

Н.И.Зонов

СИСТЕМА РЕКУРРЕНТНЫХ БАЙЕСОВСКИХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ,
АДАПТИВНЫХ К РАЗНОРОДНЫМ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫМ ФАКТОРАМ И
ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Введение. Известно, что попытки непосредственного применения фильтра Калмана к решению прикладных задач приводят, как правило, к потере устойчивости процесса оценивания, обусловленной несоответствием реальных и теоретических (т.е. используемых фильтром) моделей процесса оценивания. К настоящему времени сформировались различные подходы к построению алгоритмов фильтрации, позволяющие в той или иной мере преодолеть указанное несоответствие: использование различных численных процедур, обеспечивающих вычислительную устойчивость процессов оценивания; эмпирический подбор параметров алгоритмов оценивания (фильтров) в конкретных прикладных задачах; использование байесовского (стохастического) подхода с целью учета более тонких эффектов, связанных с отличием истинного апостериорного распределения от гауссовского; использование гарантирующего (минимаксного) подхода с целью страховки от максимально возможных ошибок оценивания, исходя из решения минимаксной задачи, соответствующей выбранному критерию качества. Каждый из перечисленных подходов имеет определенные достоинства. Тем не менее, проблема обеспечения устойчивости процессов оценивания в конкретных прикладных задачах в настоящее время далека от своего разрешения.

Наиболее общими подходами к построению универсальных алгоритмов фильтрации следует, по-видимому, считать байесовский и гарантирующий подходы. При этом необходимо отметить, что байесовские алгоритмы ориентированы на решение задач, использующих только стохастические модели неконтролируемых факторов, в то время как гарантирующие алгоритмы фильтрации больше приспособлены для учета неопределенных неконтролируемых факторов.

В данной работе излагаются основные идеи компромиссного подхода к построению алгоритмов динамической фильтрации, позволяющего учесть влияние как случайных, так и неопределенных неконтролируемых факторов, вызванных ошибками математических моделей эволюции состояния оцениваемой системы и наблюдений.

1. Постановка задачи оценивания. Необходимо оценить состояние системы, эволюция которой описывается рекурсивными соотношениями вида:

$$x_i = \tilde{f}_i(x_{i-1}) + \xi_i; \quad i=1,2,\dots \quad (1)$$

на основании дискретных наблюдений

$$y_i = \tilde{g}_i(x_i) + \eta_i; \quad i=1,2,\dots, N \quad (2)$$

где в момент t_i $x_i \in R^N$ - оцениваемый вектор состояния; ξ_i, η_i - векторы независимых гауссовских случайных возмущений с известными статистиками, $y_i \in R^m$ - вектор наблюдений.

Предполагается, что в момент t_0 начальное состояние оцениваемой системы, из которого стартует случайный процесс $x(t)$, является гауссовской случайной величиной с известными априори статистиками.

Относительно вектор-функций $\tilde{f}_i(x_{i-1}), \tilde{g}_i(x_i)$ ($i=1, \dots, N$) считается, что в общем случае их конкретный вид неизвестен и исследователю доступны только некоторые более или менее точные аналоги этих функций, соответственно функции $f_i(x_{i-1})$ и $g_i(x_i)$, отличающиеся от исходных функций $\tilde{f}_i(x_{i-1}), \tilde{g}_i(x_i)$ на величины \tilde{c}_i, \tilde{z}_i , которые будем в дальнейшем называть ошибками принятых моделей эволюции и наблюдений (соответственно), причем считается, что их значения находятся в некоторых известных пределах.

2. Основные положения рассматриваемого подхода. Сущность указанного подхода состоит в соблюдении трех основных положений, заключающихся в следующем: 1) декомпозиция неконтролируемых факторов, сопровождающих процессы эволюции состояния оцениваемой системы и наблюдений; 2) использование так называемой основной теоремы для получения структуры алгоритма оценивания; 3) использование специальных процедур для определения статистических характеристик неконтролируемых факторов.

Первое из сформулированных положений означает, что исходные модели эволюции состояния системы (1) и наблюдений (2) формально приводятся к эквивалентным линейным моделям, в результате чего в рассмотрение вводятся дополнительные неконтролируемые факторы - ошибки линеаризации моделей эволюции \tilde{c}_i и наблюдений \tilde{z}_i . Декомпозиция введенных ошибок на ошибки принятых моделей и ошибки линеаризации определяется необходимостью рассматривать ошибки принятых моделей как неопределенные величины, в то время как ошибки линеаризации рассматриваются нами как случайные величины. Наряду с декомпозицией, соблюдение первого по-

ложения предполагает формирование конкретных гипотез относительно статистической природы выделенных неконтролируемых факторов. Важно отметить, что сформированные гипотезы определяют специфику синтезируемого алгоритма оценивания. В частности, можно предположить отсутствие ошибок моделей оцениваемой системы (ошибок принятых моделей и ошибок линеаризации). Такая гипотеза приводит, в конечном итоге, к соотношениям фильтра Калмана. Если считать ошибки принятых моделей пренебрежимо малыми, а компоненты ошибок линеаризации независимыми между собой и относительно оцениваемого вектора, то полученный в таких предположениях алгоритм оценивания будет иметь структуру широко известного фильтра второго порядка и т.д.

Второе положение предполагает использование так называемой основной теоремы, дающей необходимое и достаточное условие оптимальности апостериорной оценки, исходя из критерия максимума апостериорной плотности распределения оцениваемого вектора для получения структуры алгоритма оценивания. Под структурой алгоритма оценивания понимаются соотношения этого алгоритма, записанные с точностью до статистических характеристик ошибок моделей эволюции состояния оцениваемой системы и наблюдений.

Третье положение развиваемого подхода позволяет завершить формирование алгоритма оценивания, а именно: построить алгоритм определения статистических характеристик ошибок моделей. Следует при этом подчеркнуть, что статистическая информация об ошибках принятых моделей (являющихся неопределенными величинами) определяется, в рамках развиваемого подхода, исходя из предположения о наилучшем влиянии параметров этой информации на процесс оценивания (в смысле принятых критериев).

Таким образом, мы сформулировали здесь идеи, положенные в основу единого подхода к построению рекуррентных байесовских алгоритмов оценивания, адаптивных к влиянию разнородных неконтролируемых факторов. При этом с позиций единого подхода каждый конкретный алгоритм оценивания есть сочетание базовых алгоритмов, а именно: структуры ("оболочки") этого алгоритма и алгоритмов определения статистических характеристик ошибок моделей эволюции состояния оцениваемой системы и наблюдений. Множество указанных сочетаний базовых алгоритмов позволяет говорить о системе рекуррентных байесовских алгоритмов оценивания, адаптивных к разнородным неконтролируемым факторам, в которую входят, как частный случай известные алгоритмы: фильтр Калмана и его

модификации, фильтр второго порядка.

Разработана программная реализация указанной системы, составляющая "ядро" универсального программного комплекса, предназначенного для имитации процессов оценивания (на основании численных экспериментов) состояния динамических систем или для обработки реальных наблюдений. Пользователь данного программного комплекса имеет возможность в диалоговом режиме легко "конструировать" различные алгоритмы оценивания, собирая их из базовых алгоритмов (ядра). Общее количество рекуррентных алгоритмов оценивания, генерируемых программным комплексом, составляет при этом несколько тысяч. Комплекс позволяет проводить подробный анализ результатов моделирования, представляя пользователю информацию, на основании которой можно судить о работоспособности того или иного алгоритма оценивания и помогая тем самым подобрать наиболее оптимальный алгоритм оценивания для решения конкретной технической задачи.

УДК 629.7.087.22

С.А.Ишков, В.А.Романенко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЫВЕДЕНИЯ СУБСПУТНИКА НА РАБОЧУЮ ОРБИТУ

В последнее время возрос интерес к орбитальным тросовым системам (ОТС). Под ними понимаются системы космических аппаратов (КА), элементом которых являются тросы. Выгодным представляется использование ОТС, состоящей из двух тел для межорбитальных перемещений при которых трос осуществляет передачу малому спутнику (субспутнику) части энергии и момента количества движения базового КА, что приводит к изменению орбиты субспутника.

В докладе рассматривается возможность применения ОТС для решения задачи перевода субспутника с базовой круговой орбиты высотой $h_{\text{осв}}$ на компланарную эллиптическую орбиту заданной геометрии (высотами апогея $h_{\text{апог}}$ и перигея $h_{\text{периг}}$) и ориентации (аргументом перигея $\omega_{\text{периг}}$). Задача решается при следующих допущениях: