

# Параллельная обработка с экстраполяцией в многосенсорных системах измерения координат воздушных объектов

М. Альмахмуд<sup>1</sup>, email: malmahmud04@gmail.com

Е.А. Богословский, email: qro76@yandex.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
(г. Воронеж)

***Аннотация.** В статье представлен анализ параллельного метода обработки информации в системах управления воздушным движением с использованием фильтра Калмана и  $\alpha - \beta$  - фильтра, и изучение возможности осуществления экстраполяции оценок координат воздушных объектов в интервалах между отсчетами радиолокационных измерений для повышения их точности при применении фильтра Калмана и  $\alpha - \beta$  - фильтра.*

***Ключевые слова:** многосенсорные системы, воздушный объект, управление воздушным движением, фильтр Калмана, экстраполяция оценок координат*

## Введение

На практике часто имеется возможность получения информации об оцениваемом параметре одновременно из нескольких источников. Такая ситуация характерна для высоконадежных резервированных измерительных систем, многосенсорных систем (МСС) измерения координат воздушных объектов (ВО), включающих в себя одновременно несколько радиолокационных станций (датчиков), комплексных систем навигации, использующих информацию многих датчиков и т.п.

Совместная обработка всей имеющейся информации позволяет повысить точность оценивания, однако она сопровождается увеличением требуемого объема вычислений [1-3]. В настоящее время много внимания уделяется созданию алгоритмов совместной обработки информации в МСС на основе фильтра Калмана (ФК), который представляет собой динамическую систему с переменным коэффициентом усиления, величина которого зависит от уровня шумов измерений и точности текущих оценок. Иначе его можно рассматривать как следящую систему [2], полоса пропускания которой, определяемая величиной коэффициента усиления, изменяется в процессе работы.

Пудем считать, что имеется  $M$  датчиков ( $M > 1$ ), измеряющих координаты ВО. Все измерения от датчиков поступают на центральный процессор (ЦП). Полагаем, что интересующий нас ВО описывается линейным динамическим уравнением вида [4]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_k$  и  $\mathbf{x}_{k+1}$  – векторы состояния системы в моменты времени  $k$  и  $(k+1)$  соответственно;  $\mathbf{F}_k$  – ее переходная матрица;  $\mathbf{v}_k$  – случайный вектор гауссовских шумов (шумов системы) с нулевым средним и корреляционной матрицей  $E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_l^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kl}$ , где  $E$  – оператор статистического усреднения;  $T$  – знак транспонирования;  $\delta_{kl}$  – символ Кронекера;  $\mathbf{Q}_k$  – диагональная матрица ковариаций шумов состояний.

Считаем также, что все датчики синхронизированы по времени поступления информации на ЦП и в каждый момент отсчета имеется один пакет измерений от каждого датчика. При этом точка начала отсчета определена. Тогда измерение от  $j$ -го датчика в  $k$ -ый момент запишется в виде:

$$\eta_k^j = \mathbf{H}_k^j \mathbf{x}_k + \Omega_k^j, \quad (2)$$

где  $\eta_k^j$  – вектор измерения  $j$ -го датчика в момент времени  $k$ ;  $\mathbf{H}_k^j$  – матрица измерений системы  $j$ -го датчика. Здесь  $\Omega_k^j$  – случайный вектор гауссовских шумов измерений, являющийся дискретным белым гауссовским шумом (БГШ) с нулевым средним, независимым от типа датчика и процесса (1) и имеющим ковариации вида:

$$E[\Omega_k^j \Omega_l^{i^T}] = \mathbf{R}_k^j \delta_{ji} \delta_{kl}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}_k^j$  – диагональная матрица ковариаций шумов измерений.

При сделанных допущениях рассмотрим параллельный метод обработки информации. В данном методе обработка информации от каждого датчика происходит одновременно (по мере поступления). В этом случае состояние системы обновляется одновременно для всего вектора измерений, хранящегося в памяти:

$$\mathbf{\eta}_k = \begin{bmatrix} \eta_k^1 \\ \vdots \\ \eta_k^M \end{bmatrix} = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \Omega_k, \quad \text{где } \mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_k^M \end{bmatrix}, \quad \Omega_k = \begin{bmatrix} \Omega_k^1 \\ \vdots \\ \Omega_k^M \end{bmatrix}.$$

Обозначим предсказанное состояние системы (при использовании параллельного метода и ФК) в момент  $k$  и ее ковариацию в виде [4, 5]:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k,0} \triangleq \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1},$$

$$\mathbf{P}_{k|k,0} \triangleq \mathbf{P}_{k|k-1}.$$

где знак « $\triangleq$ » означает «Равен по определению».

Используя выражение для коэффициента усиления фильтра [4, 5], обновленное уравнение состояния запишется в виде

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{v}_k,$$

где невязка  $\mathbf{v}_k$  равна:

$$\mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_k^1 - \hat{\boldsymbol{\eta}}_{k|k-1}^1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}_k^M - \hat{\boldsymbol{\eta}}_{k|k-1}^M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_k^1 - \mathbf{H}_k^1 \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\eta}_k^M - \mathbf{H}_k^M \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \end{bmatrix};$$

$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{k|k-1}^j$  – прогнозируемое новое измерение  $j$ -го датчика.

С учетом выражения (3), обновленное уравнение состояния может быть переписано в виде:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{P}_{k|k} \sum_{j=1}^M \left( \mathbf{H}_k^j \right)^T \left( \mathbf{R}_k^j \right)^{-1} \mathbf{v}_k^j, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{v}_k^j \triangleq \boldsymbol{\eta}_k^j - \mathbf{H}_k^j \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}.$$

Аналогично, рекурсия для инверсной ковариации может быть представлена в следующей простой форме:

$$\mathbf{P}_{k|k}^{-1} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} + \sum_{j=1}^M \left( \mathbf{H}_k^j \right)^T \left( \mathbf{R}_k^j \right)^{-1} \mathbf{H}_k^j. \quad (5)$$

На рис. 1 представлена структурная схема параллельного метода объединения информации от  $M$  датчиков ( $\mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_M$ ), где ПК – преобразователь координат, УОТ – устройство объединения траекторий, которое функционирует в соответствии с (4–5).

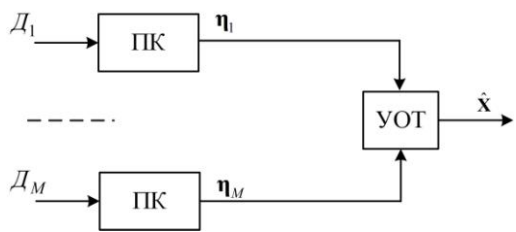


Рис. 1. Структурная схема параллельного метода

Функциональная схема УОТ показана на рис. 2.

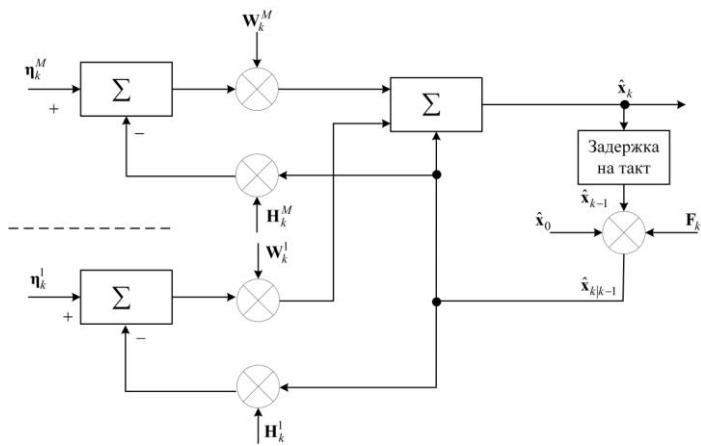


Рис. 2. Функциональная схема устройства объединения траекторий

Для повышения устойчивости сопровождения и точности оценки параметров движения ВО предлагается использовать способ, заключающийся в получении экстраполированных значений информации от датчиков МСС между отсчетами измерений. Для этой цели в каждую ветвь схемы, представленной на рис. 1, необходимо включить экстраполятор (Э), как это показано на рис. 3. В схеме на рис. 3 буквой С обозначен сумматор.

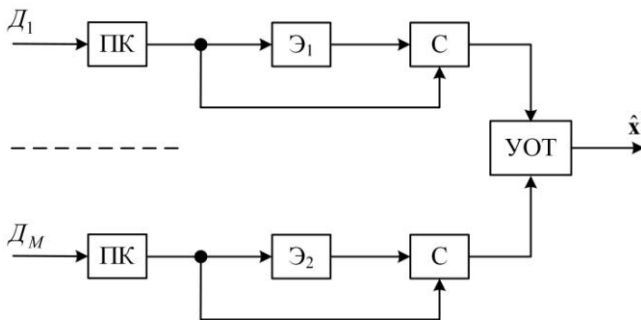


Рис. 3. Структурная схема параллельного метода с экстраполяцией

Структурная схема экстраполятора представлена на рис. 4. На этой схеме ВС – вычислитель скорости; ВЭ – вычислитель экстраполяции;  $\Delta t_i$  – темп обновления информации (время между отсчетами радиолокационной информации (РЛИ));  $\Delta t_k$  – время между рассчитываемыми экстраполированными значениями. Структурная схема экстраполятора от ветви к ветви не изменяется.

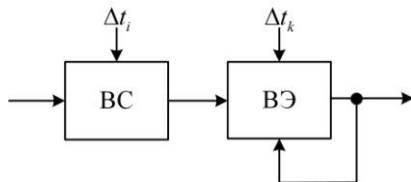


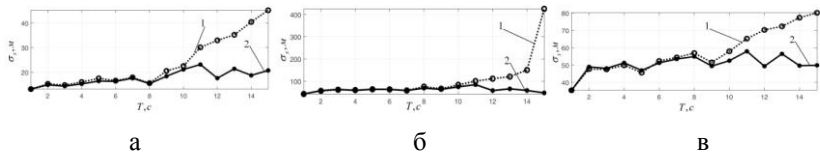
Рис. 4. Структурная схема экстраполятора

При моделировании работы предлагаемого метода с экстраполяцией использовалось усреднение по одной тысяче ( $N = 1000$ ) независимым реализациям оценок траектории ВО. Координаты РЛС1 и РЛС2 (датчиков МСС) принимались следующими:  $x_{РЛС1} = 14000$  м;  $y_{РЛС1} = -1000$  м;  $x_{РЛС2} = 14000$  м;  $y_{РЛС2} = +1000$  м; время обновления информации от РЛС1 и РЛС2 рассматривалось с изменением от 1 до 15 секунд.

На рис. 5, представлены результаты моделирования при исходных данных, обобщенных в таблице. Результаты иллюстрируют изменение среднеквадратические отклонения (СКО) координаты  $x$  ВО. Изменения СКО координат  $y$  и  $z$  не показаны, но в целом поведение этих зависимостей совпадает с зависимостью по координате  $x$ .

## Исходные данные для моделирования и обозначения на рис. 5

Исходные данные		Рис. 5, а	Рис. 5, б	Рис. 5, в
СКО ошибок измерения РЛС1	по дальности, м	36	200	100
	по азимуту, градус	0,01	0,01	1
	по углу места, градус	0,01	0,01	1
СКО ошибок измерения РЛС2	по дальности, м	36	36	50
	по азимуту, градус	0,01	0,01	0,1
	по углу места, градус	0,01	0,01	0,1



1 – без экстраполятора, 2 – с экстраполятором

Рис. 5. СКО координаты  $x$  в зависимости от времени обновления информации  $T$

Из рис. 5 (а, б, в) видно, что предлагаемый способ позволяет повысить точность определения координат ВО, его эффективность возрастает при более высоких значениях времени обновления РЛИ.

Результаты исследования предлагаемого способа, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что он работоспособен и позволяет добиться существенного выигрыша в точности определения координат ВО. Кроме того, он обладает всеми присущими МСС достоинствами, а именно большой информативностью и живучестью.

В работе предлагается использовать другой метод объединения информации с использованием  $\alpha - \beta$  - фильтра, при тех же условиях и допущениях, представленных выше.

Опираясь на классическое описание  $\alpha - \beta$  - фильтра [2, 6], могут быть получены следующие уравнения

$$\hat{\mathbf{X}}_k^j = \mathbf{A}_k^j \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^j + \Gamma_k^j \mathbf{Z}_k^j, \quad j = 1, \dots, M; \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{A}_k^M \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{\Gamma}_k^M \frac{\sum_{j=1}^M \hat{\mathbf{x}}_k^j}{M}, \quad j = 1, \dots, M, \quad (7)$$

где  $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x} \quad \hat{v}_x \quad \hat{y} \quad \hat{v}_y \quad \hat{z} \quad \hat{v}_z]^T$  – оценка вектора состояния;  $\mathbf{A}_k^j$  – переходная матрица;  $\mathbf{\Gamma}_k^j$  – матрица усиления фильтра ( $\mathbf{A}_k^j$  и  $\mathbf{\Gamma}_k^j$  полностью определены в [6]);  $\mathbf{z}_k^j = [\zeta_{x,k}^j \quad \zeta_{y,k}^j \quad \zeta_{z,k}^j]^T$  – вектор измерения;  $\zeta_{x,k}^j, \zeta_{y,k}^j, \zeta_{z,k}^j$  – измеренное положение ВО.

Функциональная схема УОТ, которая функционирует в соответствии с (6–7), показана на рис. 6.

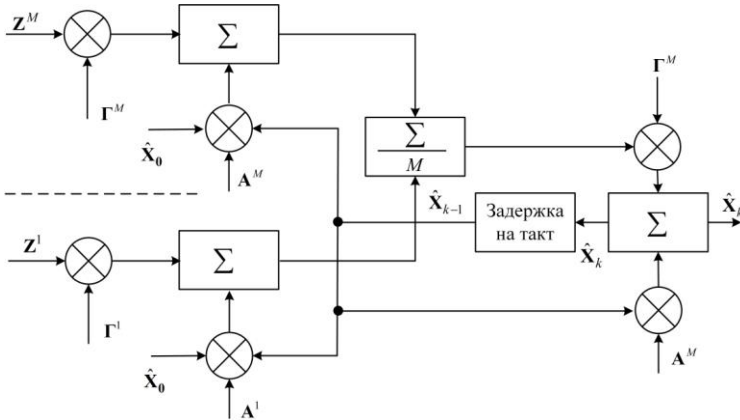
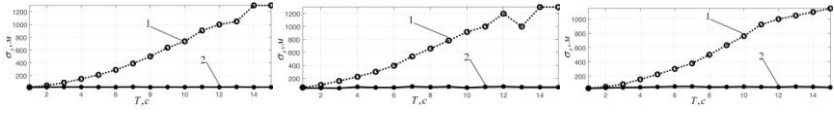


Рис. 6. Функциональная схема устройства объединения траекторий

На рис. 7 представлены результаты моделирования использования  $\alpha - \beta$  – фильтра при исходных данных, обобщенных в таблице.



а

б

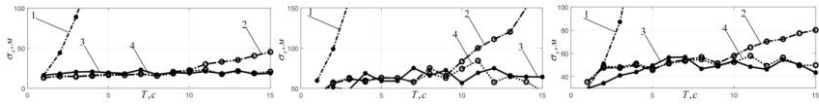
в

1 – без экстраполятора, 2 – с экстраполятором

Рис. 7. СКО координаты  $x$  в зависимости от времени обновления информации  $T$

Результаты исследования  $\alpha - \beta$  – фильтра (рис. 7 (а, б, в)) показывают, что для него характерны те же достоинства, что присущи ФК.

На рис. 8, представлены сводные результаты моделирования для ФК и  $\alpha - \beta$  – фильтра.



а

б

в

1 – без экстраполяции с  $\alpha - \beta$  фильтром; 2 – без экстраполяции с ФК; 3 – с экстраполяцией с  $\alpha - \beta$  фильтром; 4 – с экстраполяцией с ФК

Рис. 8. СКО координаты  $x$  в зависимости от времени обновления информации  $T$

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что ФК и  $\alpha - \beta$  – фильтр с экстраполяцией имеют близкую точность оценивания, причем последний при определенных условиях имеет преимущество в точности перед ФК. При этом без экстраполяции  $\alpha - \beta$  – фильтр существенно уступает ФК в точности получаемой оценки.

Любой алгоритм характеризуется вычислительными затратами, выраженными числом операций, необходимых для его реализации [7].

Проведен анализ количества операций, необходимых для исследуемых алгоритмов с экстраполяцией, который показал, что при реализации метода с ФК и экстраполяцией количество операций описывается следующим уравнением:

$$N_{\text{ФК}} = N_i L_{\text{ВО}} \left( K_D (21 + 24\gamma) + \mu^{-1} (4959 + 6142 K_D) \right), \quad (8)$$



а при реализации метода с  $\alpha - \beta$  - фильтром и экстраполяцией – уравнением:

$$N_{\alpha-\beta} = N_i L_{BO} (K_D (21 + 24\gamma) + \mu^{-1} (1250 K_D + 114)). \quad (9)$$

В (8) и (9):  $N_i = T_D \Delta t_i^{-1}$  – общее количество обращений к памяти при выполнении экстраполяции;  $T_D$  – общее время прохождения ВО зоны ответственности системы УВД;  $L_{BO}$  – количество сопровождаемых в зоне ответственности ВО;  $K_D$  – количество датчиков МСС;  $\gamma = (\Delta t_i - \Delta t_k) \Delta t_k^{-1}$ ;  $\mu = \Delta t_i \Delta t_k^{-1}$ .

На рис. 9 а, б представлены зависимости  $N_{\Phi К} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$  и  $N_{\alpha-\beta} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$  соответственно.

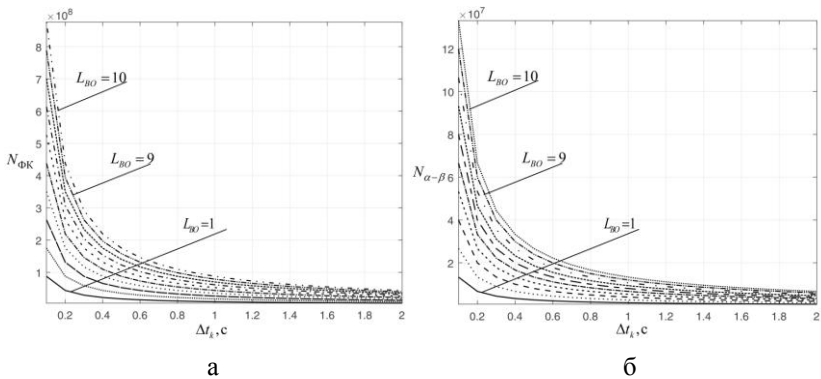


Рис. 9. Зависимости  $N_{\Phi К} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$  и  $N_{\alpha-\beta} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$

Результаты, приведенные на рис. 9, свидетельствуют о том, что параллельная обработка информации в МСС с применением ФК и  $\alpha - \beta$  - фильтра с экстраполяцией, исходя из мощностей современных вычислительных средств [8], вполне возможна в реальном масштабе времени. Кроме того, наблюдается значительное уменьшение количества вычислительных операций при применении  $\alpha - \beta$  - фильтра.

### Заключение

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что параллельный метод обработки информации в МСС вполне может быть

реализован в реальном масштабе времени. При этом возможно использование известных фильтров, таких как ФК и  $\alpha - \beta$  - фильтр. Применение этих двух фильтров при экстраполяции координат ВО дает близкие по качеству оценки результаты, но последний более привлекателен тем, что требует меньших вычислительных затрат.

### Список литературы

1. Зайцев, Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех / Д.В. Зайцев. – М.: Радиотехника, 2007. – 96 с.
2. Фарина, А., Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
3. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
4. Bar-Shalom, Y. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques / Y. Bar-Shalom, X.R. Li. – Storrs, CT, YBS Publishing, 1995. – 620 p.
5. Гришин, Ю.П. Динамические системы устойчивые к отказам / Ю.П. Гришин, Ю.М Казаринов. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
6. Ben, H.C. Description of an Alpha-Beta filter in cartesian coordinates / H.C. Ben, – NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, Naval Research Laboratory (U.S.), Defense Technical Information Center, 1973. – 52 p.
7. Информационные технологии в радиотехнических системах : учебное пособие /В.А. Васин [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 243 с.
8. Андреев, Н.А. Анализ эффективности программной реализации типовых операций обработки радиолокационных сигналов на цифровых сигнальных процессорах / Н.А. Андреев, С.В. Витязев, Д.В. Воронков // сб. тр. участников Международной научно-технической конф. "Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2005)" (Воронеж, 12-14 апреля 2005 г.). – Воронеж, 2005.