конкретный ПК

1-2021.indd 50 23.03.2021 14:15:34

ЭБ (записывается как вектор ПК $\vec{x}$, поскольку может принимать несколько возможных значений), находится с определенной вероятностью, которую принято называть коэффициентом доверия.

В модели, описываемой выражениями (3–5), уравнение (3) является уравнением состояния конкретного ПК ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м непрерывном временном интервале ее функционирования, в котором: $\vec{x}(\tau+\Delta\tau)$ – вектор значений конкретного ПК ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале; $C^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau)$– транспонированная диагональная квадратная матрица (порядка m, где m – число состояний ПК) возможных значений конкретного ПК ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале; $\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau)$ – вектор вспомогательных индикаторов состояния конкретного ПК ЭБ. Уравнение (4) представляет собой уравнение состояния вспомогательных индикаторов состояния конкретного ПК ЭБ, где $\Lambda^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau,\ \tau,\ u)$ – транспонированная квадратная матрица (порядка m) плотностей вероятностей перехода λ_{ij} конкретного ПК ЭБ за время $\tau+\Delta\tau$ из состояния i в состояние j; $\vec{\Theta}(\tau)$ – вектор значений индикаторов состояния конкретного ПК ЭБ на предыдущем (τ) временном интервале; $\Delta\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau)$ – вектор приращений индикаторов состояния, элементы которого служат для компенсации нецелочисленной части уравнения (4).

Выражение (5) в модели (3–5) представляет собой уравнение наблюдения за процессом смены состояний ПК ЭБ, где $H(\tau,\ \vec{x}(\tau))$ – диагональная квадратная матрица (порядка m) наблюдаемых значений этого процесса, а $\vec{\omega}(\tau+\Delta\tau)$ – вектор белых шумов наблюдения на $(\tau+\Delta\tau)$ -м временном интервале.

Предложенная модель, представленная уравнениями (3–5) и представляющая собой унифицированное аналитическое описание процессов смены состояний всех классов ПК ЭБ, позволит унифицировать и алгоритмы оценивания этих ПК с целью максимального использования для их реализации с помощью современной вычислительной техники. Более того, это позволяет согласовать характеристики качества фильтров, реализующих процесс оценивания, а также унифицировать в ходе дальнейших исследований процессы управления параметрами и режимами работы ЭБ на основе полученных унифицированных оценок их показателей качества.

Линейная фильтрация при реализации процедур интервальной оценки качества электронных библиотек

Для случая рекурсивного оценивания нестационарного состояния линейной системы впервые решение задачи анализа качества было получено Р. Е. Калманом [11]. В дальнейшем идеи Калмана были расширены и модифицированы в ряде современных работ [12–19]. При этом фильтр Калмана обеспечивает оптимальность оценок по критерию минимума среднеквадратической ошибки (МСКО) и может быть модифицирован на случай линеаризуемой нелинейной системы.

Исходя из этого сформулируем конкретизированные для нашей модели алгоритмы линейной и нелинейной фильтрации, оптимальные в смысле критерия МСКО, опираясь на введенные математические модели (выражения (3–5)) смены состояний ПК ЭБ в виде непрерывной марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений для интервалов времени $\tau+\Delta\tau$.

При описании процесса смены состояний показателей качества ЭБ при через динамику смены состояний этих ПК, моделируемых непрерывной марковской цепью, на основе линейного векторного разностного уравнения (3) и представления уравнения наблюдения за состоянием процесса в виде (5), оптимальные (в смысле МСКО) оценки вспомогательных индикаторов $\hat{\vec{\Theta}}(\tau+\Delta\tau)$ состояния конкретного ПК ЭБ $\vec{x}(\tau+\Delta\tau)$ могут быть получены в результате решения рекуррентных уравнений одноинтервальной (за интервал времени $\tau+\Delta\tau$) экстраполяции [12, 15]:

$$\hat{\vec{\Theta}}(\tau+\Delta\tau)=\Lambda^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau,\tau)\,\hat{\vec{\Theta}}(\tau,\tau-\Delta\tau)+$$
$$+K(\tau+\Delta\tau,\tau)\times[\vec{z}(\tau)-H(\tau)\,\hat{\vec{\Theta}}(\tau,\tau-\Delta\tau)],\qquad(6)$$

где $K(\tau+\Delta\tau,\ \tau)$ – коэффициент усиления одноинтервального, для интервала $\tau+\Delta\tau$ экстраполятора Калмана, определяемый в соответствии с выражением:

$$K(\tau+\Delta\tau,\tau)=\Lambda^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau,\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau,\tau))H^{\text{т}}(\tau)\times$$
$$\times[H(\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau,\tau))\,H^{\text{т}}(\tau)+V_{\omega}(\tau)]^{-1},\qquad(7)$$

где $P(\Delta\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau,\tau))$ – матрица априорных дисперсий ошибок оценивания $(\Delta\vec{\Theta}=\vec{\Theta}-\hat{\vec{\Theta}})$, определяемая для следующего интервала $\tau+\Delta\tau$ фильтрации в соответствии с выражением:

$$P(\Delta\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau,\tau))=\Lambda(\tau+\Delta\tau,\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau,\tau-\Delta\tau))\,\Lambda^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau,\tau)+$$
$$+\Gamma(\tau)V_{\upsilon}(\tau)\,\Gamma^{\text{т}}(\tau)\ -\Lambda(\tau+\Delta\tau,\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau,\tau-\Delta\tau))\,H^{\text{т}}(\tau)\times$$
$$\times[H(\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau,\tau-\Delta\tau))\,H^{\text{т}}(\tau)+V_{\omega}(\tau)]^{-1}\times$$
$$\times H(\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}(\tau,\tau-\Delta\tau))\,\Lambda^{\text{т}}(\tau+\Delta\tau,\tau),\qquad(8)$$

где $V_{\upsilon}(\tau)$– ковариационная матрица шума возбуждения процесса смены состояний вспомогательных индикаторов $\vec{\Theta}(\tau)$ для текущего интервала τ фильтрации; $V_{\omega}(\tau)$ – ковариационная матрица шума наблюдения за процессом смены состояний $\vec{\Theta}(\tau)$, $\Gamma(\tau)$ – матрица возбуждения процесса смены состояний вспомогательных индикаторов $\vec{\Theta}(\tau)$ для текущего интервала τ фильтрации.

Уравнение одноинтервальной (за интервал времени $\tau+\Delta\tau$) экстраполяции (6) получено для свободной траектории движения процесса смены состояний вспомогательных индикаторов $\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau)$, без учета $\vec{u}(\tau)$ – управлений вероятностно-временным механизмом смены состояния данного процесса.

1-2021.indd 51 29.03.2021 14:15:36

Уравнение линейной фильтрации индикаторов $\hat{\vec{\Theta}}(\tau+\Delta\tau)$ для управляемого процесса смены состояний конкретного ПК ЭБ $\vec{x}(\tau+\Delta\tau)$, представленного в виде непрерывной марковской цепи в форме разностных стохастических уравнений (3), можно получить из уравнения экстраполяции (6). В этом случае оценочные значения индикаторов состояния для конкретного ПК ЭБ, например, для $t_{ож}$ – времени ожидания доступа легального (авторизованного) пользователя к запрашиваемому контенту (информационному ресурсу) ЭБ, т.е., $x = t_{ож}$, имеют вид:

$$\hat{\vec{\Theta}}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau) = \Lambda^{т}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau,u)\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{ож}}(\tau) + K_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)\times$$
$$\times[\vec{z}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau) - H_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)\,\Lambda^{т}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau,u)\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{ож}}(\tau)], \quad (9)$$

где $K_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)$ – коэффициент усиления фильтра Калмана для оценки индикаторов состояния времени ожидания доступа $t_{ож}$, определяемый в соответствии с выражением:

$$K_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau) = P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau))H^{т}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)\times$$
$$\times[H_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau))\,H^{т}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau) + V_{\omega\,t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)]^{-1}, \quad (10)$$

где $P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau))$ – матрица априорных дисперсий ошибок оценивания индикаторов состояний $\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau)$ времени ожидания доступа $t_{ож}$, определяемая в соответствии с выражением

$$P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau)) = \Lambda_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau,\tau-\Delta\tau))\times$$
$$\times\Lambda^{т}_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau,\tau) + \Gamma(\tau)V_{\upsilon\,t_{ож}}(\tau)\,\Gamma^{т}(\tau), \quad (11)$$

а выражение

$$P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau)) = [A - K_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)\,H_{t_{ож}}(\tau+\Delta\tau)]\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau,\tau-\Delta\tau)), \quad (12)$$

где A – единичная диагональная матрица, характеризует матрицу апостериорных дисперсий ошибок оценивания индикаторов состояний $\vec{\Theta}_{t_{ож}}(\tau)$ времени ожидания доступа $t_{ож}$ для текущего интервала τ фильтрации.

Рассмотренный модифицированный для модели в виде непрерывной марковской цепи алгоритм линейной фильтрации Калмана полностью подходит и дает практически в реальном времени оптимальные (в смысле критерия МСКО) оценочные значения индикаторов состояния процессов, описываемых параметрами и ПК ЭБ, имеющими линейный характер изменений. Это, в конечном итоге, позволяет решить уравнение состояния (3) и перейти к интервальному оцениванию нижней и верхней границы качества ЭБ на основе полученных оценочных значений их ПК, изменяющихся линейно.

Нелинейная фильтрации при реализации процедур интервальной оценки качества электронных библиотек

Несколько сложнее обстоят дела с теми ПК ЭБ, механизм смены состояния которых носит нелинейный характер. Представителем группы ПК ЭБ такого класса, в качестве примера, может выступать показатель затрат ресурсов, используемых для реализации процесса функционирования ЭБ. Наличие в системе ПК ЭБ таких показателей объективно обуславливает необходимость решения задачи нелинейной фильтрации.

Подходы к решению задач нелинейной фильтрации непрерывных марковских последовательностей, в виде которых разработаны аналитические модели смены состояний ПК ЭБ (выражения (3–5)), могут быть модифицированы путем усовершенствования алгоритмов фильтрации дискретных марковских последовательностей, рассмотренных в работах [12, 15]. Поскольку проблема оптимального оценивания качества ЭБ решается в рамках процесса управления такой системой, то оптимум оценок как линейных, так и нелинейных ПК ЭБ целесообразно основывать на едином критерии. Поскольку для алгоритмов линейной фильтрации сделан выбор в пользу МСКО, будет правильно, на наш взгляд, в целях разработки унифицированных алгоритмов оценивания ПК ЭБ, использовать этот критерий и для нелинейной фильтрации.

Исходя из этого, рассмотрим подходы к нелинейному оцениванию, более других удовлетворяющие предъявленным требованиям, а именно подходы, описанные в [12, 15] и использующие методы аппроксимации нелинейных функций. К ним относятся алгоритмы оценивания, линеаризованные относительно опорной траектории движения процесса в пространстве состояний и расширенные линеаризованные фильтры.

В работе [12] показано, что алгоритмами, обладающими повышенной точностью нелинейного оценивания ПК в сочетании с относительной простотой технической реализации, могут служить алгоритмы оценивания, построенные с использованием процедуры линеаризации нелинейных функций моделей системы и наблюдений в точках расширенного класса опорных траекторий. Эти алгоритмы называют расширенными линеаризованными алгоритмами оценивания.

Выбор данного методологического и аналитического аппарата нелинейного оценивания ПК ЭБ обусловлен тем, что в отличие от обычных линеаризованных фильтров Калмана (ЛФК), в расширенных линеаризованных фильтрах Калмана (РЛФК) производится разложение функции модели наблюдения в ряд Тейлора около точки $\Theta(\tau) = \hat{\Theta}(\tau)$, что дает нам возможность получить ряд линейных уравнений относительно $\Theta(\tau)$.

Таким образом, опираясь на введенные выражениями (3–5) модели состояния и наблюдения ПК ЭБ, возможно получение аналитических выражений для оптимального (по критерию МСКО) оценивания нели-

1-2021.indd 52 29.03.2021 14:15:38

нейно изменяющихся состояний (значений) ПК ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале на основе расширенных линеаризованных алгоритмов Калмана.

Применительно к задаче оценивания ПК ЭБ, изменяющихся на $(\tau+\Delta\tau)$ -м временном интервале нелинейно, уравнение одношаговой экстраполяции РЛФК для индикаторов $\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau)$ состояния конкретного ПК ЭБ, например для $t_{обр}$ – времени обработки системой поиска ЭБ единичного запроса легального (авторизованного) пользователя на конкретный контент (информационный ресурс), т.е., $x = t_{обр}$, имеет вид:

$$\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) = f(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau)) = \Lambda^{т}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau,u)\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau). \quad (13)$$

Матрица априорных дисперсий ошибок оценивания индикаторов состояний $\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)$, нелинейно описываемого на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале ПК ЭБ, характеризующего затраты на функционирование библиотеки – времени обработки запроса $t_{обр}$, определяется в соответствии с выражением:

$$P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau)) = \Phi_{t_{обр}}(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau))\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau))\times$$
$$\times\Phi^{т}_{t_{обр}}(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau)) + \Gamma(\tau)V_{\upsilon\,t_{обр}}(\tau)\,\Gamma^{т}(\tau), \quad (14)$$

где $\Phi_{t_{обр}}(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau))$ – переходная матрица априорных ошибок оценивания индикаторов состояний нелинейно описываемого на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале ПК $t_{обр}$, элементы которой находятся путем решения матричного дифференциального уравнения

$$\Phi_{t_{обр}}(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau)) = \frac{\partial\,\varphi(\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau))}{\partial\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau)}. \quad (15)$$

Алгоритм фильтрации значений индикаторов $\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)$ и алгоритм поиска элементов матрицы апостериорных дисперсий ошибок оценивания индикаторов нелинейно изменяющихся состояний времени обработки поискового запроса $t_{обр}$ для интервала $\tau+\Delta\tau$ фильтрации $P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau))$ задается рекуррентными соотношениями (16), (17) и (18), (19) соответственно.

$$\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) = \Lambda^{т}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau,u)\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau) + K_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\times$$
$$\times[\vec{z}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) - \psi_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\,\Lambda^{т}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau,u)\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau)], \quad (16)$$

где $K_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)$ – коэффициент усиления РЛФК для оценивания $t_{обр}$, определяемый в соответствии с выражением

$$K_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) = P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau))\,\Psi^{т}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\times$$
$$\times[\Psi_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau))\,\Psi^{т}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) + V_{\omega\,t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)]^{-1}. \quad (17)$$

Матрица апостериорных дисперсий ошибок оценивания определяется в соответствии с выражением

$$P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)) = [A - K_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\,\Psi_{t_{обр}}(\tau+$$
$$+\Delta\tau)]\,P(\Delta\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau,\tau)), \quad (18)$$

где $\Psi_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)$ – переходная матрица апостериорных ошибок оценивания индикаторов состояний нелинейно описываемого на $(\tau+\Delta\tau)$ -м временном интервале ПК $t_{обр}$, элементы которой находятся путем решения матричного дифференциального уравнения

$$\Psi_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) = \frac{\partial\,\psi(\tau+\Delta\tau)}{\partial\,\hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)}. \quad (19)$$

Подводя итоги, отметим, что для решения задач оптимального оценивания качества ЭБ предложены и обоснованы этапы (алгоритмы) и аналитические выражения для оптимальной (в смысле МСКО) фильтрации и экстраполяции ПК цифровых библиотек, изменяющихся как линейно, так и нелинейно. При этом критерий оптимальности – минимум среднеквадратической ошибки интервальной оценки ПК ЭБ, например для $t_{обр}$ – времени обработки системой единичного запроса легального (авторизованного) пользователя к конкретному контенту (информационному ресурсу) ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале, имеет вид [15]:

$$I(\vec{z}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau);\Delta t_{обр}(\vec{\Theta}(\tau+\Delta\tau))) =$$
$$= \min_{\hat{\Theta}_{opt}(\tau+\Delta\tau)} M\{(\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) - \hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau))^{т}\times$$
$$\times C(\vec{\Theta}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau) - \hat{\vec{\Theta}}_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau))/z_{t_{обр}}(\tau+\Delta\tau)\}. \quad (20)$$

Заключение

Использование при реализации данных методов, этапов и аналитических выражений единого критерия (МСКО) оценки как линейно, так и нелинейно изменяющихся ПК элементов и процессов, реализуемых ЭБ на $(\tau+\Delta\tau)$-м временном интервале, позволяет унифицировать алгоритмы интервальной оценки качества систем такого класса, создавая тем самым предпосылки для унификации алгоритмов управления структурой, параметрами и режимами работы электронных библиотек.

Литература

1. ГОСТ Р 7.0.96 – 2016. Электронные библиотеки. Основные виды. Структура. Технология формирования. – Введ. 2017–07–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 13 с.

2. Электронные библиотеки в образовании / А.Б. Антопольский [и др.]; под ред. О.П. Крюковой, А.А. Харламова. – М.: 2009. – 94 с.

3. Зуйкина, К. Л. Электронные библиотеки в России. Текущий статус и перспективы развития / К.Л. Зуйкина, Д.В. Соколова, А.В. Скалабан. – М.: Ваш формат, 2017. – 120 с.

1-2021.indd 53 23.03.2021 14:15:40

4. Горный, Е. А. Развитие электронных библиотек: мировой и российский опыт, проблемы, перспективы / Е.А. Горный, К.В. Вигурский; под ред. И. Семенова. – М.: Гендальф, 2002. – 279 с.

5. Замятин, А. М. Модель электронной библиотечной системы вуза / А.М. Замятин // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 4. – С. 89–91.

6. Паращук, И. Б. Временная и топологическая доступность пользователей к информационному ресурсу электронных библиотек: показатели и критерии оценивания в рамках системных исследований / И.Б. Паращук, Е.С. Крюкова, С.А. Ясинский // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2020. – Т. 1, № 9. – С. 8–16.

7. Паращук, И. Б. Единое информационное пространство – базовая инновационная среда для развития системы профессионального образования / И.Б. Паращук // Информация и Космос. – 2012. – № 1. – С. 130–134.

8. Зейфман, А. И. Марковские цепи и модели с непрерывным временем / А.И. Зейфман, В.Е. Бенинг, И.А. Соколов. – М.: ЭЛЕКС–КМ, 2008. – 167 с.

9. Bini, D. Numerical Methods for Structured Markov Chains. / D. Bini, G. Latouche, B. Meini. – New York: Oxford University Press, 2005. – 215 p.

10. Гуров, С. В. Надежность систем при неполной информации / С.В. Гуров, Л.В. Уткин. – СПб.: Любавич, 1999. – 160 с.

11. Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – No. 86. – P. 35–45.

12. Сейдж, Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мэлс; пер. с английского под ред. Б.Р. Левина. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

13. Van Handel, R. Stochastic Calculus, Filtering and Stochastic Control / R. Van Handel. – New York: Springer, 2007. – 261 p.

14. Синицын, И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева: Учебное пособие / И.Н. Синицын. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.

15. Терентьев, В. М. Теоретические основы управления сетями многоканальной радиосвязи / В.М. Терентьев, И.Б. Паращук. – СПб.: ВАС, 1995. – 195 с.

16. Grewal, M. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB / M. Grewal, A. Andrews. – New York: John Wiley & Sons. Inc., 2001. – 401 p.

17. Strid, I. Block Kalman Filtering for Large–Scale DSGE Models / I. Strid, K. Walentin // Computational Economics. – 2009. – T. 33 (3). – P. 277–304.

18. Пилипенко, Н. В. Применение фильтра Калмана в нестационарной теплометрии. Учебное пособие / Н.В. Пилипенко. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 36 с.

19. Балакришнан, А. В. Теория фильтрации Калмана / А.В. Балакришнан. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 164 с.

1-2021.indd 54 29.03.2021 14:15:40