

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДОИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В МНОГОДАТЧИКОВОЙ СРЕДЕ

С. Г. Белов

АО «Концерн радиостроения «Вега», 121170, Москва, Кутузовский просп., д.34

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.

Аннотация. Предложен способ реализации алгоритмов фильтрации параметров состояния наблюдаемых объектов по измерениям, получаемым в различные моменты времени от разнотипных датчиков, позволяющий исключить необходимость динамической подстройки структуры и параметров фильтра под каждое поступающее измерение. Использование предложенного подхода позволяет упростить структуру комплексных фильтров и повысить стабильность их работы.

Ключевые слова: оценивание, фильтрация, расширенный фильтр Калмана, комплексирование, интеграция.

Abstract. A method has been proposed for implementing filtering algorithms for the state parameters of observable objects from measurements obtained at different times from different types of sensors, which makes it possible to eliminate the need for dynamic adjustment of the structure and filter parameters for each incoming measurement. Using the proposed approach makes it possible to simplify the structure of complex filters and increase the stability of their operation.

Keywords: evaluation, filtering, extended Kalman filter, integration.

Существующие алгоритмы фильтрации (последовательного оценивания) параметров состояния наблюдаемых объектов по измерениям в многодатчиковой среде в условиях неодновременности прихода измерений от различных датчиков предусматривают динамическую подстройку структуры или параметров фильтра под каждое поступающее измерение [1-3].

Это связано с тем, что на каждом шаге алгоритма в фильтре обрабатывается измерение только от одного датчика, которое по составу компонентов в общем случае отличается от измерений, получаемых от других датчиков. Поэтому под каждый тип поступившего измерения в фильтре должна быть предусмотрена своя структура обработки.

Если часть измеряемых различными датчиками компонентов совпадает, то структура обработки этих компонентов в фильтре одинакова, однако, с учетом разных точностей их измерения различными датчиками, в фильтре должно быть предусмотрено использование соответствующих корректирующих коэффициентов, компенсирующих указанные различия в точностях.

Описанные особенности построения существующих алгоритмов фильтрации, предназначенных для совместной обработки измерений от нескольких разнотипных датчиков, приводят к увеличению громоздкости структуры комплексных фильтров, особенно при комплексировании большого числа измерителей.

Кроме того разноточность измерений одинаковых компонентов различными датчиками без принятия адекватных компенсирующих мер приводит к нестабильности процесса последовательной обработки этих измерений в целях уточнения оценок параметров состояния наблюдаемых объектов вплоть до срыва процесса фильтрации.

Ц е л ь р а б о т ы - предложить способ реализации алгоритмов фильтрации параметров состояния наблюдаемых объектов по измерениям от нескольких разнотипных датчиков, позволяющий исключить необходимость динамической подстройки структуры и параметров фильтра под каждое поступающее измерение, тем самым упростить структуру комплексного фильтра и повысить стабильность его работы.

Предлагаемый способ реализации алгоритмов фильтрации, обеспечивающий преодоление указанных выше недостатков, предполагает использование искусственного приема, состоящего в следующем.

При поступлении в произвольный k -й момент времени t_k на вход комплексного фильтра измерения от произвольного g -го датчика, определяемого вектором $\mathbf{z}_k^{(g)}$ компонент измерения, в алгоритме программно генерируется обобщенное измерение от всех G комплексимруемых датчиков, определяемое обобщенным вектором $\tilde{\mathbf{z}}_k$, который формируется в виде составного вектора

$$\tilde{\mathbf{z}}_k = \left[\left[\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(1)} \right]^T, \left[\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(2)} \right]^T, \dots, \left[\mathbf{z}_k^{(g)} \right]^T, \dots, \left[\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(G)} \right]^T \right]^T \quad (1)$$

и включает:

а) один вектор $\mathbf{z}_k^{(g)}$ измерения, фактически полученного от g -го датчика в момент t_k ;

б) $G-1$ векторов $\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(j)}$, $j = \overline{1, G}$, $j \neq g$ псевдоизмерений для всех других датчиков кроме g -го, программно генерируемых в момент t_k в форме зашумленных значений прогноза измерений, рассчитываемых на основании определенных для каждого датчика априорных уравнений наблюдения.

Сформированное таким образом обобщенное измерение $\tilde{\mathbf{z}}_k$ передается на обработку в фильтр, в котором в этом случае не требуется проводить подстройку структуры и параметров под измерения от отдельных датчиков.

Рассмотрим в общем виде алгоритм фильтрации параметров состояния объекта по наблюдениям, получаемым от нескольких разнотипных датчиков, предусматривающий формирование псевдоизмерений на каждом шаге обработки. При этом за основу алгоритма возьмем соотношения классического расширенного фильтра Калмана [4].

Запишем уравнение состояния произвольного объекта, определяющее априорный закон изменения его параметров состояния при переходе с момента времени t_{k-1} на момент t_k , в виде

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \xi_{\mathbf{x}k}, \quad (2)$$

где \mathbf{x}_k и \mathbf{x}_{k-1} - векторы состояния объекта в моменты времени соответственно t_k и t_{k-1} ; $\Phi_{k|k-1}$ - фундаментальная матрица переходов состояния, элементы которой определяют вид разностных уравнений для пересчета отдельных параметров состояния объекта с момента t_{k-1} на момент t_k ; $\xi_{\mathbf{x}k}$ - векторный дискретный белый гауссовский шум возмущений параметров состояния объекта с корреляционной матрицей $\mathbf{D}_{\mathbf{x}k}$.

Уравнение наблюдения для g -го датчика, устанавливающее стохастическую функциональную связь между полученным в момент t_k вектором $\mathbf{z}_k^{(g)}$ измерений и подлежащим оцениванию вектором \mathbf{x}_k параметров состояния произвольного объекта, от которого это измерение получено, зададим в виде аддитивной смеси

$$\mathbf{z}_k^{(g)} = \mathbf{h}^{(g)}(t_k, \mathbf{x}_k) + \xi_{\mathbf{z}k}^{(g)} \quad (3)$$

векторной функции полезного сигнала $\mathbf{h}^{(g)}(t_k, \mathbf{x}_k)$, в общем случае нелинейной относительно \mathbf{x}_k , и векторного дискретного белого гауссовского шума $\xi_{\mathbf{z}k}^{(g)}$ измерений с корреляционной матрицей $\mathbf{D}_{\mathbf{z}k}^{(g)}$.

С учетом (1) и (3) определим обобщенное уравнение наблюдения, устанавливающее связь между программно сформированным в момент t_k обобщенным вектором $\tilde{\mathbf{z}}_k$ измерения от всех датчиков и вектором \mathbf{x}_k параметров состояния наблюдаемого объекта, в виде

$$\tilde{\mathbf{z}}_k = \tilde{\mathbf{h}}(t_k, \mathbf{x}_k) + \tilde{\xi}_{\mathbf{z}k}, \quad (4)$$

где $\tilde{\mathbf{h}}(t_k, \mathbf{x}_k)$ - обобщенная векторная функция полезного сигнала, являющаяся составным вектором из определенных в (3) векторов $\mathbf{h}^{(g)}(t_k, \mathbf{x}_k)$, $g = \overline{1, G}$; $\tilde{\xi}_{\mathbf{z}k}$ - обобщенный векторный дискретный шум измерения, составленный из определенных в (3) векторов $\xi_{\mathbf{z}k}^{(g)}$, $g = \overline{1, G}$ и имеющий блочно-диагональную

корреляционную матрицу $\tilde{\mathbf{D}}_{ik}$, составленную из расположенных по ее диагонали подматриц $\mathbf{D}_{ik}^{(g)}$, $g = \overline{1, G}$.

Процедура формирования текущей оценки параметров состояния наблюдаемого объекта, реализуемая алгоритмом фильтрации при получении в произвольный момент времени t_k измерения $\mathbf{z}_k^{(g)}$ от произвольного g -го датчика, включает следующие этапы:

- экстраполяции параметров состояния объекта на текущий момент времени t_k ;
- формирования обобщенного вектора $\tilde{\mathbf{z}}_k$ измерения;
- расчета по соотношениям фильтра Калмана текущей оценки $\hat{\mathbf{x}}_k$ параметров состояния объекта.

Экстраполяция параметров состояния объекта на момент t_k состоит в расчете вектора $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ экстраполированной оценки по формуле

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{\Phi}_{k|k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \quad (5)$$

где $\mathbf{\Phi}_{k|k-1}$ - фундаментальная матрица переходов состояния из уравнения состояния (2); $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ - вектор оценки параметров состояния объекта, рассчитанный на предыдущем шаге обработки в момент t_{k-1} .

В начальный момент времени t_0 , т.е. на первом шаге обработки, в качестве экстраполированного значения оценки используется вектор $\hat{\mathbf{x}}_0$ начальной оценки, рассчитываемый в общем случае на основании значения полученного в момент t_0 измерения $\mathbf{z}_0^{(g)}$ посредством детерминированной функциональной зависимости

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = f(\mathbf{z}_0^{(g)}). \quad (6)$$

Обобщенный вектор $\tilde{\mathbf{z}}_k$ измерения для момента t_k формируется с учетом рассчитанной экстраполированной оценки (5) параметров состояния объекта

как составной вектор (1), включающий один вектор $\mathbf{z}_k^{(g)}$ измерения, фактически полученного в момент t_k от g -го датчика, и $G-1$ векторов псевдоизмерений $\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(j)}$, $j = \overline{1, G}$, $j \neq g$, программно сгенерированных для всех других датчиков.

Значение вектора $\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(j)}$ псевдоизмерения от произвольного j -го датчика формируется на основе уравнения наблюдения (3) в виде суммы значения векторной функции $\mathbf{h}^{(j)}(t_k, \mathbf{x}_k)$ полезного сигнала, вычисленной в точке экстраполированной оценки $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ (5), и вектора $\Gamma^{(j)}$ случайных чисел, получаемых на выходе программного генератора дискретного белого гауссовского шума с дисперсиями (составляющими матрицу \mathbf{D} дисперсий), равными априорным дисперсиям компонентов измерения, определенным в корреляционной матрице $\mathbf{D}_{ик}^{(j)}$ шума измерения, т.е.

$$\mathbf{z}_{k, \text{псевдо}}^{(j)} = \mathbf{h}^{(j)}(t_k, \mathbf{x}_k) \Big|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}} + \Gamma^{(j)} \Big|_{\mathbf{D} = \mathbf{D}_{ик}^{(j)}}, \quad j = \overline{1, G}, \quad j \neq g. \quad (7)$$

Текущая оценка $\hat{\mathbf{x}}_k$ параметров состояния наблюдаемого объекта в момент t_k рассчитывается с учетом программно сформированного обобщенного вектора $\tilde{\mathbf{z}}_k$ (1) измерения от всех датчиков по соотношениям расширенного фильтра Калмана [4]

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \tilde{\mathbf{K}}_{\Phi k} \left[\tilde{\mathbf{z}}_k - \tilde{\mathbf{h}}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \right], \\ \mathbf{D}_k &= \mathbf{D}_{k|k-1} - \mathbf{D}_{k|k-1} \left[\tilde{\mathbf{J}}_k \right]^T \left[\tilde{\mathbf{D}}_{\Delta z k} \right]^{-1} \tilde{\mathbf{J}}_k \mathbf{D}_{k|k-1}, \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \Phi_{k|k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \\ \mathbf{D}_{k|k-1} &= \Phi_{k|k-1} \mathbf{D}_{k-1} \left[\Phi_{k|k-1} \right]^T + \mathbf{D}_{\mathbf{x}k}, \\ \tilde{\mathbf{D}}_{\Delta z k} &= \tilde{\mathbf{J}}_k \mathbf{D}_{k|k-1} \left[\tilde{\mathbf{J}}_k \right]^T + \tilde{\mathbf{D}}_{ик}, \\ \tilde{\mathbf{K}}_{\Phi k} &= \mathbf{D}_k \left[\tilde{\mathbf{J}}_k \right]^T \left[\tilde{\mathbf{D}}_{ик} \right]^{-1}, \\ \tilde{\mathbf{J}}_k &= \frac{\partial \tilde{\mathbf{h}}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}, \end{aligned} \quad (8)$$

в которых $\Phi_{k|k-1}, \mathbf{D}_{xk}$ - соответственно фундаментальная матрица переходов состояния и корреляционная матрица шумов возмущений состояния объекта из уравнения состояния (2); $\tilde{\mathbf{D}}_{ик}$ - блочно-диагональная корреляционная матрица обобщенного шума измерения из обобщенного уравнения наблюдения (4); $\tilde{\mathbf{K}}_{\phi k}$ - обобщенная весовая матрица фильтра в момент t_k ; $\mathbf{D}_k, \mathbf{D}_{k-1}$ - матрицы апостериорных дисперсий ошибок оценки параметров состояния объекта соответственно для моментов времени t_k и t_{k-1} ; $\mathbf{D}_{k|k-1}$ - экстраполированная с момента t_{k-1} на момент t_k матрица апостериорных дисперсий ошибок оценки; $\tilde{\mathbf{J}}_k$ - обобщенная матрица производных полезного сигнала, вычисляемая в точке экстраполированной оценки; $\tilde{\mathbf{D}}_{\Delta zk}$ - обобщенная корреляционная матрица невязки $[\tilde{\mathbf{z}}_k - \tilde{\mathbf{h}}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})]$ обобщенного вектора $\tilde{\mathbf{z}}_k$ измерений относительно измерения, ожидаемого от объекта.

Заключение

Предложенный способ реализации алгоритмов фильтрации параметров состояния наблюдаемых объектов по измерениям, получаемым в различные моменты времени от разнотипных датчиков, предусматривает реализацию процедуры программного формирования обобщенного измерения, которая выполняется в моменты поступления измерений от любого из датчиков. Обобщенное измерение включает в себя измерение, фактически полученное от одного из датчиков, и псевдоизмерения от других датчиков, программно сформированные с учетом прогнозируемых значений параметров состояния наблюдаемого объекта.

Структура формируемых обобщенных измерений, передаваемых на каждом шаге обработки в фильтр, остается неизменной. Поэтому неизменной остается и структура самого фильтра, определяемая соотношениями (8). Тем самым исключается необходимость динамической подстройки структуры и параметров фильтра под каждое поступающее измерение, за счет чего

упрощается структура комплексного фильтра и повышается стабильность его работы.

Предложенный способ реализации комплексных фильтров предполагает увеличение вычислительных затрат на обработку входного потока измерений, поскольку на каждом шаге вместо обработки измерения от одного датчика требуется обрабатывать обобщенное измерение, имеющее размерность, равную суммарной размерности измерений от всех датчиков. Однако, такое увеличение вычислительных затрат многократно компенсируется производительностью современной масштабируемой вычислительной базы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-08-04000-а, №16-29-04260 офи_м).

Литература

1. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением. Т.1. Теоретические основы. / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2012.

2. Меркулов В. И., Дрогалин В. В., Канащенков А. И., Богачев А. С. и др. 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.

3. Меркулов В. И., Садовский П. А. Алгоритм фильтрации одновременно приходящих измерений для двухдиапазонных РЛС. // Радиотехника. 2014, № 7.

4. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991.

Ссылка на статью:

С. Г. Белов. Использование псевдоизмерений при фильтрации параметров состояния объектов по наблюдениям в многодатчиковой среде. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/4/text.pdf>