

DOI: 10.17516/1999-494X-0397

УДК 621.396.96

Synthesis of Optimal Algorithm of Recognition Numerical Model of Group Air Target from Class «Turbojet Aircrafts» Based on Kalman Filtering and Neural Network

Aleksandr V. Bogdanov,
Sergei G. Petrov, Aleksandr A. Kuchin*,
Aleksandr A. Lobanov and Vitalii V. Shepranov
*Military Academy of Aero-Space Defence
named after the Marshal of Soviet Union G. K. Zhukov
Tver, Russian Federation*

Received 16.03.2022, received in revised form 18.04.2022, accepted 25.04.2022

Abstract. In this paper discusses an optimal algorithm for recognition the numerical type of group air target based on kalman filtering and neural network, ensuring a constant probability recognizing the numerical type of group air target not less then a given by optimizing the solver rule, allowing to adapt process to different aircraft flight pattern of group air target.

Keywords: group airtarget, kalman filtering, neural network, constant probability, turbojet aircrafts, recognition.

Citation: Bogdanov, A.V., Petrov, S.G., Kuchin, A.A., Lobanov, A.A., Shepranov V. V. Synthesis of optimal algorithm of recognition numerical model of group air target from class «turbojet aircrafts» based on kalman filtering and neural network. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 381–396. DOI: 10.17516/1999-494X-0397

Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети

**А. В. Богданов, С. Г. Петров,
А. А. Кучин, А. А. Лобанов, В. В. Шепранов**
*Военная академия воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова.
Российская Федерация, Тверь*

Аннотация. В данной статье синтезирован оптимальный алгоритм распознавания типового состава групповой воздушной цели на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, обеспечивающий постоянство вероятности распознавания типового состава групповой воздушной цели не ниже заданной при различном характере ее полета.

Ключевые слова: групповая воздушная цель, калмановская фильтрация, нейронная сеть, постоянство вероятности, самолеты с турбореактивным двигателем, распознавание.

Цитирование: Богданов, А. В. Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети / А. В. Богданов, С. Г. Петров, А. А. Кучин, А. А. Лобанов, В. В. Шепранов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 381–396. DOI: 10.17516/1999-494X-0397

Введение

В [1] предложена концепция всестороннего распознавания воздушных целей (ВЦ) в радиолокационном (РЛ) комплексе воздушного базирования, где центральное место занимает перечень решений летчика и вопросы наведения ракет на ВЦ, основанные на их распознавании. Так, согласно данной концепции, распознавание типового состава групповой воздушной цели (ГВЦ) позволит поддержать следующие *решения летчика* в воздушном бою:

- оценить тактическое назначение группы самолетов противника, степень ее угрозы и возможности по противодействию;
- выбрать эффективный тактический прием исходя из особенностей работы бортовых радиолокационных станций (БРЛС) самолетов противника и оружия на их борту;
- определить приоритетность воздействия по наиболее опасным целям в зависимости от ситуации и важности целей;
- определить очередность обстрела целей;
- определить потребный наряд ракет для поражения каждого типа цели в группе;
- контролировать типовой состав самолетов группы противника при пуске по ним ракет, а также осуществить *оптимизацию наведения управляемых ракет* [2–4]:
 - осуществить предстартовое целеуказание (ЦУ) радиолокационной головке самонаведения (РГС) ракеты о типе атакуемой ею целью из состава группы (для оптимизации наведения ракеты на заданный тип цели из состава группы);

– осуществить радиокоррекцию в РГС ракеты при ее перенацеливании на другой тип цели из состава группы.

В [5–9] приведены результаты летно-экспериментальных исследований по оценке возможностей распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с турбореактивными двигателями (ТРД)» в импульсно-доплеровской БРЛС истребителя. Так, экспериментальным путем установлено, что типовой состав ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» принципиально можно распознать на основе анализа взаимного частотного разноса траекторий доплеровских частот РЛ-сигналов, отраженных от планеров самолетов группы и вращающихся лопаток рабочих колес первых ступеней компрессоров низкого давления (КНД) их силовых установок, по которым определяются типы двигателей самолетов группы, а по ним непосредственно и тип каждого самолета в группе.

Полученные при анализе результатов летно-экспериментальных исследований численные значения траекторных статистических характеристик реальных траекторий доплеровских частот были использованы в качестве экспериментальных исходных данных при синтезе и разработке методов и алгоритмов распознавания типового состава ГВЦ, приведенных в работах [10–16].

Их сущность заключается в том, что в амплитудно-частотном спектре РЛ-сигнала, отраженного от ГВЦ, выделяются отсчеты доплеровских частот, обусловленные отражениями сигнала от планеров самолетов группы и вращающихся лопаток первых ступеней рабочих колес КНД их силовых установок. На основе калмановской фильтрации находятся оценки данных отсчетов доплеровских частот, а затем величины их разносов. Принятие решения о типе самолета с ТРД в их группе осуществляется путем попадания разности оценок планерной и компрессорной доплеровских частот в один из априорно сформированных диапазонов возможных значений оценок разностей траекторий доплеровских частот. При этом границы каждого поддиапазона определяются выражениями:

$$F_{Нq} = F_{Pq} b_1 N_{л}; \quad (1)$$

$$F_{Bq} = F_{Pq} b_2 N_{л}, \quad (2)$$

где F_{Pq} – максимальная частота вращения ротора КНД силовой установки q -го типа самолета с ТРД;

b_1 и b_2 – соответственно минимальное и максимальное значения величины относительных оборотов вращения ротора силовой установки, одинаковые для всех типов самолетов группы;

$N_{л}$ – количество лопаток рабочего колеса первой ступени КНД.

Диапазон, в который величина разноса доплеровских частот за определенное время попадает с максимальной вероятностью, и будет соответствовать оценке типа самолета с ТРД, находящимся в составе их группы.

Недостатком такого подхода распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» является непостоянство вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в их группе. Это обусловлено тем, что решающее правило при распознавании типового состава ГВЦ, во-первых, является неоптимальным, во-вторых, не адаптируется к условиям полета ГВЦ, поскольку оно основано на априорно фиксированных границах сформированных поддиапазонов, определяемых выражениями (1) и (2), в-третьих, необходимо выполнение условия, когда

минимальное и максимальное значения величины относительных оборотов вращения ротора силовой установки (b_1 и b_2 , соответственно, в формулах (1) и (2)) должны быть одинаковыми для всех типов самолетов группы.

В действительности же данные априорно сформированные границы каждого поддиапазона в процессе полета ГВЦ могут меняться в зависимости от характера полета самолетов группы, например, с изменением высоты полета или при различных интервалах и дистанциях между самолетами группы при выдерживании заданных параметров боевого порядка в различных его формах («пеленг», «фронт», «клин» и т.д.), когда величины относительных оборотов b_1 и b_2 вращения ротора силовой установки не будут соответствовать априорно заданным и неравным для всех типов самолетов группы. Поэтому границы поддиапазонов не будут соответствовать априорным их значениям, что в результате приведет к неверному распознаванию типового состава ГВЦ в целом.

В последнее время все чаще и чаще находят применение нейронные сети в различных областях знаний, в том числе и в теории распознавания образов. В этой связи известно [17–19], что нейронная сеть по своим характеристикам эквивалентна оптимальному разомкнутому калмановскому фильтру. Поэтому если предварительно осуществить обучение нейронной сети (решающего правила) изменяющимися во времени разностями доплеровских частот, характерных для каждого типа самолета с ТРД в группе при различном характере его полета, то можно адаптировать оптимальное решающее правило к условиям полета ГВЦ, то есть обеспечить постоянство вероятности распознавания каждого типа самолета с ТРД в группе.

Цель статьи – синтезировать оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, получить его характеристики с учетом экспериментальных исходных данных по траекторным статистическим характеристикам реальных РЛ-сигналов.

Структура оптимального алгоритма

Оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети состоит из четырех процедур:

процедура получения оценок разностей доплеровских частот на основе калмановской фильтрации;

процедура формирования разностей отсчетов доплеровских частот для обучения нейронной сети;

процедура обучения нейронной сети по разностям доплеровских частот;

процедура функционирования нейронной сети при принятии решения о типовом составе ГВЦ.

На рис. 1 представлена структура оптимального алгоритма распознавания типового состава ГВЦ в БРЛС перспективного истребителя, где обозначено:

$i = 1, \dots, I$; I – общее количество самолетов в группе;

$j = 1, \dots, J$; J – общее количество вариантов полета каждой i -й ВЦ из состава группы;

$q = 1, \dots, Q$; Q – общее количество типов самолетов в группе;

$\Delta F_{ijq}(k+1)$ – разность на k шаге между значениями доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ-сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

$\Delta \hat{F}_{ijq}(k+1)$ – оценка разности на k шаге между оцененными значениями доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

ΔF_{ijq} – разности доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ-сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

P_{ijq} – вероятности предварительного распознавания q типа каждого самолета группы с каждого ij -го выхода нейронной сети;

$P_{зад}$ – заданная вероятность распознавания типа каждого самолета группы.

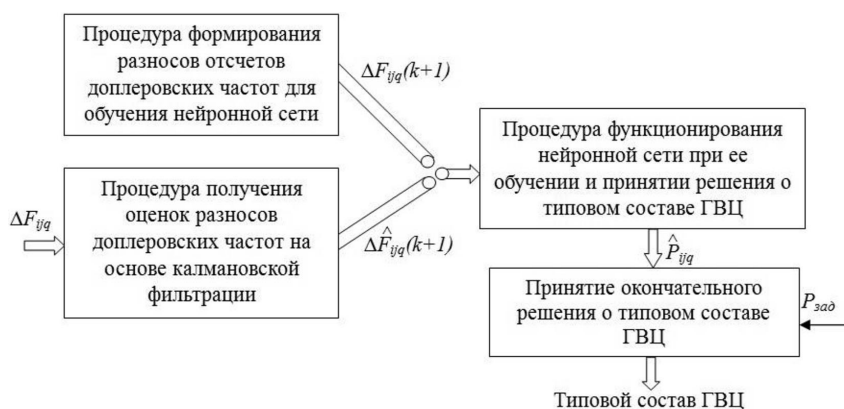


Рис. 1. Структура оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели

Fig. 1. The structure of the optimal algorithm for recognizing the typical composition of a group air target

Синтез процедуры получения оценок разностей доплеровских частот (скоростей) на основе калмановской фильтрации

Физический смысл данной процедуры заключается в получении оценок разностей отсчетов доплеровских частот (скоростей) между центроидом доплеровской частоты, обусловленным отражениями РЛ-сигнала от планеров всех самолетов группы и отражениями РЛ-сигнала от вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД двигателя каждого самолета (с ТРД) группы.

Для синтеза процедуры получения таких оценок разностей отсчетов доплеровских частот (скоростей) используем оптимальную, линейную, дискретную, многомерную, калмановскую фильтрацию, представляемую следующими дискретными уравнениями [6–9]:

$$P^-(k+1) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k); \quad (3)$$

$$\Psi(k+1) = H(k)P^-(k+1)H^T(k) + R(k); \quad (4)$$

$$K(k+1) = P^-(k+1)H^T(k)\Psi^{-1}(k+1); \quad (5)$$

$$Y(k+1) = H(k) \cdot X(k) + \Upsilon(k); \quad (6)$$

$$Z(k+1) = Y(k+1) - H(k)\Phi(k+1)X(k); \quad (7)$$

$$\hat{X}(k+1) = \Phi(k)\hat{X}(k) + K(k+1)Z(k+1); \quad (8)$$

$$P(k+1) = [I - K(k+1)H(k)]P^-(k+1), \quad (9)$$

где $P^-(k+1)$ и $P(k+1)$ – ковариационные матрицы ошибок экстраполяции и фильтрации соответственно, размерности $n \times n$ (n – размерность вектора $X(k+1)$ состояния);

$\Phi(k)$ – переходная матрица состояния размерности $n \times n$;

$Q(k)$ и $R(k)$ – ковариационные матрицы шумов возбуждения и наблюдения размерности $n \times n$ и $m \times m$ (m – размерность вектора $Y(k+1)$ наблюдения) соответственно;

$Y(k)$ – вектор-столбец шумов наблюдения, представляющие собой гауссовские «белые» последовательности с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами спектральных плотностей $N_Y(k)$ размерности m ;

$H(k)$ – матрица наблюдения (измерения) размерности $m \times n$;

$Z(k+1)$ – матрица невязок измерения размерности m ;

$K(k+1)$ – матрица весовых коэффициентов размерности $n \times m$;

I – единичная матрица размерности $n \times n$;

«т» – символ транспонирования;

«-1» – символ нахождения обратной матрицы;

«^» – символ нахождения оценки.

Определим далее размерности матрицы значения их элементов, входящих в процедуру калмановской фильтрации (3) – (9).

Основу синтеза процедуры получения оценок разносов отсчетов доплеровских частот (скоростей) при использовании калмановской фильтрации составляет их динамическая модель, которая представляется в виде системы дифференциальных уравнений (д.у.). С этой целью составим следующую систему д.у. для i -го самолета из состава группы с j -м характером полета и имеющим q -й тип:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta V}_{ijq}(t) &= a_{ijq}(t), \Delta V_{ijq}(0) = \Delta V_{0ijq}; \\ \dot{a}_{ijq}(t) &= -\alpha_{ijq} a_{ijq}(t) - \beta_{ijq} \Delta V_{ijq}(t) + \sqrt{2\alpha_{ijq} \sigma_{ijq}^2} n_{ijq}(t), a_{ijq}(0) = a_{0ijq}; \\ \dot{V}_{ijq}(t) &= 0, V_{ijq}(0) = V_{0ijq}, \end{aligned} \quad (10)$$

где V_{ijq} и ΔV_{ijq} – детерминированная и флюктуационная составляющие разноса скоростей (доплеровских частот) между центроидом планерных составляющих скоростей всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени компрессора низкого давления (КНД) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип;

a_{ijq} – флюктуационная составляющая разносов ускорений (производных доплеровских частот) между центроидом планерных составляющих скоростей всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени КНД i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип;

α_{ijq} – величина, обратно пропорциональная времени корреляции τ_{ijq} разноса скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемая как

$$\alpha_{ijq} = \frac{1}{\tau_{ijq}}; \quad (11)$$

β_{ijq} – квадрат собственной частоты f_{ijq} автокорреляционной функции разноса скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемая как

$$\beta_{ijq} = (2\pi f_{ijq})^2; \quad (12)$$

σ_{ijq} – среднеквадратическое отклонение (СКО) разносов скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемое как

$$\sigma_{ijq}^2 = \sigma_{vijq}^2 \left[\alpha_{ijq}^2 + (2\pi f_{ijq})^2 \right]; \quad (13)$$

n_{ijq} – формирующий белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием (МОЖ) и единичными интенсивностями разносов скоростей (доплеровских частот).

Систему д.у. (10) в векторно-матричном виде можно представить следующим образом:

$$\dot{X}_{ijq} = A_{ijq} X_{ijq} + G_{ijq} N_{ijq}, \quad X(0) = X_{0ijq}, \quad (14)$$

где X_{ijq} и X_{0ijq} – соответственно истинный вектор состояния и его начальное условие размерности 3×1 , имеющие вид

$$X_{ijq} = \left[\Delta V_{ijq}, a_{ijq}, V_{ijq} \right]^T;$$

$$X_{0ijq} = \left[\Delta V_{0ijq}, a_{0ijq}, V_{0ijq} \right]^T;$$

где A_{ijq} – известная матрица размерности 3×3 , имеющая следующие, отличные от нуля, элементы (для сокращения записей индексы i, j и q для обозначения элементов соответствующих матриц будут опущены) $a_{12} = 1$; $a_{21} = -\beta_{ijq}$; $a_{22} = -\alpha_{ijq}$;

G_{ijq} – матрица размерности 3×3 , имеющая ненулевой элемент $g_{22} = \sqrt{2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2}$;

$N_{ijq} = [0, n_{ijq}, 0]^T$ – транспонированный вектор формирующих белых гауссовских шумов с нулевым МОЖ и единичной интенсивности, имеющий размерность 3×1 .

Элементы матрицы наблюдения в уравнении (6) будут определяться, с одной стороны, составом измерителей функционально связанных координат, а с другой – условием наблюдаемости фильтра, которое необходимо обеспечить для предотвращения его расходимости. Исходя из этого ненулевыми элементами матрицы наблюдения $H_{ijq}(k)$ в уравнении наблюдения (6), имеющей размерность 1×3 , будут являться $h_{11} = h_{13} = 1$.

Элемент вектора шума наблюдения $\Upsilon_{ijq}(k)$, имеющего размерность 1×1 , является некоррелированным с элементом вектора шумов возбуждения N_{ijq} .

Для определения элементов матриц $\Phi_{ijq}(k)$ и $Q_{ijq}(k)$ осуществляется переход от векторно-матричного дифференциального уравнения (14) в непрерывном времени к уравнениям в дискретном времени в соответствии со следующими соотношениями [10]:

$$\Phi_{ijq}(k) = \exp(A_{ijq} T), \quad (15)$$

$$Q_{ijq}(k) = M[J_{ijq}(k)J_{ijq}^T(k)], \quad (16)$$

$$J_{ijq}(k) = \int_{kT_n}^{(k+1)T_n} \Phi_{ijq} [(k+1)T - \tau] G_{ijq}(\tau) N_{ijq}(\tau) d\tau, \quad (17)$$

где T – период дискретизации.

На практике, как правило, ограничиваются линейными членами при определении матриц $\Phi_{ijq}(k)$ и $Q_{ijq}(k)$ [10], т.е.

$$\Phi_{ijq}(k) \approx I + A_{ijq}T. \quad (18)$$

В результате матрица $\Phi_{ijq}(k)$, имеющая размерность 3×3 , будет иметь следующие отличные от нуля элементы: $\varphi_{11} = \varphi_{33} = 1$; $\varphi_{12} = T$; $\varphi_{21} = -\varphi_{ijq}T$; $\varphi_{22} = 1 - \varphi_{ijq}T$.

После ряда преобразований, определяемых формулами (15), (16) и (17), и ограничений линейными членами ненулевым элементом ковариационной матрицы $Q_{ijq}(k)$ шумов возбуждения размерности 3×3 будет являться $q_{22} = 2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2T$.

Элемент вектора $Y(k+1)$ наблюдения имеет вид

$$y_{11}(k+1) = [V_{ijq}(k+1) + \Delta V_{ijq}(k+1)] + \gamma_{ijq}(k+1); \quad (19)$$

элемент вектора $Z(k+1)$ невязок измерения имеет вид

$$z_{11}(k+1) = y_{11}(k+1) - \left[\hat{V}_{ijq}(k) + \Delta \hat{V}_{ijq}(k) + \hat{a}_{ijq}(k)T \right]; \quad (20)$$

элементы вектора $\hat{X}_{ijq}(k+1)$ оценок имеют вид

$$\Delta \hat{V}_{ijq}(k+1) = \Delta \hat{V}_{ijq}(k) + \hat{a}_{ijq}(k)T + k_{11}(k+1)z_{11}(k+1); \quad (21)$$

$$\hat{a}_{ijq}(k+1) = (1 - \alpha_{ijq}T)\hat{a}_{ijq}(k) - \beta_{ijq}T\Delta \hat{V}_{ijq}(k) + k_{21}(k+1)z_{11}(k+1); \quad (22)$$

$$\Delta \hat{V}_{ijq}(k+1) = \hat{V}_{ijq}(k) + k_{31}(k+1)z_{11}(k+1). \quad (23)$$

На рис. 2 представлена структура калмановского оптимального линейного фильтра.

Процедура получения разносов доплеровских частот для обучения нейронной сети

С целью обучения нейронной сети сформируем обучающие выборки разносов доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$ для различных типов самолетов с ТРД с различным характером их полета, исходя из выражения

$$\Delta F_{ijq}(k+1) = \Phi(k)X(k). \quad (24)$$

Представим динамическую модель (систему д.у.) (10) в виде разносов не скоростей, а доплеровских частот как

$$\begin{aligned} \dot{F}_{ijq}(t) &= 0, F_{ijq}(0) = const; \\ \Delta \dot{F}_{ijq}(t) &= F_{ijq}^*(t), \Delta F_{ijq}(0) = F_{0ijq}; \\ \dot{F}_{ijq}^*(t) &= -\alpha_{ijq}F_{ijq}^*(t) - \beta_{ijq}\Delta F_{ijq}(t) + \sqrt{2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2}n_{ijq}(t), F_{ijq}^*(0) = F_{0ijq}^*, \end{aligned} \quad (25)$$

где (по аналогии с (10)):

F_{ijq} и ΔF_{ijq} – соответственно детерминированные и флюктуационные составляющие разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

$F_{ijq}^*(t)$ – производные разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

α_{ijq} – величины, обратно пропорциональные временам корреляции разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

β_{ijq} – квадраты собственных частот автокорреляционных функций разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

σ_{ijq} – среднеквадратические отклонения производных разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

n_{ijq} – взаимонезависимые формирующие «белые» гауссовские шумы с нулевыми МОЖ и единичными интенсивностями для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип, вектор состояния в соответствии с динамической моделью (25) определяется как

$$X(t) = [F_{ijq}(t), \Delta F_{ijq}(t), F_{ijq}^*(t)]^T. \quad (26)$$

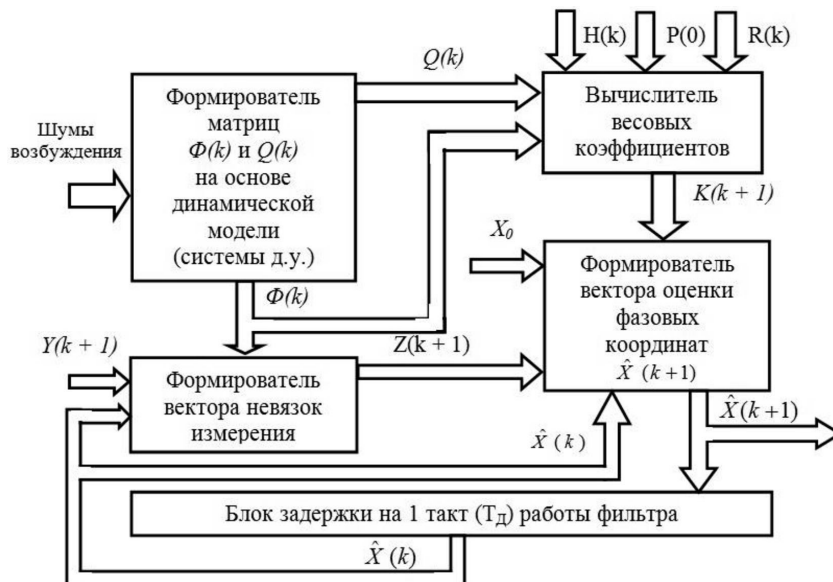


Рис. 2. Структурная схема калмановского фильтра

Fig. 2. Block diagram of the Kalman filter

Переходная матрица состояния размерности 3×3 в соответствии с динамической моделью (25), ее отличные от нуля элементы имеют следующие значения:

$$\varphi_{11} = \varphi_{22} = 1; \varphi_{23} = T; \varphi_{31} = -\beta_{ijq}T; \varphi_{33} = 1 - \alpha_{ijq}T. \quad (27)$$

Согласно (24) и (25) формируются последовательно в дискретном времени разности доплеровских частот в виде

$$\Delta F_{ijq}(k+1) = F_{ijq}(k) + \Delta F_{ijq}(k) + (1 - \alpha_{ijq}T)F_{ijq}^*(k)T - \beta_{ijq}T^2\Delta F_{ijq}(k), \quad (28)$$

где $k = 1, \dots, K$ – текущий такт формирования разностей доплеровских частот;

K – общее количество тактов формирования разностей доплеровских частот, по которым в течение K тактов осуществляется предварительное обучение нейронной сети для различных типов целей с различным характером их полета, имеющих соответствующий разнос доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$.

Процедура функционирования нейронной сети в режимах «обучение» и «принятие решения» о типовом составе групповой воздушной цели

В задачах распознавания при обучении нейронной сети широко используются методы градиентного спуска. Для многослойных нейронных сетей, использующих обучение с учителем обучения, применяется алгоритм обратного распространения ошибки [17–19], который можно рассматривать как обобщение алгоритма адаптивной фильтрации – минимизации среднеквадратической ошибки.

Обучение нейронной сети предполагает два прохода по всем ее слоям (рис. 3).

При прямом прохождении входной вектор, в который входят разности доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$, подается на сенсорные узлы сети (нейроны), после чего распространяется по сети от слоя к слою. В результате генерируется набор выходных сигналов, который и является фактической реакцией сети на данный входной вектор. Во время прямого прохода все синаптические веса (весовые коэффициенты) сети фиксированы.

Во время обратного прохода все синаптические веса настраиваются в соответствии с правилом коррекции ошибок, а именно фактический выход сети вычитается из желаемого (целевого) отклика, в результате чего формируется сигнал ошибки. Этот сигнал впоследствии распространяется по сети в направлении, обратном направлению синаптических связей. Весовые коэффициенты настраиваются с целью максимального приближения выходного сигнала сети к желаемому в статистическом смысле.



Рис. 3. Алгоритм обучения нейронной сети

Fig. 3. Neural network learning algorithm

Функция ошибки нейронной сети для каждого k -го разнеса доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$ рассчитывается как [19]

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_z \left(y_z^{(N)} - d_z \right)^2, \quad (29)$$

где $y_z^{(N)}$ – реальное выходное состояние z -го нейрона выходного слоя N нейронной сети при подаче на ее входы k -го разнеса доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$;

d_z – идеальное (желаемое) выходное состояние z -го нейрона выходного слоя.

Суммирование ведется по всем нейронам выходного слоя и по всем обрабатываемым сетью разнесам доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$. Минимизация ведется методом градиентного спуска, что означает подстройку весовых коэффициентов следующим образом:

$$\Delta w_{tz}^{(n)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{tz}}, \quad (30)$$

где w_{tz} – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей z -й нейрон слоя $n - 1$ с t -м нейроном слоя n ; η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

В выражении (30)

$$\frac{\partial E}{\partial w_{tz}} = \frac{\partial E}{\partial s_z} \cdot \frac{\partial s_z}{\partial w_{tz}}, \quad (31)$$

где s_z – взвешенная сумма входных сигналов нейрона z , слоя n , то есть аргумент активационной функции

$$s_z = \sum_z w_{tz} y_z. \quad (32)$$

Из формулы (31) величина $\frac{\partial s_z}{\partial w_{tz}}$ – равна выходу нейрона предыдущего слоя $y_z^{(n-1)}$. Что касается первого множителя, он раскладывается следующим образом:

$$\frac{\partial E}{\partial s_z} = \sum_u \frac{\partial E}{\partial s_u} \cdot \frac{\partial s_u}{\partial s_z}. \quad (33)$$

Здесь суммирование по u выполняется среди нейронов слоя $n + 1$.

Введя новую переменную

$$\delta_t^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial s_u} \cdot \frac{ds_u}{ds_t}, \quad (34)$$

получим рекурсивную формулу для расчетов величин $\delta_t^{(n)}$ слоя n из величин $\delta_u^{(n+1)}$ старшего слоя $n + 1$:

$$\delta_t^{(n)} = \left[\sum_u \delta_u^{(n+1)} \cdot w_{tu}^{(n+1)} \right]. \quad (35)$$

Таким образом,

$$\Delta w_{tz}^{(n)} = -\eta \cdot \delta_z^{(n)} \cdot y_t^{(n-1)}. \quad (36)$$

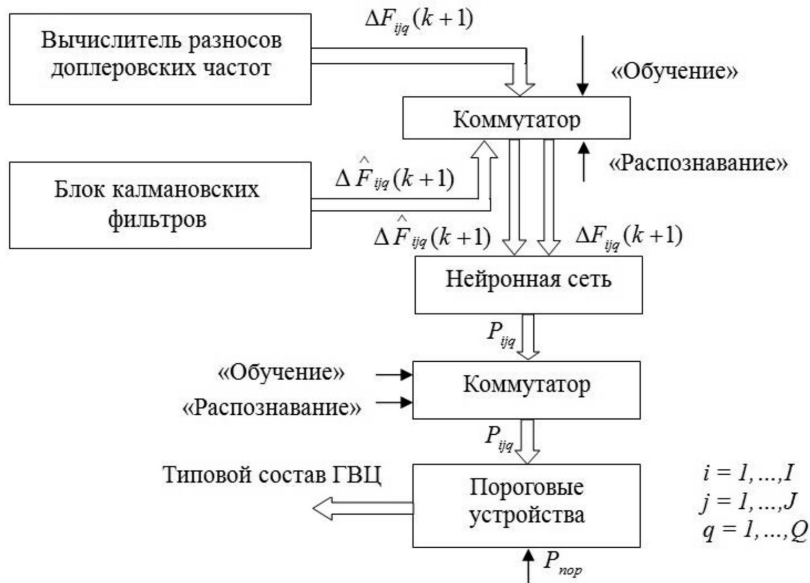


Рис. 4. Структура функционирования нейронной сети в режимах «обучение» и «принятие решения» о типовом составе групповой воздушной цели

Fig. 4. The structure of the neural network functioning in the «training» and «decision-making» modes on the typical composition of a group air target

После определения оптимальных значений всех переменных весовых коэффициентов нейронная сеть считается обученной и готовой к функционированию.

В режиме «принятие решения» на предварительно обученную нейронную сеть поступают оценки отсчетов разностей доплеровских частот $\hat{\Delta F}_{ijq}(k+1)$ (рис. 4) между центроидом планерных составляющих всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени компрессора низкого давления i -й ВЦ из состава группы (21), формируемых на выходе каждого ijq -го калмановского фильтра, функционирующего в соответствии с процедурой (3)–(9) с динамической моделью (10).

За K тактов работы калмановских фильтров соответствующие вероятности P_{ijq} предварительного распознавания типа каждого самолета группы с каждого выхода нейронной сети поступают на соответствующие входы пороговых устройств.

В каждом пороговом устройстве соответствующие значения вероятностей P_{ijq} сравниваются с пороговым значением $P_{пор}$, при выполнении условия для каждого значения $P_{ijq} \geq P_{пор}$ принимается окончательное решение о том, что в группе находится i -й самолет группы, имеющий j -й характер полета и q -й тип, в противном случае принимается решение об отсутствии данного типа самолета в группе.

Результаты моделирования оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели

В ходе моделирования нейронная сеть была обучена при условии, что общее количество самолетов с ТРД в группе равно 4 и возможно нахождение в группе 8 типов самолетов (типы

Таблица. Результаты имитационного моделирования

Table. Simulation results

№ цели	Вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в группе							
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6	Тип 7	Тип 8
1	0,94;0,97	0,1;0,12	0,08;0,1	0,11;0,13	0,09;0,11	0,13;0,15	0,15;0,16	0,12;0,14
2	0,18;0,2	0,94;0,97	0,19;0,21	0,17;0,19	0,2;0,22	0,14;0,0,18	0,21;0,24	0,15;0,18
3	0,23;0,25	0,15;0,16	0,95;0,97	0,11;0,13	0,1;0,12	0,13;0,15	0,18;0,2	0,09;0,11
4	0,19;0,21	0,09;0,11	0,18;0,2	0,94;0,97	0,12;0,14	0,14;0,0,18	0,15;0,16	0,13;0,15

1–8), радиолокационные сигналы от которых были зарегистрированы и обработаны, то есть $I=4, J=8$.

Пороговое значение вероятности принималось равным $P_{\text{пор}}=0,9$.

Величина дискрета – $T=0,1\text{с}$.

В результате моделирования за 14–15 тактов ($K=14–15$, то есть за время 1,4–1,5 с) работы калмановских фильтров были получены следующие результаты (с доверительной вероятностью 0,95), приведенные в таблице.

Из анализа полученных результатов имитационного моделирования следует, что с вероятностью 0,94–0,97 (превосходит пороговое значение $P_{\text{пор}}=0,9$) в группе находятся самолеты с ТРД типа 1, 2, 3 и 4, что соответствует действительности (именно оценки реальных разносов отсчетов доплеровских частот для этих типов самолетов подавались на ijq -е входы нейронной сети).

Во всех случаях вероятности ложного распознавания типов 1, 2, 3 и 4 составили порядка 0,022–0,03.

Выводы

1. Синтезирован оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, который включает процедуры: получения оценок разносов доплеровских частот на основе калмановской фильтрации; формирования разносов отсчетов доплеровских частот для обучения нейронной сети; обучения нейронной сети по разносам доплеровских частот; функционирования нейронной сети при принятии решения о типовом составе ГВЦ.

2. Путем моделирования и с учетом экспериментальных исходных данных получены характеристики синтезированного оптимального алгоритма, при этом обеспечивается постоянство вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в их группе независимо от характера его полета.

Список литературы / References

- [1] Богданов, А.В., Коротков С.С., Кучин А.А., Бондарев В.Н., Лютиков И.В. Концепция распознавания воздушных целей в авиационном радиолокационном комплексе. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2016, 9(3). [Bogdanov A. V., Korotkov S. S., Kuchin A. A., Bondarev V. N., Lutikov I. V. The concept of recognition of air targets

in the aviation radar complex, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2016, 9(3) (in Russian)]

[2] Анциферов А. А., Богданов А. В., Бондарев В. Н., Гарин Е. Н., Гончаров А. М., Кучин А. А., Лютиков И. В. Синтез оптимальных алгоритмов наведения летательных аппаратов на групповую воздушную цель, *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 169–182 [Antsiferov A. A., Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Garin E. N., Goncharov A. M., Kuchin A. A., Lytikov I. V. Synthesis of optimal algorithms for guiding aircraft to a group air target. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2017, 10(2), 169–182 (in Russian)].

[3] Замараев В. В., Кутузов А. С., Лютиков И. В., Мальцев Д. В. Метод построения траектории скрытного выхода летательного аппарата в заданную точку зоны обнаружения обзорного радиолокатора, основанный на анализе спектра доплеровских частот принимаемого сигнала. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, 14(3), 281–291 [Zamaraev V. V., Kutuzov A. S., Lyutikov I. V., Malcev D. V. Method of Constructing a Line Secretive Exit the Aircraft at a Given Point of the Detection Area Surveillance Radar Based on the Spectrum Analysis of the Doppler Frequency of the Received Signal, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2021, 14(3), 281–291 (in Russian)].

[4] Богданов А. В., Горбунов С. А., Кучин А. А., Хадур А. А. Алгоритм наведения управляемой ракеты класса «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения на вертолет при различном характере его полета. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 829–842 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Hadur A. A. The Guidance Algorithm of Air-to-Air Guided Missile with an Active Radar Target-Seeking Head to a Helicopter with Various Modes of its Flight, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2020, 13(7), 829–842 (in Russian)].

[5] Богданов А. В. и др. Результаты летно-экспериментальных исследований по оценке возможностей всестороннего распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровской РЛС воздушного базирования в сантиметровом диапазоне. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2016, 11. [Bogdanov A. V. and etc. The result of experimental studies on assessment of comprehensive air target recognition in centimeter band by airborne pulse Doppler radar, *Advances in modern electronics*, 2016, 11 (in Russian)]

[6] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А. Направления, принципы и признаки распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровской РЛС на основе экспериментальных исследований информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных воздушных целей. *Научно-методический сборник ЦНИИ ВКС*. Тверь: ЦНИИ ВКС, 2019, 3 (558). [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. Directions, principle and signs of recognition air targets in airborne pulse doppler radar based on analyse spectral doppler portrait created by radar signals reflecting from real air targets, *Central Research Institute of the Aerospace Defence*, 2019, 3 (in Russian)].

[7] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А. Результаты экспериментальных исследований разностей доплеровских частот, обусловленных отражениями радиолокационного сигнала от планера самолета и лопаток первой ступени компрессора низкого давления, в интересах распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем. *Научно-методический сборник*

ЦНИИ ВКС. Тверь: ЦНИИ ВКС, 2019, 3 (558). [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. The results of experimental research based on analyse spectral doppler portrait created by radar signals reflecting from real air targets with turbojet engine, *Central Research Institute of the Aerospace Defence*, 2019, 3 (in Russian)]

[8] Богданов А. В. и др. *Экспериментальный метод исследования информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных летательных аппаратов*, монография. Тверь: ВА ВКО, 2021. [Bogdanov A. V. and etc. *Experimental method to research information properties radiolocation signals, reflecting from real air targets*, Transaction of the Military Aerospace Defence Academy, 2021 (in Russian)]

[9] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А., Савельева И. А. Анализ существующих методов распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. *Научно-методический сборник научных статей докторантов, адъюнктов и соискателей ученых степеней*. Т. . Кн. 1. Тверь: ВА ВКО, 2020. [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A., Saveleva I. A. Analysis existing methods recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar. *Journal of PhD*. Т. 2, Book 1. Transaction of the Military Aerospace Defence Academy, 2020 (in Russian)]

[10] Богданов А. В., Бондарев В. Н., Васильев О. В., Гарин Е. Н., Закомолдин Д. В., Коротков С. С., Лютиков И. В., Ляпоров В. Н. Синтез оптимальных алгоритмов распознавания групповых воздушных целей в радиолокационных системах воздушного базирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 169–182. [Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Garin E. N., D. V. Zakomoldin, S. S. Korotkov, I. V. Lyutikov, V. N. Lyaporov. Synthesis of optimum algorithms of aircraft recognition at the group aerial target in air-based pulse-Doppler radar, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2017, 10(2), 169–182 (in Russian)]

[11] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции при воздействии уводящей по скорости помехи. *Научно-методический сборник ЦНИИ ВКС*. Тверь, ЦНИИ ВКС, 2019, 3 [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar under the influence of speed-stealing interference*, Central research Institute of aerospace Defence, 2019, 3(558) (in Russian)]

[12] Пат. 2324952 Российская Федерация, МПК G01S 13/52 (2006.01). Способ сопровождения групповой воздушной цели. Богданов А. В., Белый Ю. И., Васильев О. В., Голубенко В. А., Киселев В. В., Маняшин С. М., Пекарш А. И., Сеницын А. В., Филонов А. А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ОКБ Траверз» (Ru).– № 2006129699/09; заявл. 16.08.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14. [Patent 2324952 Russian Federation МПК G 01 S 13/52 (2006.01). *Method of escort group aerial target* / A. V. Bogdanov, U. I. Belii, O. V. Vasiliev, V. A. Golubenko, V. V. Kiselev, S. M. Manyashin, A. I. Pekarsh, A. V. Sinicin, A. A. Filonov.– № 2006129699/09 (in Russian)]

[13] Пат. 2419815 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ сопровождения воздушной цели из класса «самолет с турбореактивным двигателем». А. В. Богданов, О. В. Васильев, И. Н. Исаков, А. Г. Ситников, А. А. Филонова.– № 2009140853, заявл. 03.11.2009, опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15. [Patent 2419815 Russian Federation МПК G 01 S 13/52. *Method of escort*

air target by turbojet aircraft class. A.V. Bogdanov, O.V. Vasiliev, I.N. Isakov, A.G. Sitnikov, A.A. Filonov – № 2419815 (in Russian)]

[14] Пат. 2456633 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/52 (2006.01). Способ сопровождения групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями». Ситников А.Г., Богданов А.В., Васильев О.В., Ибрагим А.К., Филонов А.А., Круталевич Ю.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-технологический центр «Наука» (ФГНУ «ГНТИЦ «Наука») (RU). № 2011117802/07; заявл. 03.05.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. [Patent 2456633 Russian Federation МПК G 01 S 13/52 (2006.01). *Method of escort group aerial target by turbojet aircraft class*. A.G. Sitnikov, A.V. Bogdanov, O.V. Vasiliev, A.K. Ibragim, A.A. Filonov, U.A. Krutalevich. № 2011117802/07 (in Russian)]

[15] Пат. 2705070 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. А.В. Богданов, В.А. Голубенко, А.Г. Коваленко, А.А. Корнилов, А.А. Кучин, А.А. Лобанов, А.А. Филонов – № 2019111580, заявл.16.04.2019, опубл. 05.11.2019, Бюл. № 31. [Patent 2705070 Russian Federation МПК G 01 S 13/52. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar*. A.V. Bogdanov, V.A. Golubenko, A.G. Kovalenko, A.A. Kornilov, A.A. Kuchin, A.A. Lobanov, A.A. Filonov. 2019111580 (in Russian)]

[16] Пат. 2731878 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. А.А. Анциферов, А.В. Богданов, В.А. Голубенко, Ф. Ибрагим, С.Л. Макашин, П.В. Поповка, А.А. Филонов.– № 2020107653, заявл. 18.02.2020, опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. [Patent 2731878 Russian Federation МПК G 01 S 13/52. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar*. A.A. Antsiferov, A.V. Bogdanov, V.A. Golubenko, F. Ibragim, S.L. Makashin, P.V. Popovka, A.A. Filonov. № 2020107653 (in Russian)]

[17] Ефименко В.С., Харисов В.Н., Стребков Е.Г. Применение нейронных сетей в задачах оптимальной фильтрации. *Радиотехника*, 2000, 7. [Efimenko V.S., Harisov V.N., Strebkov E.G. Neural networks in optimal filtration. *Telecommunication and radio engineering*, 2000, 7 (in Russian)]

[18] Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: издательство Казанского университета, 2018. 121 с. [Gafarov F.M. *Artificial neural networks and applications*, Kazan, Kazan university, 2018. 121 p. (in Russian)]

[19] Уоссермен Ф. *Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика*. Москва: Мир, 1992. 240 с. [Yossermen F. *Neural-computer technique: Theory an practice*. Moscow, Mir, 1992. 240 p. (in Russian)]