

Исследование возможности практической реализации алгоритмов автосопровождения траекторий воздушных объектов

М. Альмахмуд1, 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 представлена оценка предлагаемого метода оценки координат воздушных объектов путем вычисления их экстраполированных значений между интервалами радиолокационных измерений и возможности его технической реализации в реальном масштабе времени.*

***Ключевые слова:** воздушный объект, количество операций, фильтра Калмана, радиолокационных измерений, экстраполяция.*

Введение

В настоящее время существует ряд способов отслеживания траектории воздушных объектов (ВО). К ним относятся: альфа-бета фильтр, альфа-бета-гамма фильтр, фильтр Кальмана (ФК) и интерактивный многомодельный (ИММ) алгоритм.

Эти способы обладают существенными достоинствами, однако в то же время им присущи некоторые недостатки.

Для улучшения качества сопровождения ВО и устранения недостатков, характерных для всех способов, в работе предлагается в используемых алгоритмах между интервалами радиолокационных измерений (РЛИ) вычислять экстраполированные значения координат для повышения их точностных характеристик. Количество экстраполированных значений будет зависеть от величины интервала РЛИ и используемых вычислительных мощностей.

Этот метод для получения оценки координаты x может быть реализован с помощью устройства, структурная схема которого показана на рис. 1 (для получения оценок координат y и z необходимо использовать аналогичные устройства).

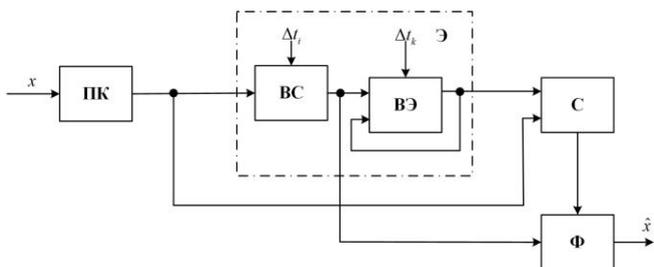


Рис. 1. Схема устройства, реализующего метод оценки координат ВО

Устройство работает следующим образом. Измеренный РЛС сигнал в сферических координатах (R, α, β) поступает на вход преобразователя координат (ПК), который преобразует их в декартовы, согласно следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} x_N &= R_N \cos \alpha_N \cos \beta_N; \\ y_N &= R_N \sin \alpha_N \cos \beta_N; \\ z_N &= R_N \sin \beta_N, \end{aligned} \quad (1)$$

где N – номер отсчета РЛИ.

В экстраполяторе (Э) в каждом промежутке между отсчетами РЛИ Δt_i рассчитываются экстраполированные значения координат ВО. Интервал между отсчетами РЛИ принимается равным $\Delta t_i = 9$ с, а экстраполированные значения координат рассчитываются через каждую секунду ($\Delta t_k = 1$ с) между отсчетами РЛИ. Таким образом, между отсчетами РЛИ имеется восемь экстраполированных значений координат.

Количество экстраполированных значений координат может быть и большим (при $\Delta t_k < 1$ с), но при этом возникает вопрос быстродействия работы устройства и возможности его технической реализации в реальном масштабе времени (РМВ).

Экстраполятор состоит из вычислителя скорости между отсчетами РЛИ (ВС) и вычислителя экстраполяции (ВЭ).

ВС рассчитывает величины проекции скорости ВО на оси ox , oy , и oz между соседними отсчетами РЛИ в соответствии со следующими соотношениями:

$$v_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t_i}; v_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta t_i}; v_{zi} = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta t_i}, \quad (2)$$

которые передает в ВЭ, где производится расчет прогнозируемых отсчетов координат, измеряемых через интервал Δt_k в соответствии со следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} x_{i(k+1)} &= x_{i(k)} + v_{xi} \Delta t_k; \\ y_{i(k+1)} &= y_{i(k)} + v_{yi} \Delta t_k; \\ z_{i(k+1)} &= z_{i(k)} + v_{zi} \Delta t_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{i(1)} = x_i; y_{i(1)} = y_i; z_{i(1)} = z_i; \Delta t_i = \rho \Delta t_k; i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, \rho$.

В сумматоре (С), измеренные и экстраполированные значения суммируются. Сигнал на выходе С схематически представлен на рис. 2. Этот сигнал передается на вход фильтра (Ф), на выходе которого формируются оценочные значения координат $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$.

Для выполнения экстраполяции воспользуемся известным $\alpha - \beta - \gamma$ - фильтром [1]. При этом, однако, может быть задействован любой из известных фильтров ($\alpha - \beta - \gamma$ - фильтр, ФК, ИММ и т.д.).

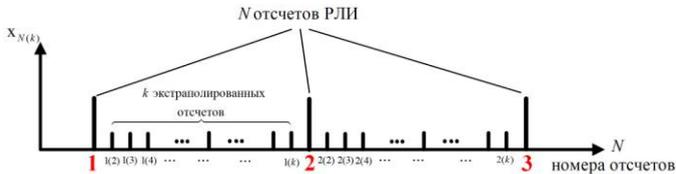


Рис. 2. Взаимное расположение отсчетов РЛИ и экстраполированных отсчетов на оси времени

Любой алгоритм характеризуется вычислительными затратами, выраженными числом арифметических операций, необходимых для его реализации [2]. Результаты аналитического расчета требуемого объема вычислений получают отдельно по числу элементарных операций.

Процесс обработки РЛИ имеет ярко выраженный информационно-логический характер [3, 4]. В нем логические операции и операции пересылки переходов составляют до 80 % от общего числа элементарных операций, выполняемых на ЭВМ в процессе реализации алгоритмов.

Рассчитаем количество операций следующим образом с учетом [5].

1. Преобразователь координат

Функциональная схема ПК представлена на рис. 3.

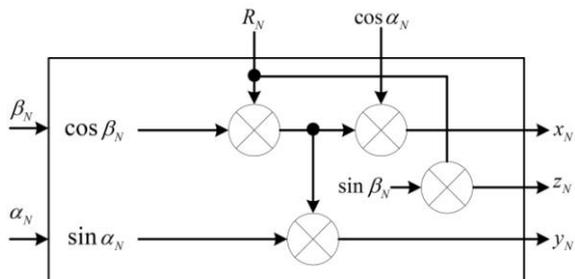


Рис. 3. Функциональная схема устройства преобразователя координат

При наличии одного ВО в соответствии с (1) количество операций будет равно 10.

2. Вычислитель скорости

Функциональная схема ВС представлена на рис. 4, где z_{t_i} – задержка на такт (Δt_i).

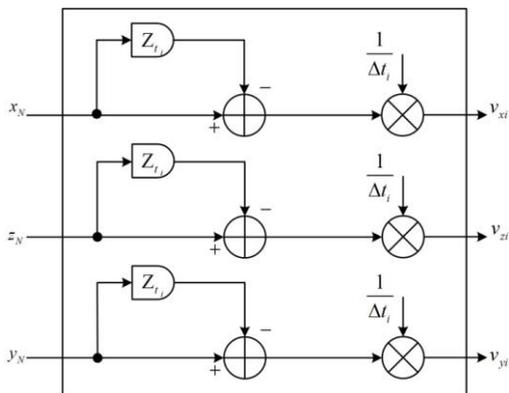


Рис. 4. Функциональная схема вычислителя скорости

При наличии одного ВО в соответствии с (2) количество операций будет равно 9.

3. Вычислитель экстраполяции

Функциональная схема ВЭ представлена на рис. 5, где z_{t_k} – задержка на такт (Δt_k).

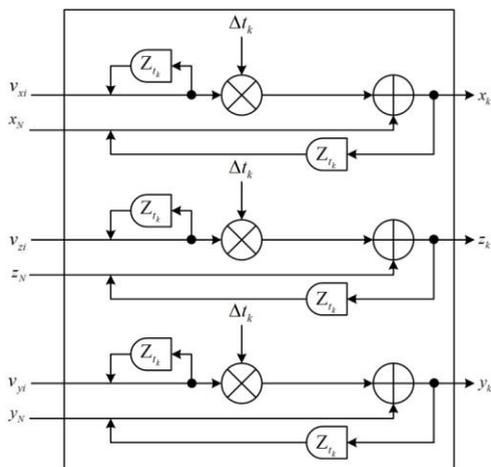


Рис. 5. Функциональная схема вычислителя экстраполяции

При наличии одного ВО в соответствии с (3) количество операций будет равно 21.

4. Сумматор

Функциональна схема С представлена на рис. 6.

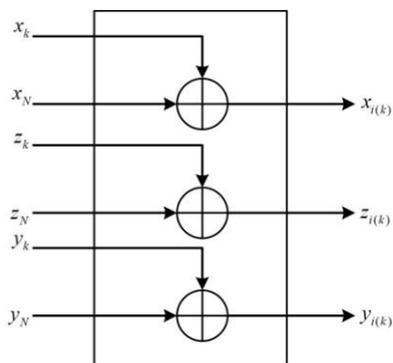


Рис. 6. Функциональная схема сумматора

При наличии одного ВО в соответствии количество операций будет равно 3.

5. $\alpha - \beta$ – фильтр

Функциональна схема $\alpha - \beta$ – фильтра представлена на рис. 7.

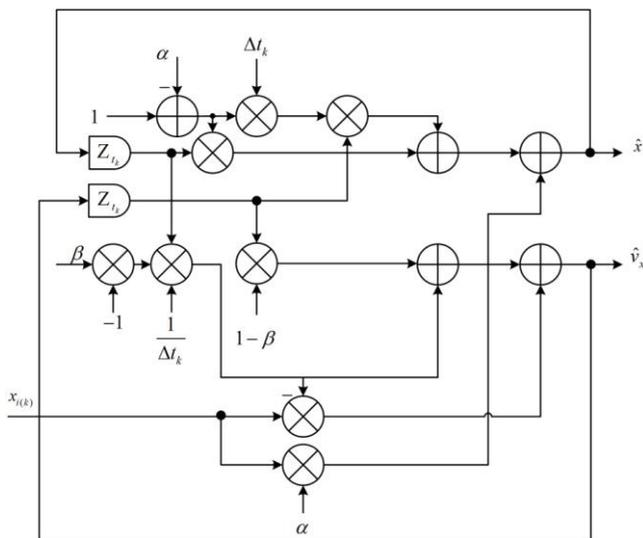


Рис. 7. Функциональная схема $\alpha - \beta$ - фильтра

При наличии одного ВО в соответствии с [5] количество операций будет равно 46.

Таким же образом получают оцениваемые значения параметров \hat{y} , \hat{v}_y , \hat{z} , \hat{v}_z .

С увеличением L_{BO} количество операций для всех рассмотренных элементов пропорционально возрастет и будет составлять соответственно $N_{ПК} = 10 L_{BO}$; $N_{ВС} = 9 L_{BO}$; $N_{ВЭ} = 21 L_{BO}$; $N_C = 3 L_{BO}$ и $N_{\alpha-\beta} = 46 L_{BO}$.

Обобщая полученные данные по количеству операций, учитывая то, что возможно изменение временных интервалов Δt_i и Δt_k , а также принимая во внимание [5] в конечном итоге для $N_{\alpha-\beta}$ может быть получено следующее соотношение:

$$N_{\alpha-\beta} = N_i L_{BO} (21 + 24\gamma + 136\mu). \quad (4)$$

В (4): $N_i = T_D \Delta t_i^{-1}$ – общее количество обращений к памяти при выполнении экстраполяции; T_D – общее время прохождения ВО зоны ответственности системы управления воздушным движением (УВД);

L_{BO} – количество сопровождаемых в зоне ответственности ВО;

$$\gamma = (\Delta t_i - \Delta t_k) \Delta t_k^{-1}; \mu = \Delta t_i \Delta t_k^{-1}.$$

На рис. 8 представлены зависимости $N_{\alpha-\beta} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$.

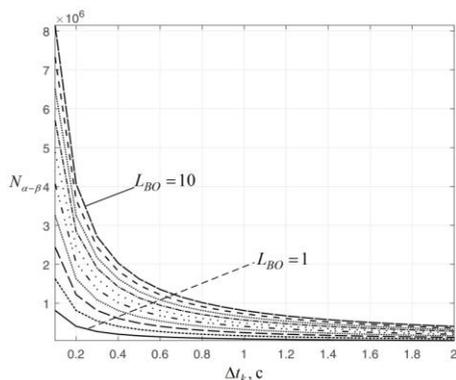
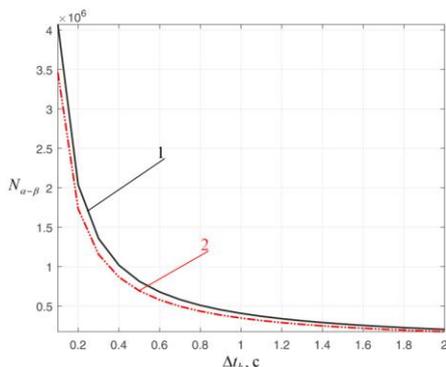


Рис. 8. Зависимости $N_{\alpha-\beta} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$. при $\Delta t_i = 5$ с

Из рис. 8 видно, что $N_{\alpha-\beta}$ возрастает с увеличением L_{BO} и уменьшается с увеличением интервала экстраполяции Δt_k .

На рис. 9 представлены зависимости $N_{\alpha-\beta} = f(\Delta t_k)$ с экстраполяцией и без нее при $\Delta t_i = 5$ с, и $L_{BO} = 5$.



1 – с экстраполяцией; 2 – без экстраполяции

Рис. 9. Зависимости $N_{\alpha-\beta} = f(\Delta t_k)$ при $\Delta t_i = 5$ с, и $L_{BO} = 5$

Из рис. 9 видно, что $N_{\alpha-\beta}$ возрастает с экстраполяцией, однако, исходя из мощностей современных вычислительных средств [6], оценка координат ВО вполне возможна в реальном масштабе времени.

В работе рассчитаны временные показатели работы по оценке координат ВО при использовании ФК, $\alpha-\beta$ – фильтра без экстраполяции, $\alpha-\beta$ – фильтра с экстраполяцией и ИММ-фильтра. Эти показатели для $L_{BO} = 1$, $\Delta t_i = 9\text{с}$ и $\Delta t_k = 1\text{с}$ обобщены в таблице.

Таблица

Временные показатели работы по оценке координат ВО

Алгоритм обработки	Время, с
ФК	4,228
$\alpha-\beta$ – фильтр	2,403
ИММ-фильтр	15,503
$\alpha-\beta$ – фильтр с экстраполяцией	11,167

Данные таблицы свидетельствуют об увеличении вычислительной сложности с экстраполяцией по сравнению с ФК и $\alpha-\beta$ – фильтром без экстраполяции. Но при этом, как можно отметить, ИММ фильтр превосходит по своей вычислительной сложности фильтрацию с экстраполяцией.

При движении ВО по заданной траектории вокруг нее строится область безопасности (ОБ). Размеры ОБ определяются нормами продольного, бокового и вертикального эшелонирования, она может быть представлена в виде параллелограмма, цилиндра, сферы, эллипсоида вращения [7].

В соответствии с требованиями по производству полетов принято, что вероятность нарушения безопасности полетов должна быть $P_{\text{НБП}} \leq 10^{-6}$ [8].

Область безопасности ВО зависит от точности измерения дальности и угловых координат. При моделировании среднеквадратические отклонения (СКО) оценок координат ВО относительно РЛС оказались практически одинаковыми, при этом область безопасности вокруг ВО можно аппроксимировать объемной фигурой в виде сферы объемом равным

$$W_n = 1,33\pi (6\sigma_{\Delta})^3, \quad (5)$$

где σ_{Δ} – пересчитанная в линейные размеры СКО угловых координат.

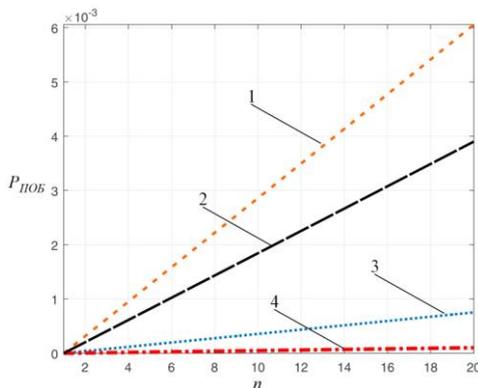
Область (объем) зоны ответственности РЛС w_n составляет в пространстве приблизительно $9,77 \times 10^{11}$ м³. Геометрический объем современного высокой маневренного воздушного судна в пространстве $dW \approx 1,9125 \times 10^3$ м³. Тогда вероятность непопадания ВО в область безопасности

$$P_{НП} = 1 - \frac{dW}{w_n}. \quad (6)$$

Вероятность пересечения ОБ для n ВО, находящихся в зоне ответственности аэродрома, будет определяться по формуле:

$$P_{П ОБ} = \frac{(n-1)W_n}{W_p - (n-1)W_n} P_{НП}. \quad (7)$$

На основе выражений (5) - (7) и значений СКО оценки угловых координат ВО была рассчитана вероятность пересечения областей безопасности ВО $P_{П ОБ}$, а следовательно и возникновения потенциально-конфликтных ситуаций от точностных характеристик РЛС в зависимости от числа ВО n .



1 – $\alpha - \beta$ – фильтр; 2 – ФК; 3 – ИММ фильтр; 4 – $\alpha - \beta$ – фильтр с экстраполяцией

Рис. 10. Зависимость $P_{П ОБ}$ от точностных характеристик РЛС в зависимости от числа ВО

Заключение

Анализ зависимостей $P_{П ОБ}$ представленных на рис. 10 позволяет сделать следующие выводы:

1. При использовании предлагаемого фильтра с экстраполяцией с учетом пространственного положения цели уменьшается вероятность пересечения областей безопасности летательных аппаратов по сравнению с ФК (36 раз), $\alpha - \beta$ – фильтром (56 раз), и ИММ фильтром (7 раз).

2. С увеличением количества самолетов в ближней зоне разность вероятностей пересечения областей безопасности алгоритма с экстраполяцией возрастает, по сравнению с ФК, $\alpha - \beta$ – фильтром, и ИММ фильтром, что позволяет увеличить пропускную способность системы посадки в районе аэродрома.

Список литературы

2. 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.

3. Информационные технологии в радиотехнических системах : учебное пособие /В.А. Васин [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 243 с.

4. Пузырев В.А. Алгоритмы оценивания параметров движения летательных аппаратов / В.А. Пузырев, М.А. Гостюхина. – //Зарубежная радиоэлектроника. –1981. – №4. – С. 3-25.

5. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов / Ю.Г. Сосулин. М.: Сов. Радио, 1978. – 320 с.

6. Counting-the-floating-point-operations-flops. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50608>. Дата обращения 08.11.2022.

7. 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.

8. Кузмин С.З., Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузмин. – М.: Советское радио, 1974. – 433 с.

9. Мелехов Я.А., Анализ и разработка алгоритмов совместной обработки информации в системах относительной навигации / Я.А. Мелехов. – Санкт-Петербург, 2014. – 143 с.