

# **Исследование возможности практической реализации алгоритмов автосопровождения траекторий воздушных объектов**

М. Альмахмуд, 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)

© Альмахмуд М., Богословский Е. А., 2022

## 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.

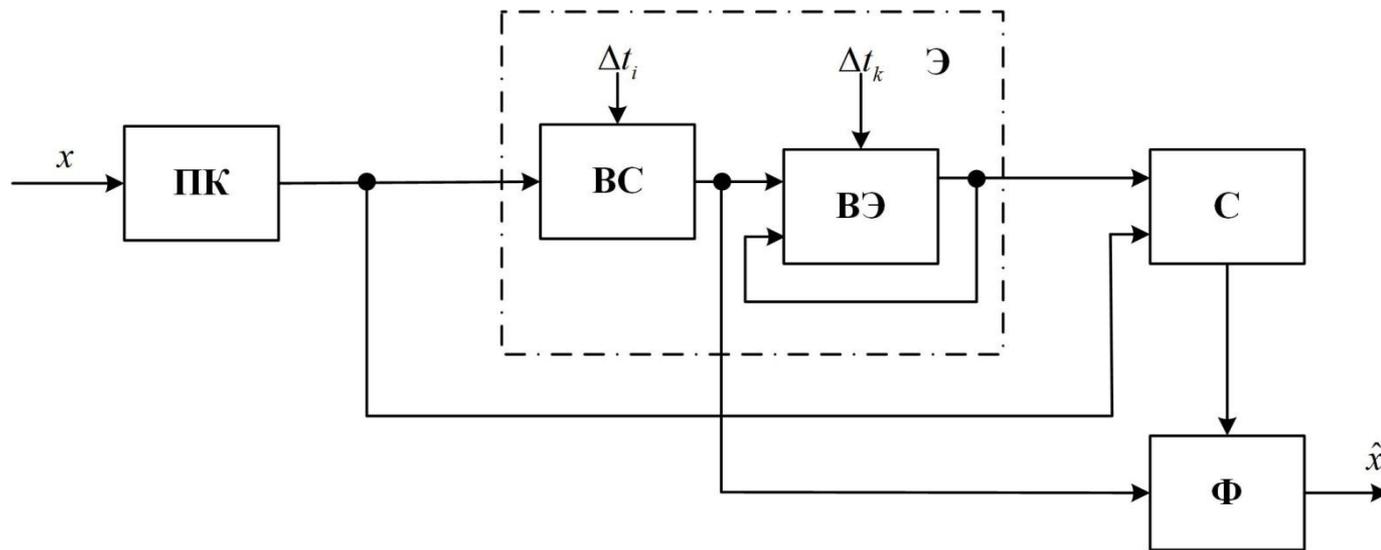


Рис. 1 Схема устройства, реализующего метод оценки координат ВО

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

$$x_N = R_N \cos \alpha_N \cos \beta_N ;$$

$$y_N = R_N \sin \alpha_N \cos \beta_N ;$$

$$z_N = R_N \sin \beta_N ,$$

где  $N$  – номер отсчета РЛИ.

В экстраполяторе (Э) в каждом промежутке между отсчетами РЛИ  $\Delta t_i$  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 проекций скорости ВО на оси  $OX$ ,  $OY$ , и  $OZ$  между соседними отсчетами РЛИ в соответствии со следующими соотношениями:

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

которые передает в ВЭ, где производится расчет прогнозируемых отсчетов координат, измеряемых через интервал  $\Delta t_k$  в соответствии со следующими уравнениями:

$$x_{i(k+1)} = x_{i(k)} + v_{xi} \Delta t_k ;$$

$$y_{i(k+1)} = y_{i(k)} + v_{yi} \Delta t_k ;$$

$$z_{i(k+1)} = z_{i(k)} + v_{zi} \Delta t_k ,$$

где

$$x_{i(1)} = x_i ; y_{i(1)} = y_i ; z_{i(1)} = z_i ; \Delta t_i = 9 \Delta t_k ; i = 1, 2, \dots, N ; k = 1, 2, \dots, 9 .$$

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  $\alpha - \beta$  - фильтром. При этом, однако, может быть задействован любой из известных фильтров ( $\alpha - \beta - \gamma$  - фильтр, ФК, ИММ и т.д.).

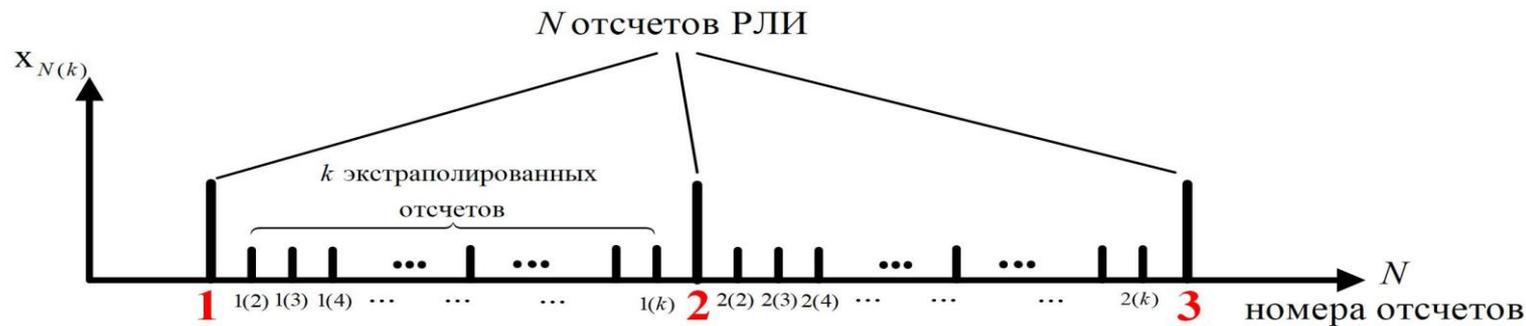


Рис. 2 Взаимное расположение отсчетов РЛИ и экстраполированных отсчетов на оси времени

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

Обобщая полученные данные по количеству операций, учитывая то, что возможно изменение временных интервалов в конечном итоге для может быть получено следующее соотношение:

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

$N_i = T_d \Delta t_i^{-1}$  – 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. 3 представлены зависимости  $N_{\alpha-\beta} = f(L_{BO}, \Delta t_k)$ .

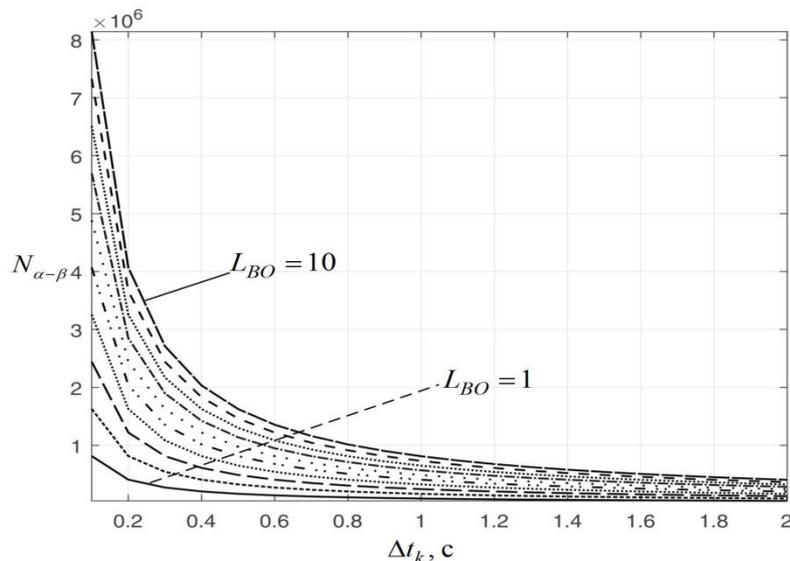
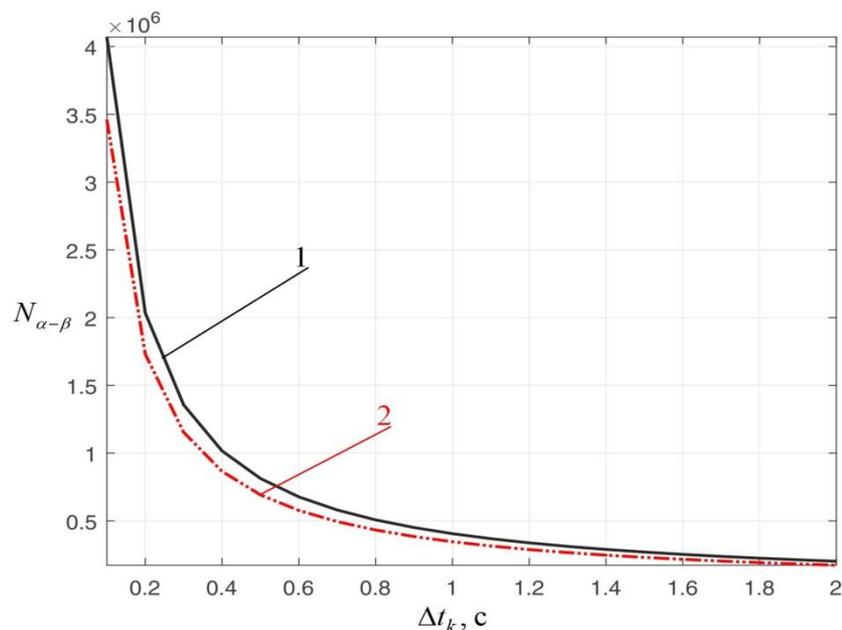


Рис 3 Зависимости

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

Из рис. 3 видно, что  $N_{\alpha-\beta}$  возрастает с увеличением  $L_{BO}$  и уменьшается с увеличением интервала экстраполяции  $\Delta t_k$ .

На рис. 4 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. 4. Зависимости при  $\Delta t_i = 5$  с, и  $L_{BO} = 5$

Из рис. 4 видно, что  $N_{\alpha-\beta}$  возрастает с экстраполяцией, однако, исходя из мощностей современных вычислительных средств, 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 1.

Таблица 1

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

Данные таблицы 1 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.

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

фигурой в виде сферы объемом равным

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

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

где  $\sigma_{\Delta}$  – пересчитанная в линейные размеры СКО угловых координат.

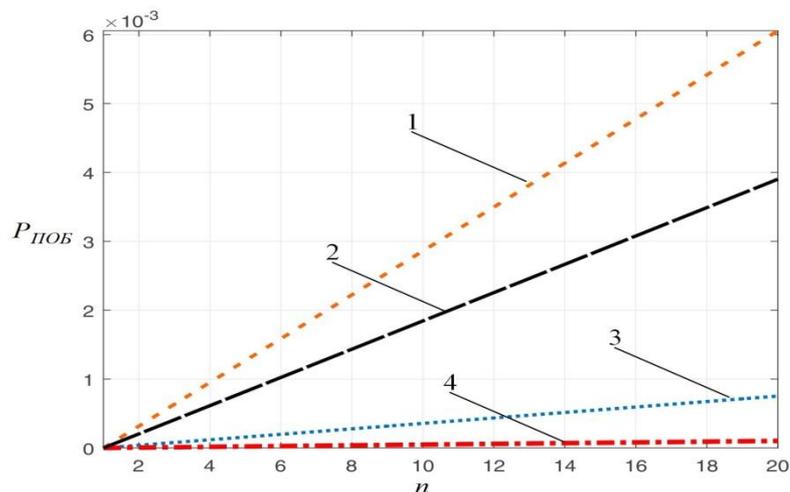
Область (объем) зоны ответственности РЛС  $w_n$  составляет в пространстве приблизительно  $9,77 \times 10^{11} \text{ м}^3$ . Геометрический объем современного высокой маневренного воздушного судна в пространстве  $dW \approx 1,9125 \times 10^3 \text{ м}^3$ . Тогда вероятность непопадания ВО в область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

$$P_{\text{нп}} = 1 - \frac{dW}{W_n}. \quad (2)$$

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

$$P_{\text{поб}} = \frac{(n-1)W_n}{W_p - (n-1)W_n} P_{\text{нп}}. \quad (3)$$

На основе выражений (1) - (3) и значений СКО оценки угловых координат ВО была рассчитана вероятность пересечения областей безопасности ВО  $P_{\text{поб}}$ , 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

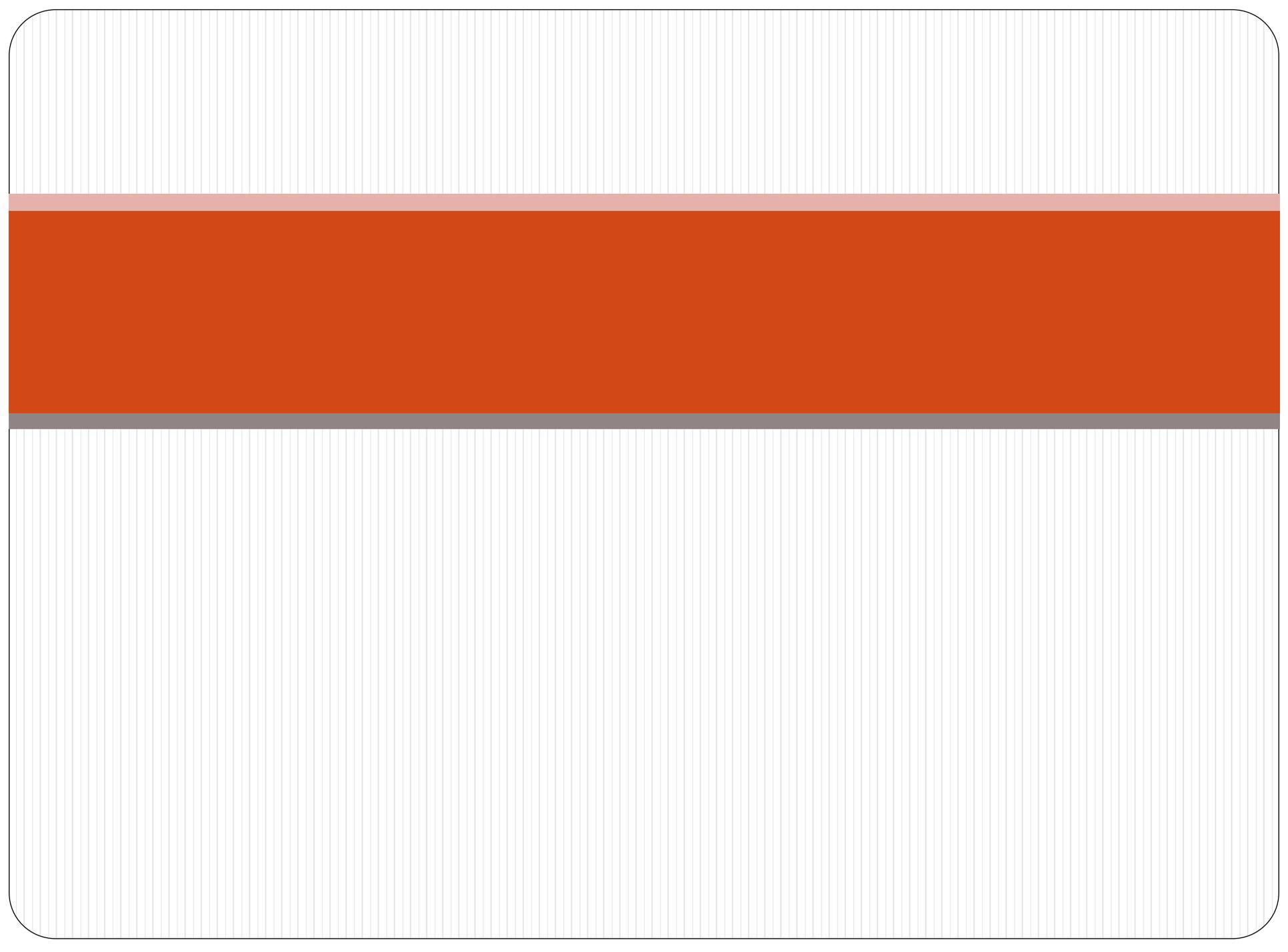
Рис. 5 Зависимость  $P_{\text{поб}}$  от  
 точностных характеристик РЛС в  
 зависимости от числа ВО

## Заключение

Анализ зависимостей  $P_{\text{поб}}$  представленных на рис. 5 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.



**Спасибо за внимание!**