

УДК 621.396.99

ЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ В ОХРАННОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Б.А. Заикин

*Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: halfmazerkin@gmail.com*

Статья посвящена оценке качества фильтрации выходных данных в охранной однопозиционной системе. Обоснована актуальность проблемы и предложен подход к описанию оценки качества фильтрации. Приведено геометрическое построение охранной однопозиционной системы, её математическое описание и модель в виде марковской последовательности, описывающей движение объекта наблюдения. Для заданной системы даны соотношения, позволяющие определить оценки параметров радиосигналов, а также результаты оценивания выходных данных α - β фильтром, фильтром Винера и фильтром Калмана. Описано определение критерия качества процесса фильтрации, параметры моделирования системы и результаты моделирования. Предложенный критерий качества фильтрации включает выборочное среднее, исправленную выборочную дисперсию и исправленное выборочное среднеквадратическое отклонение ошибок и расстояния между истинными и оцененными значениями координат объекта наблюдения. Установлено, что качество фильтрации улучшается с увеличением отношения сигнал/шум и ширины спектра зондирующего сигнала. Показана наибольшая эффективность фильтра Калмана среди перечисленных выше.

Ключевые слова: линейная фильтрация, фильтр Калмана, фильтр Винера, α - β фильтр, оценка качества фильтрации, охранная система.

LINEAR FILTERING OF OUTPUT DATA OF A SINGLE-POSITION SECURITY SYSTEM

B.A. Zaikin

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia
@Corresponding author e-mail: halfmazerkin@gmail.com*

Obtaining an estimation of the filtering quality of a single-position security system is described in the paper. A general description of problems of estimation of filtering quality in the system is presented in the introduction. A geometric construction of a single-position security system, its mathematical description and formulas of Markov sequence that describes the motion of an object under observation are given. Descriptions of the processes of estimation with the use of α - β filtering, Wiener filtering, Kalman filtering for the system are presented.

A definition of estimation describes criteria for the quality of filtering process, parameters for modeling the system and the results of the modeling. The suggested criteria for the quality of filtering process include average, variance and standard deviation of filtering errors and interval between the true and filtering values. Initial values for the modeling and the results of the modeling are presented. In conclusion, the filtering improves with increasing spectral width of probing signal and signal/noise ratio. However, Kalman filtering is most effective.

Keywords: linear filtering, Kalman filter, Wiener filter, α - β filter, estimating the quality of filtering, security system.

Введение

Задачи получения оценок параметров радиосигналов и фильтрации выходных данных в радиолокационных системах являются одними из ключевых в радиотехнике. Они формулируются следующим образом: по принятой реализации сигнала необходимо определить значение параметра сигнала с минимальной погрешностью. Что касается фильтрации наблюдаемых параметров, то эта проблема более общая и сложная: предполагается, что оцениваемый параметр наблюдения может меняться во времени, и он также подлежит определению с минимальной погрешностью в течение заданного интервала времени. В радиотехнике указанные задачи нередко дополняют друг друга, причем возможно выбрать такие интервалы наблюдения, при которых измеряемый параметр считается постоянным, и на таких интервалах производят оценку параметра. Далее, объединяя такие интервалы (траекторная обработка), используют различные методы фильтрации. Существует множество подходов к реализации процедур оценки и фильтрации [1–4], однако они дают выражения только в общем виде, а конкретных характеристик качества фильтрации при заданном характере изменения измеряемых параметров и самой технической системы – не дают. Таким образом, возникает задача оценки качества фильтрации в некоторой конкретной радиолокационной системе при использовании различных типов фильтрации.

В настоящей работе рассмотрена охранная однопозиционная система, которая посылает сигнал до объекта наблюдения (ОН) и принимает эхосигнал. Соответственно, принятый эхосигнал зависит от местоположения и характера движения ОН. В качестве модели движения ОН предложена марковская последовательность.

1. Охранная однопозиционная система и объект наблюдения

Как уже отмечалось выше, охранная система представляет собой однопозиционную радиосистему, которая в импульсном режиме облучает ОН и принимает эхосигнал. Она изображена на рис. 1. Система измеряет временную задержку распространения импульсного сигнала τ от охранной системы до объекта и пеленг β , которые, в свою очередь, зависят от положения ОН в декартовой системе координат X и Y . Отсюда можно записать следующие формулы связи между измеряемыми параметрами и координатами ОН при приеме ν -го импульса:

$$R^{(\nu)} = \frac{\tau^{(\nu)}c}{2}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} R^{(v)} = \sqrt{x^{(v)2} + y^{(v)2}}, \\ \beta^{(v)} = \arctg\left(\frac{y^{(v)}}{x^{(v)}}\right), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x^{(v)} = R^{(v)} \cos(\beta^{(v)}), \\ y^{(v)} = R^{(v)} \sin(\beta^{(v)}), \end{cases} \quad (3)$$

где $R^{(v)}$ – расстояние от охранной системы до объекта в v -ый момент времени;
 c – скорость распространения радиоволны.

Отметим также, что в общем случае выражение для пеленга в (2) должно зависеть от того, в каком квадранте находится ОН. В нашем случае подразумевается, что объект находится в первом квадранте (рис. 1).

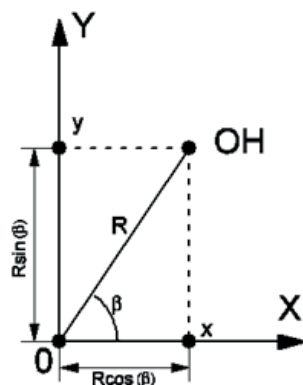


Рис. 1. Геометрическое построение охранной однопозиционной системы.

В качестве модели передвижения объекта наблюдения нами предложена марковская последовательность:

$$\vec{\Lambda}^{(v)} = \Phi^{(v)} \vec{\Lambda}^{(v-1)} + B \vec{N}^{(v)}, \quad (4)$$

где $\vec{\Lambda}^{(v)}$ – вектор состояния ОН на v -ом интервале;
 $\Phi^{(v)}$ – матрица перехода от $(v-1)$ -го к v -ому состоянию;
 B – матрица диффузии;
 $\vec{\Lambda}^{(v-1)}$ – вектор состояния на предыдущем шаге;
 $\vec{N}^{(v)}$ – реализация гауссовского случайного вектора с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

В рассматриваемом случае $\vec{\Lambda}^{(v)} = [x^{(v)} \ y^{(v)}]^T$, $\vec{\Lambda}^{(v-1)} = [x^{(v-1)} \ y^{(v-1)}]^T$.

Предположим также, что имеем дело с маломаневренным объектом (например, автомобилем) и $\Phi^{(v)} = I$. Отсюда получаем:

$$\vec{\Lambda}^{(v)} = \vec{\Lambda}^{(v-1)} + B \vec{N}^{(v)}, \quad (5)$$

или в скалярном виде

$$\begin{cases} x^{(v)} = x^{(v-1)} + 3b_x n_{b_x}^{(v)}, \\ y^{(v)} = y^{(v-1)} + 3b_y n_{b_y}^{(v)}, \end{cases} \quad (6)$$

где b_x, b_y – среднеквадратические отклонения (СКО) изменения координат за один такт;
 $n_{b_x}^{(v)}, n_{b_y}^{(v)}$ – гауссовские случайные величины.

Коэффициент 3 в системе уравнений (6) означает, что случайные величины $x^{(v)}, y^{(v)}$ попадают в интервалы $\pm 3b_x, \pm 3b_y$.

2. Получение оценки и фильтрация

Несмотря на то, что в данной работе изменение объекта происходит в декартовой системе координат, подвергаться оцениванию будут первичные параметры, а именно временная задержка $\tau^{(v)}$ и пеленг $\beta^{(v)}$ сигнала (которые образуют вектор $\vec{Q}^{(v)} = [\tau^{(v)} \beta^{(v)}]^T$) с дальнейшим их переводом в декартову систему координат. Как было указано выше, сначала происходит оценка параметра за интервал наблюдения, в течение которого ОН считается неподвижным. Интервал наблюдения будем считать равным одному импульсу. Оценка по одиночному импульсу может быть записана как:

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{od}^{(v)} = \tau^{(v)} + 3\sigma_\tau n_{\sigma_\tau}^{(v)}, \\ \hat{\beta}_{od}^{(v)} = \beta^{(v)} + 3\sigma_\beta n_{\sigma_\beta}^{(v)}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\sigma_\tau, \sigma_\beta$ – среднеквадратичные отклонения измерения временной задержки и пеленга, $n_{\sigma_\tau}^{(v)}$;
 $n_{\sigma_\beta}^{(v)}$ – гауссовские случайные величины.

Полученные таким образом оценки подвергаются фильтрации. Коэффициент 3 в системе (7) предполагает, что случайные величины $\hat{\tau}_{od}^{(v)}, \hat{\beta}_{od}^{(v)}$ попадают в интервалы $\pm 3\sigma_\tau, \pm 3\sigma_\beta$. Рассмотрим некоторые виды линейных фильтров [5].

$\alpha - \beta$ фильтр. Данный тип фильтрации подразумевает в общем виде отдельное оценивание координатного параметра (в выражениях фигурирует переменный коэффициент α) и скорости изменения координатного параметра (фигурирует коэффициент β). Под координатными параметрами подразумеваются непосредственно координаты объекта, а также связанные с ним временные задержки, пеленги и пр. Поскольку в рассматриваемой задаче нас интересуют координаты цели, рассмотрим только уравнение фильтрации координатного параметра:

$$\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{Q}_s^{(v)} + \alpha(Z^{(v)} - H^{(v)}\hat{Q}_s^{(v-1)}), \quad (8)$$

где $\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v)}$ – оценённые параметры на текущем шаге;

α – коэффициент фильтрации;

$Z^{(v)}$ – значения измеряемых величин на текущем шаге;

$H^{(v)}$ – матрица, определяющая связь измеряемых величин $Z^{(v)}$ и параметров $Q^{(v)}$ на текущем шаге;

$\hat{Q}_3^{(v)}$ – экстраполяционные (прогнозируемые) оцененные значения параметров на предыдущем шаге.

Матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ может быть вычислена, как:

$$\hat{Q}_3^{(v)} = \Phi_3^{(v)} \hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}, \quad (9)$$

где $\Phi_3^{(v)}$ – экстраполируемая матрица перехода;

$\hat{Q}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}$ – значение оцененного параметра на предыдущем шаге.

В ряде работ было показано, что хорошие показатели оценивания можно получить, если выбрать параметр α в зависимости от номера такта оценивания [5]:

$$\alpha = \frac{2(2v-1)}{v(v+1)}. \quad (10)$$

Уравнения (8) в случае рассматриваемых системы и объекта примут следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} + \alpha(\hat{z}_{od}^{(v)} - \hat{z}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}), \\ \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v)} = \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v-1)} + \alpha(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{\alpha-\beta}^{(v-1)}) \end{cases} \quad (11)$$

Фильтр Винера. Основное уравнение оценивания с использованием фильтра Винера имеет вид:

$$\hat{Q}_{Wiener}^{(v)} = \hat{Q}_3^{(v)} + K_0 \left(Z^{(v)} - H^{(v)} \hat{Q}_3^{(v-1)} \right) \quad (12)$$

где K_0 – вектор постоянных коэффициентов усиления.

Этот вектор можно вычислить заранее. Матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ вычисляется согласно (9), путем подстановки фильтруемых значений из (12). В рассматриваемом нами случае выражения фильтрации (12) представим в виде:

$$\begin{cases} \hat{z}_{Wiener}^{(v)} = \hat{z}_{Wiener}^{(v-1)} + K_0 \left(\hat{z}_{od}^{(v)} - \hat{z}_{Wiener}^{(v-1)} \right), \\ \hat{\beta}_{Wiener}^{(v)} = \hat{\beta}_{Wiener}^{(v-1)} + K_0 \left(\hat{\beta}_{od}^{(v)} - \hat{\beta}_{Wiener}^{(v-1)} \right) \end{cases} \quad (13)$$

Фильтр Калмана. Основное уравнение оценивания с использованием фильтра Калмана представляется в виде:

$$\hat{Q}_{Kalman}^{(v)} = \hat{Q}_3^{(v)} + K_f^{(v)} \left(Z^{(v)} - H^{(v)} \hat{Q}_3^{(v-1)} \right) \quad (14)$$

где матрица $\hat{Q}_3^{(v)}$ вычисляется согласно (9), путем подстановки фильтруемых значений из (14); $K_f^{(v)}$ – матрица коэффициентов усиления фильтра, равная

$$K_f^{(v)} = K_3^{(v)} + H^{(v)T} \left(H^{(v)} K_3^{(v)} H^{(v)T} + K_q \right). \quad (15)$$

В (15) K_q – ковариационная матрица измерения, $K_3^{(v)}$ – экстраполяционная ковариационная матрица погрешности оценки вектора состояния, которая вычисляется, как:

$$K_3^{(v)} = \Phi_3^{(v)} K_{q\text{Kalm}}^{(v-1)} \Phi_3^{(v-1)T} + B_q^{(v)}, \quad (16)$$

где $B_q^{(v)}$ – ковариационная матрица, характеризующая стохастическое движение ОН;

$K_{q\text{Kalm}}^{(v-1)}$ – ковариационная матрица погрешности оценки вектора состояния на предыдущем шаге.

Соответственно, ковариационная матрица оценки вектора состояния на текущем шаге имеет следующий вид:

$$K_{q\text{Kalm}}^{(v)} = K_3^{(v)} - K_f^{(v)} H^{(v)} K_3^{(v)}. \quad (17)$$

В случае однопозиционной охранной системы уравнения (14) записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{\text{Kalman}}^{(v)} = \hat{\tau}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} + K_f^{(v)}(11) \left(\hat{\tau}_{\text{od}}^{(v)} - \hat{\tau}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} \right) + K_f^{(v)}(12) \left(\hat{\tau}_{\text{od}}^{(v)} - \hat{\tau}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} \right) \\ \hat{\beta}_{\text{Kalman}}^{(v)} = \hat{\beta}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} + K_f^{(v)}(21) \left(\hat{\beta}_{\text{od}}^{(v)} - \hat{\beta}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} \right) + K_f^{(v)}(22) \left(\hat{\beta}_{\text{od}}^{(v)} - \hat{\beta}_{\text{Kalman}}^{(v-1)} \right) \end{cases} \quad (18)$$

где $K_f^{(v)}(11)$, $K_f^{(v)}(12)$, $K_f^{(v)}(21)$, $K_f^{(v)}(22)$ – элементы матрицы (15), которая в нашем случае выглядит так:

$$K_f^{(v)} = \begin{bmatrix} K_f^{(v)}(11) & K_f^{(v)}(12) \\ K_f^{(v)}(21) & K_f^{(v)}(22) \end{bmatrix} = K_3^{(v)} [K_3^{(v)} + K_q]^{-1}. \quad (19)$$

При этом:

$$K_q = \begin{bmatrix} \sigma_\tau^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta^2 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Матрица $K_3^{(v)}$ вычисляется здесь в виде:

$$K_3^{(v)} = K_{q\text{Kalm}}^{(v-1)} + B_q^{(v)}. \quad (21)$$

Матрица $B_q^{(v)}$ имеет некоторую специфику при вычислении, связанную с тем, что ОН движется в декартовой системе координат, причем фильтрация происходит в полярной системе координат. Поэтому необходимо на каждом шаге пересчитывать ковариационную матрицу:

$$B_q^{(v)} = W_{q\lambda} B B^T W_{q\lambda}^T, \quad (22)$$

где B – матрица диффузии из (4):

$$BB^T = \begin{bmatrix} b_x^2 & 0 \\ 0 & b_y^2 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Матрица $W_{q\lambda}$ – матрица первых частных производных первичных параметров по координатам в точке экстраполяции на v -ом шаге:

$$W_{q\lambda} = \begin{bmatrix} \frac{d\tau}{dx} & \frac{d\tau}{dy} \\ \frac{d\beta}{dx} & \frac{d\beta}{dy} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Найдем первые частные производные. Из (1) и (2) получаем:

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{2x}{c\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (25)$$

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{2y}{c\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (26)$$

$$\frac{d\beta}{dx} = -\frac{y}{x^2 + y^2}, \quad (27)$$

$$\frac{d\beta}{dy} = \frac{x}{x^2 + y^2}. \quad (28)$$

В конце каждой итерации вычисляется матрица (17), которая в рассматриваемом случае примет вид:

$$K_{q\text{Kalm}}^{(v)} = K_g^{(v)} - K_f^{(v)}K_g^{(v)}. \quad (29)$$

3. Моделирование

Для моделирования необходимо задаться конкретными параметрами рассматриваемой системы, а также определить эффективные критерии оценки качества фильтрации.

Критерии качества фильтрации. В качестве простейшей оценки можно взять точечную ошибку по каждой координате:

$$\begin{cases} e_x^{(v)} = x^{(v)} - \hat{x}_\phi^{(v)}, \\ e_y^{(v)} = y^{(v)} - \hat{y}_\phi^{(v)}, \end{cases} \quad (30)$$

где в качестве $\hat{x}_\phi^{(v)}$, $\hat{y}_\phi^{(v)}$ могут выступать $\hat{x}_{\alpha-\beta}^{(v)}$, $\hat{x}_{Wiener}^{(v)}$, $\hat{x}_{Kalman}^{(v)}$ и $\hat{y}_{\alpha-\beta}^{(v)}$, $\hat{y}_{Wiener}^{(v)}$, $\hat{y}_{Kalman}^{(v)}$, соответственно.

Чтобы дать обобщённую оценку ошибки фильтрации, целесообразно рассмотреть расстояние между истинными значениями координат и значениями, полученными в результате фильтрации:

$$d^{(v)} = \sqrt{(x^{(v)} - \hat{x}_{\phi}^{(v)})^2 + (y^{(v)} - \hat{y}_{\phi}^{(v)})^2}. \quad (31)$$

Ввиду того, что величины (30) и (31) являются случайными, для численных оценок качества фильтрации возьмем числовые характеристики статистических распределений – выборочное среднее, исправленная выборочная дисперсия и исправленное выборочное среднеквадратическое отклонение [6]:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n z^{(v)}, \quad (32)$$

$$D_z = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (z^{(v)} - \bar{z})^2, \quad (33)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (z^{(v)} - \bar{z})^2}. \quad (34)$$

В (32) – (34) в качестве z могут выступать либо точечные ошибки (30), либо расстояние (31). Суммы в (32) – (34) обычно ограничиваются n – числом импульсов за время наблюдения.

Среднеквадратические отклонения измерений временной задержки и пеленга (СКО). СКО измерения задержки σ_{τ} могут быть рассчитаны по формуле потенциальной точности [5]:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{\Delta f_c \sqrt{\frac{2E}{N_0}}}, \quad (35)$$

где Δf – ширина спектра эхосигнала;

$\frac{2E}{N_0}$ – энергетическое отношение сигнал к шуму.

СКО измерения пеленга σ_{β} определим в соответствии с [7]. В антенной решетке для карандашного луча количество излучающих элементов N связано с шириной луча θ на уровне 0.5 по мощности выражением:

$$\theta \approx \frac{100}{\sqrt{N}}. \quad (36)$$

С помощью (36), согласно графикам, которые были построены П. Сверлингом [7], найдем σ_{β} . График представляет собой зависимость величины $\sigma_{\beta} \frac{\sqrt{N}}{\theta}$ от отношение сигнал/шум (ОСШ) в дБ для флуктуирующей и нефлуктуирующей цели. Следовательно, задаваясь числом излучающих элементов N , можно определить σ_{β} для различных ОСШ.

Параметры охранной системы и объекта наблюдения. Зададимся некоторыми конкретными исходными параметрами охранной двухпозиционной радиосистемы координатометрии и объекта наблюдения. В процессе моделирования будем менять некоторые из них, оценивая при этом показатели качества и, таким образом, определяя влияние конкретного параметра на эти показатели качества.

Период следования импульсов брали равным $T_c = 0.001$ с. При этом время наблюдения было ограничено $t_{набл.} = 1$ с, и, соответственно, ограничено количество тактов $n = 1000$. Ширина спектра зондирующего сигнала составила 1 ГГц, а ОСШ = 0 дБ. Отсюда среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_\tau = 10^{-9}$ с. Размеры антенной решетки брали 10 на 10 элементов, так что общее число $N = 100$. Значения σ_β принимали одинаковыми и равными 0.9 градусов. Начальные координаты объекта наблюдения выбирали из условия, что ОН в начальный момент находится на расстоянии $R^{(1)} = 1500$ м от охранной системы, а угол $\beta^{(1)} = 45^\circ$. Следовательно, начальные координаты ОН по осям X, Y составили $x^{(1)} = y^{(1)} = 1061$ м. СКО траекторных флуктуаций за интервал наблюдения 1 с (соизмеримый с интервалом корреляции) считали одинаковыми и равными $b_x = b_y = 1$ м. Таким образом, получаем СКО флуктуаций траектории за один такт $b_{xT_c} = b_{yT_c} = 0.001$ м.

Полученные результаты

На рис. 2 приведены графики расстояния между истинным значением и оценёнными значениями (31) в зависимости от времени при фильтрации различными фильтрами с использованием указанных выше параметров. Для всех типов фильтрации взяты одинаковые исходные данные движения ОН.

Остальные результаты моделирования представлены в виде таблицы. В ней указывается тип фильтрации; после чего следует параметр охранной системы или ОН, значение которого было изменено, при этом остальные параметры соответствуют типовому значению; затем следуют полученные численные оценки (32)–(34). Данные получены как усреднённый показатель по 10 реализациям.

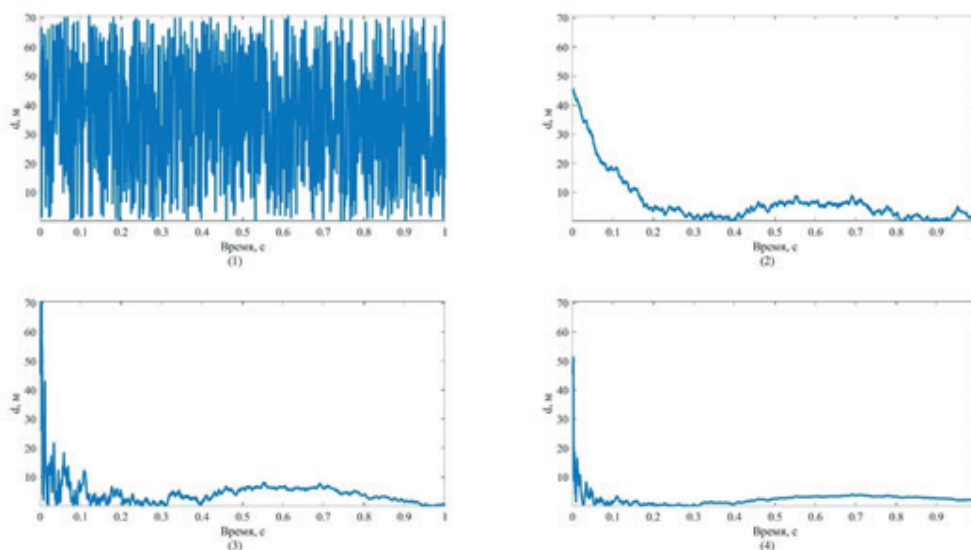


Рис. 2. Результаты работы различных типов фильтрации при одинаковых исходных параметрах.

- (1) – СКО при оценке; (2) – СКО при фильтрации Винера при $K_0 = 0.01$;
 (3) – СКО при $\alpha - \beta$ фильтрации; (4) – СКО при фильтрации Калмана.

Численные оценки качества фильтрации для различных типов фильтрации

Тип фильтрации	Параметр, м	\bar{a} , м	D_{e_x} , м ²	D_{e_y} , м ²	D_d , м ²	σ_{e_x} , м	σ_{e_y} , м	σ_d , м
Без фильтрации	-	35.46	835.09	835.32	412.86	28.90	28.90	20.32
Винера	$K_0 = 0.01$	5.71	49.49	50.02	86.75	6.61	6.63	8.68
$\alpha - \beta$	-	2.83	29.27	29.32	50.93	5.21	5.22	6.84
Калмана	-	1.69	5.25	5.23	9.83	2.20	2.20	2.99
Винера	$K_0 = 0.001$	25.81	35.28	36.00	71.26	5.15	5.21	7.33
Винера	$K_0 = 0.0001$	36.84	0.72	0.76	1.47	0.74	0.76	1.06
Винера	$K_0 = 0.1$	7.71	45.54	45.67	33.57	6.73	6.74	5.77
Без фильтрации	ОСШ = 3 дБ	23.60	371.18	371.07	185.40	19.26	19.26	13.61
$\alpha - \beta$	ОСШ = 3 дБ	2.08	13.94	14.99	24.96	3.50	3.59	4.57
Калмана	ОСШ = 3 дБ	1.17	1.90	1.89	3.32	1.29	1.29	1.67
Без фильтрации	ОСШ = 5 дБ	17.58	206.24	206.30	103.67	14.36	14.36	10.18
$\alpha - \beta$	ОСШ = 5 дБ	1.67	8.28	8.36	14.62	2.71	2.73	3.55
Калмана	ОСШ = 5 дБ	1.41	1.63	1.61	2.80	1.24	1.24	1.62
Без фильтрации	$\Delta f_c = 3$ ГГц	34.89	813.88	813.79	410.59	28.53	28.52	20.26
$\alpha - \beta$	$\Delta f_c = 3$ ГГц	3.39	39.34	40.77	69.73	5.96	6.07	7.85
Калмана	$\Delta f_c = 3$ ГГц	2.35	5.12	5.11	8.87	2.21	2.21	2.90
Без фильтрации	$\Delta f_c = 5$ ГГц	35.65	841.95	841.30	413.53	29.02	29.00	20.33
$\alpha - \beta$	$\Delta f_c = 5$ ГГц	3.21	26.67	26.62	45.42	4.99	4.97	6.43
Калмана	$\Delta f_c = 5$ ГГц	2.25	4.51	4.53	7.56	2.06	2.07	2.67
Без фильтрации	$R^{(1)} = 1000$ м	23.73	372.87	372.69	182.34	19.31	19.30	13.50
$\alpha - \beta$	$R^{(1)} = 1000$ м	2.27	10.47	10.56	16.31	3.19	3.20	3.94
Калмана	$R^{(1)} = 1000$ м	1.35	2.31	2.24	3.79	1.41	1.39	1.77
Без фильтрации	$R^{(1)} = 2000$ м	46.89	1473.86	1473.18	748.47	38.39	38.38	27.35
$\alpha - \beta$	$R^{(1)} = 2000$ м	4.15	62.77	60.51	108.99	7.52	7.43	9.85
Калмана	$R^{(1)} = 2000$ м	3.25	9.59	9.47	17.54	3.02	3.01	4.04
Без фильтрации	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	35.42	1659.76	13.06	418.40	40.74	3.61	20.45
$\alpha - \beta$	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	3.47	71.02	1.03	61.67	8.05	0.89	7.42
Калмана	$\beta^{(1)} = 85^\circ$	2.01	10.11	0.08	8.37	3.06	0.28	2.76
Без фильтрации	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	35.44	111.92	1553.50	409.37	10.58	39.41	20.23
$\alpha - \beta$	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	3.06	4.61	55.22	52.94	2.04	7.17	6.95
Калмана	$\beta^{(1)} = 15^\circ$	2.30	0.62	8.20	8.18	0.75	2.76	2.74
Без фильтрации	$b_x = b_y = 5$ м	35.59	836.78	836.79	408.10	28.92	28.92	20.20
$\alpha - \beta$	$b_x = b_y = 5$ м	3.42	31.14	30.85	52.87	5.35	5.35	6.92
Калмана	$b_x = b_y = 5$ м	2.13	4.66	4.65	7.95	2.08	2.07	2.67
Без фильтрации	$b_x = b_y = 10$ м	35.21	826.89	827.22	414.94	28.75	28.76	20.37
$\alpha - \beta$	$b_x = b_y = 10$ м	3.47	28.38	27.68	45.83	5.10	5.06	6.39
Калмана	$b_x = b_y = 10$ м	2.45	7.09	7.11	12.51	2.59	2.59	3.41

Заключение

В статье определены выражения, позволяющие математически описать процесс оценивания вектора состояния маломаневренного объекта наблюдения в охранной однопозиционной системе с использованием линейных фильтров: $\alpha - \beta$, Винера и Калмана. Ука-

занные выражения позволяют выполнить моделирование с использованием программ математического моделирования. Получены численные оценки качества фильтрации вектора состояния с использованием указанных фильтров в случае их применения в охранной однопозиционной системе. Установлено, что качество фильтрации улучшалось с увеличением ширины спектра зондирующего сигнала и отношения сигнал/шум. При этом наиболее эффективным является оценивание с использованием фильтра Калмана.

Литература:

1. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С., Леховицкий Д.И., Лещенко С.П., Лосев Ю.И., Николаев А.И., Горшков С.А., Москвитин С.В., Орленко В.М. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Белорецкий Д.Л., Васинкин А.С., Зданович Ю.А., Королев А.Н., Котов А.Ф., Кузнецов А.М., Сошников И.А., Унгер А.Ю. Оптимизация обработки сигналов в разностно-доплеровской пассивной многофункциональной радиолокационной системе // Научный вестник МИРЭА. 2010. № 1(8). С. 4–10.
3. Азизов А.Г., Богадаров А.Ю., Заикин Б.А., Калиниченко М.Е., Котов А.Ф., Попонов П.В. Оценивание координат источников излучения в однобазовой МРЛС // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1(6). С. 73–81.
4. Заикин Б.А., Богадаров А.Ю., Котов А.Ф., Попонов П.В. Оценивание координат воздушной цели в дальномерной многопозиционной радиолокационной системе // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 2(11). С. 65–72.
5. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
6. Письменный Д.Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам. 3-е изд. М.: Айрис-пресс, 2008. 288 с.
7. Сколник М.И. [и др.] Справочник по радиолокации. Кн. 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.

References:

1. Shirman Ya.D., Bagdasaryan S.T., Malyarenko A.S., Lekhovitskiy D.I., Leschenko S.P., Losev Yu.I., Nikolaev A.I., Gorshkov S.A., Moskvitin S.V., Orlenko V.M. Radio electronic systems: Bases of making and theory. Handbook. Second edition. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russ.)
2. Beloretskiy D.L., Vasinkin A.S., Zdanovich Yu.A., Korolev A.N., Kotov A.F., Soshnikov I.A., Unger A.Yu. Optimization of signal processing in differential Doppler passive multifunctional radar system // Nauchniy vestnik MGTU MIREA (Scientific Herald of MSTU MIREA). 2010. № 1 (8). P. 4–10. (in Russ.)
3. Azizov A.G., Bogadarov A.Yu., Zaikin B.A., Kalinichenko M.E., Kotov A.F., Poponov P.V. Estimating coordinates or radiation source in single-base multi radar station // Vestnik MGTU MIREA (Herald of MSTU MIREA). 2015. № 1(6). P. 73–81. (in Russ.)
4. Zaikin B.A., Bogadarov A.Yu., Kotov A.F., Poponov P.V. Evaluation of coordinates of air target in a two-position range measurement radar // Rossiyskiy technologicheskiy zhurnal

(Russian Technological Journal). 2016. V. 4. № 2(11). P. 66–72. (in Russ.)

5. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarskiy B.G., Il'chuk A.R., Gerasimov A.A. Aviation radar complexes and systems. Guide for listeners and cadets of University of Air force. Moscow: N.E. Zhukovskiy VVIA Publ., 2006 1112 p. (in Russ.)

6. Pismenniy D.T. Conspectus of lectures on probability theory, mathematical statistics and random processes. Third edition. Moscow: Iris-press Publ., 2008. 288 p. (in Russ.)

7. Skolnik M.I. [et al.] Radar Handbook. Book 1. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2014. 672 p. (in Russ.)

Об авторе:

Заикин Борис Александрович, аспирант кафедры теоретической радиотехники и радиофизики Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д.78).

About+ author:

Boris A. Zaikin, Postgraduate Student, Chair of Theoretical Radio Engineering and Radio Physics, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).