

УДК 621.396.96

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЗА СЧЕТ АДАПТАЦИИ К ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

С.Н. ЯРМОЛИК, М.В. СВИНАРСКИЙ, А.С. ХРАМЕНКОВ, Е.В. ЗАЙКО

Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 июня 2018

Аннотация. Важным аспектом создания эффективных систем распознавания является адаптация радиолокационных портретов к углам пространственной ориентации наблюдаемого объекта. Для оценки эффективности системы распознавания разработан моделирующий комплекс. Методом математического моделирования показано, что использование адаптивных дальномерных радиолокационных портретов объекта наблюдения на основе максимально правдоподобных оценок его пространственной ориентации, повышает эффективность распознавания. Отмечено, что в условиях ограничения времени на принятие решения о классе объекта методы адаптации необходимо совершенствовать.

Ключевые слова: метод максимального правдоподобия, решение задачи радиолокационного распознавания.

Abstract. An important aspect of creation of effective recognition systems is the adaptation of radiolocation portraits to the corners of the spatial orientation of the observed object. The modeling complex for estimation of efficiency of the recognition system has been developed. Using mathematical modeling, it is shown that the utilization of adaptive range-finding radiolocation portraits of the object of observation on the basis of the most plausible estimates of its angles of spatial orientation increases of the efficiency of recognition. It is noted that in the conditions of limit of time for making decision about the class of an object, the methods of adaptation must be improved.

Keywords: maximum likelihood method, decision of task of radiolocation recognition.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 122, No. 4, pp. 40-47
Increase the effectiveness of radar detection systems
by adapting to the spatial orientation of the object of observation
S.N. Yarmolik, M.V. Svinarskiy, A.S. Khramenkov, E.V. Zaiko

Введение

Анализ современных вооруженных конфликтов показывает, что в условиях массированного налета авиации противника и ограниченных возможностей средств противовоздушной обороны возникает острая необходимость выделения наиболее опасных целей для их первоочередного уничтожения. Успех противовоздушного боя зависит от оптимальности распределения целей между средствами поражения. Решение данных задач учитывает результаты распознавания целей в налете. В интересах распознавания объектов используют доступные радиолокационному наблюдению признаки: размеры, форму, параметры флуктуаций, тип двигательной установки, параметры движения. Наиболее полно различия объектов учитывают их радиолокационные портреты (РЛП) $\xi = \|\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_{N\alpha}\|^T$, характеризующие распределение мощности отраженного сигнала по рассматриваемым координатам [1]. Процесс принятия решения о классе наблюдаемого объекта предполагает сопоставление реализации наблюдаемого РЛП с имеющимися эталонными портретами.

Эффективность принимаемого решения во многом зависит от оптимальности процедуры обработки элементов выделенного РЛП и степени соответствия портрета ожидаемому эталону [1]. Обработываемые РЛП являются функцией ряда информативных параметров [1]. В качестве одного из таких параметров выступает ориентация летательного аппарата (ЛА) в пространстве $\Theta^{ЛВ}$ [2]. Ориентацию радиолокационной цели радиолокатора принято характеризовать совокупностью трех углов пространственной ориентации (УПО) в системе координат (СК) линии визирования (ЛВ): курса, тангажа и крена ($\Theta^{ЛВ} = \|\psi^{ЛВ} \quad \vartheta^{ЛВ} \quad \gamma^{ЛВ}\|^T$) [3].

Общее решение задачи радиолокационного распознавания класса объекта наблюдения, при использовании байесовского критерия оптимальности, имеет следующий вид [1]:

$$A_g^* = \max_g [\Lambda(\xi | A_g, \Theta^{ЛВ})], \quad g = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где A_g^* – решение о принадлежности наблюдаемой цели к g -му классу;

$\Lambda(\xi | A_g, \Theta^{ЛВ}) = \frac{p(\xi | A_g, \Theta^{ЛВ})}{p(\xi | A_0, \Theta^{ЛВ})}$ – отношение правдоподобия, сформированное при условии

наблюдения объекта g -го класса; $p(\xi | A_g, \Theta^{ЛВ})$ – многомерная плотность вероятности элементов РЛП, представляющего собой аддитивную смесь радиолокационного фона и сигнала, отраженного от цели g -го класса; $p(\xi | A_0, \Theta^{ЛВ})$ – многомерная плотность вероятности радиолокационного фона; M – количество распознаваемых классов объектов.

В процессе полета ЛА постоянно изменяются его УПО относительно радиолокатора ($\Theta^{ЛВ}$). Отмеченный факт обуславливает необходимость оценивания УПО ЛА и использование полученных оценок ($\hat{\Theta}^{ЛВ}$) при формировании эталонных РЛП.

Разработка любого радиолокационного устройства предполагает оценку его эффективности. Задача радиолокационного распознавания класса цели относится к числу статистических задач [1]. Эффективность функционирования устройства распознавания характеризуется совокупностью условных вероятностей принимаемых решений о классе наблюдаемого объекта [1]. Отсутствие адаптации к УПО в устройствах распознавания обуславливает их низкую эффективность [1]. Определенный интерес представляет влияние адаптации к УПО ЛА на вероятность классификации объектов.

Целью статьи является анализ влияния адаптации РЛП к пространственной ориентации ЛА на эффективность его классификации. Следует отметить, что в дальнейшем для упрощения рассуждений без потери общности в качестве характеристики пространственной ориентации ЛА будет рассматриваться только угол курса ЛА в СК ЛВ.

Основная часть

На практике при решении задач адаптации радиотехнических устройств широкое распространение получил метод максимального правдоподобия (ММП). Основной идеей ММП является замена неизвестного параметра его максимально правдоподобной оценкой.

Проведенные исследования позволили разработать методику оценивания УПО ($\hat{\Theta}^{ЛВ}$), характеризующих пространственную ориентацию объекта наблюдения в СК ЛВ [3]. В [4] предложен способ повышения точности текущих оценок УПО ЛА ($\hat{\Theta}^{ЛВ}$). В интересах проводимых исследований использовано распределение мощности сигнала, отраженного от объекта, по элементам разрешения дальности, соответствующее дальномерному радиолокационному портрету (ДРЛП). Для исследования вероятности правильного распознавания класса объекта наблюдения был разработан комплекс моделирования, структура которого представлена на рис. 1.

В состав комплекса моделирования входят: имитатор принятого сигнала; устройство оценивания (УО) координат и параметров движения ЛА; УО углов пространственной ориентации ЛА; база данных эталонных дальномерных радиолокационных портретов (ЭДРЛП);

блок расчет адаптивных ЭДРЛП; устройство радиолокационного распознавания; УО показателей качества распознавания.

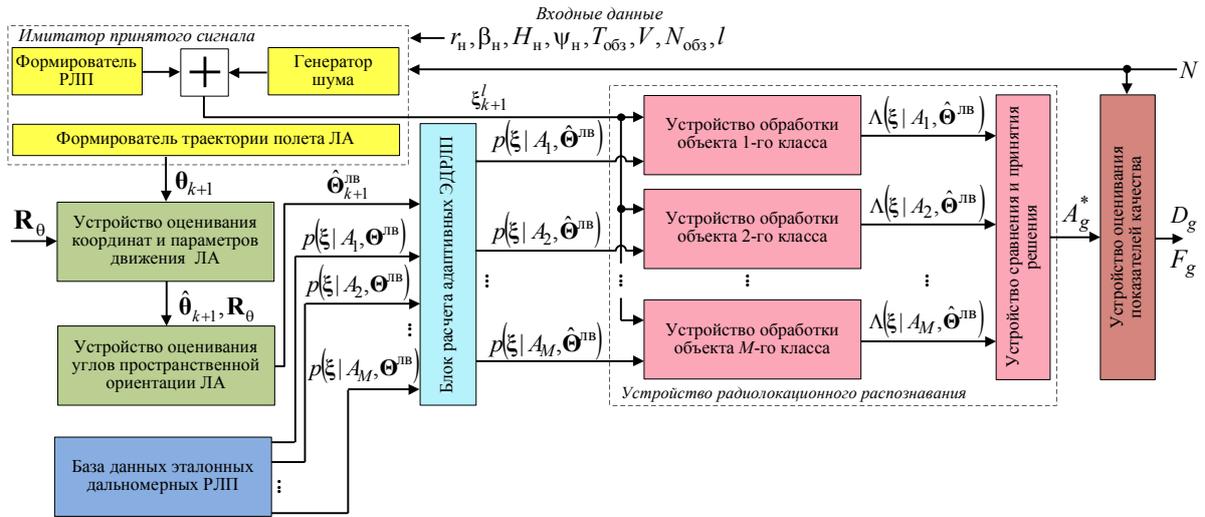


Рис. 1. Обобщенная структурная схема комплекса моделирования

Имитатор принятого сигнала включает в себя формирователь РЛП, генератор шума и формирователь траектории полета ЛА. Формирователь траектории полета ЛА предназначен для формирования сферических координат центра масс наблюдаемого объекта. Формирователь РЛП и генератор шума предназначены для формирования РЛП анализируемого класса объекта ξ_{k+1}^l . Входными данными имитатора являются: r_n [км] – начальная дальность полета ЛА; β_n [град] – начальный азимут полета ЛА; H_n [м] – начальная высота полета ЛА; ψ_n [град] – начальный курс полета ЛА; $T_{обз}$ [с] – период обзора радиолокатора; V [км/ч] – модуль вектора полной скорости полета ЛА; $N_{обз}$ – количество точек траектории полета ЛА; $l = \overline{1, M}$ – номер анализируемого класса объекта.

В ходе исследований анализируемый объект перемещается в пространстве равномерно и прямолинейно. Для каждого контакта с целью $k = \overline{1, N_{обз}}$ имитатор формирует вектор наблюдения θ_{k+1} , элементами которого являются значения радиальной дальности r , азимута β , угла места ε ЛА и соответствующий ДРЛП ξ_{k+1}^l анализируемого объекта.

УО координат и параметров движения ЛА предназначено для оценки сферических координат ЛА с учетом ошибок их оценивания. Точность формируемых оценок определяется диагональной корреляционной матрицей ошибок наблюдаемых параметров R_θ , элементами которой являются среднеквадратические отклонения гауссовских ошибок дальности (σ_r [м]), азимута (σ_β [град]) и угла места (σ_ε [град]). На выходе устройства оценивания координат и параметров движения ЛА для текущего временного интервала ((k+1) - й обзор) формируется оценка вектора наблюдаемых параметров $\hat{\theta}_{k+1}$ и соответствующая матрица ошибок их измерения R_θ . Элементами $\hat{\theta}_{k+1}$ являются разовые оценки радиальной дальности \hat{r}_{k+1} , азимута $\hat{\beta}_{k+1}$ и угла места $\hat{\varepsilon}_{k+1}$ ЛА.

УО УПО ЛА предназначено для оценивания углов ориентации ЛА $\hat{\Theta}_{k+1}^{лв} = \left\| \hat{\psi}_{k+1}^{лв} \hat{\vartheta}_{k+1}^{лв} \hat{\gamma}_{k+1}^{лв} \right\|^T$ на основе фильтрованных оценок его сферических координат. Структура и особенности функционирования УО УПО ЛА детально рассмотрена в [4]. УО УПО ЛА представляет собой дискретный фильтр, основу которого составляет фильтр Калмана второго порядка. Начальная инициализация фильтра Калмана осуществляется алгоритмом фильтрации по конечной выборке [4]. На выходе фильтра Калмана формируется оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{a}}_{k+1} = \left\| \hat{x} \hat{V}_x \hat{a}_x \hat{y} \hat{V}_y \hat{a}_y \hat{z} \hat{V}_z \hat{a}_z \right\|^T$ и матрица

ошибок фильтрации \mathbf{R}_{k+1} . По полученным значениям вектора состояния $\hat{\mathbf{a}}_{k+1}$, в соответствии с методикой, приведенной в [3], формируются текущие оценки УПО ЛА $\hat{\Theta}_{k+1}^{\text{ЛВ}}$.

Блок расчета адаптивных ЭДРЛП предназначен для формирования адаптивных ДРЛП с использованием ММП. Данный метод предполагает разделение всего диапазона анализируемых значений углов курса на сектора, размеры которых определяются точностью формирования анализируемых оценок. Следует отметить, что размеры секторов определяются на этапе исследования эталонных отличительных признаков и зависят от класса распознаваемой цели. При этом эталонные портреты распознаваемых целей рассчитываются применительно к каждому из возможных угловых секторов. При формировании оценки угла курса ЛА из базы данных выбирается эталонный портрет, соответствующий сектору текущей оценки. В качестве примера на рис. 2 представлен пример формирования адаптивного эталонного ДРЛП методом максимального правдоподобия для самолета «Tornado».

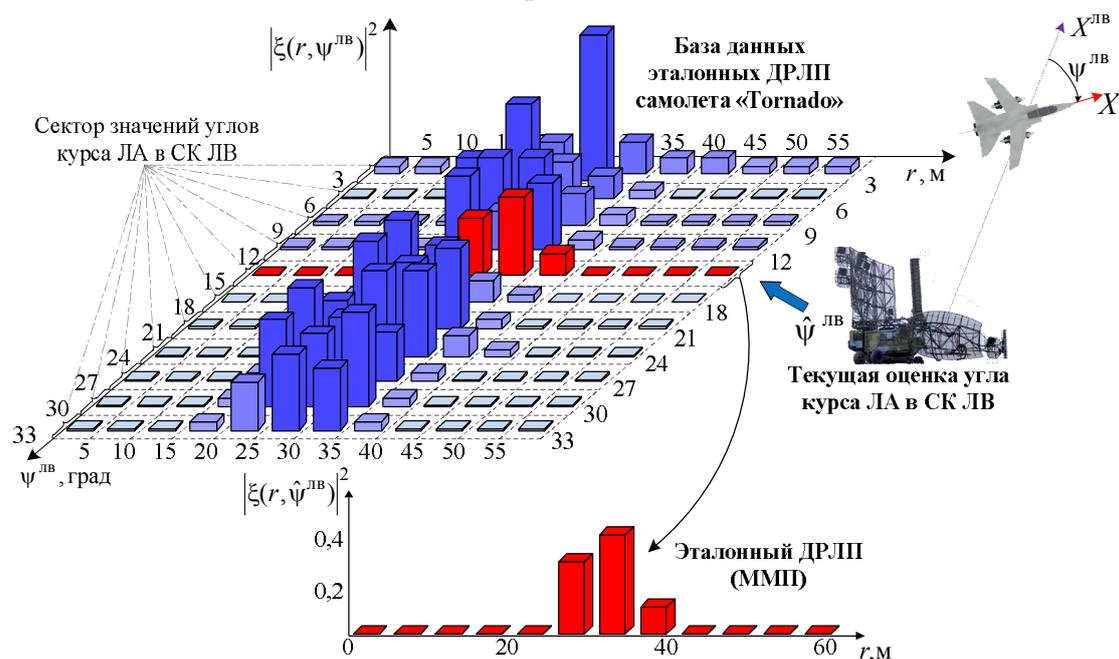


Рис. 2. Формирование адаптивного эталонного ДРЛП методом максимального правдоподобия

База данных эталонных ДРЛП предназначена для хранения эталонных ДРЛП различных классов целей. На современном этапе развития средств вычислительной техники формирование эталонных признаков распознаваемых объектов реализуют методами математического моделирования. Наиболее подходящей в данном случае является верифицированная программа моделирования «Back Scattering Simulation» (BSS), разработанная научным коллективом во главе с профессором Я.Д. Ширманом [5]. Программа BSS обеспечивает имитационное моделирование отраженных сигналов от маневрирующих аэродинамических объектов при узкополосном и сверхширокополосном зондировании. Данная программа позволяет получать РЛП для различных УПО ЛА в СК ЛВ.

Устройство радиолокационного распознавания предназначено для определения класса наблюдаемого объекта. Решения о классе объекта принимается согласно выражению (1).

УО показателей качества обеспечивает расчет эффективности распознавания для текущих условий наблюдения.

Результаты моделирования

Оценка эффективности распознавания радиолокационных объектов по их ДРЛП проводилась методом математического моделирования. При моделировании использовались следующие исходные данные: $r_n = 380$ км; $\beta_n = 30^\circ$; $H_n = 3$ км; $\psi_n = 180^\circ$; $T_{\text{обз}} = 10$ с; $V = 900$ км/ч; $N_{\text{обз}} = 150$; $\sigma_r = 75$ м; $\sigma_\beta = 0,25^\circ$ и $\sigma_\epsilon = 1^\circ$. Для расчета вероятности

правильного распознавания класса наблюдаемого объекта использовалась выборка размером $N = 10^6$. В процессе исследований анализировались ДРЛП целей трех классов: 1 класс – ракета (ALCM); 2 класс – истребитель (Tornado); 3 класс – бомбардировщик (B-52). Принцип классификации заключался в следующем:

– на вход устройства радиолокационного распознавания поступает зашумленный радиолокационный портрет ξ_{k+1}^l анализируемого класса объекта, соответствующий заданному отношению сигнал/шум ρ .

– в устройстве распознавания воспроизводятся модели распознаваемых классов целей (эталонные) для двух случаев:

1) фиксированные эталоны целей (неадаптивные эталоны);

2) эталоны, соответствующие максимально правдоподобной оценке угла курса ЛА в системе координат ЛВ (адаптивные эталоны).

В качестве фиксированных эталонов выбраны ДРЛП объектов наблюдения, соответствующие $\psi^{ЛВ} = 180^\circ$ (нос самолета). Результаты формирования эталонных ДРЛП представлены на рис. 3. Условия наблюдения: разрешающая способность по дальности $\Delta r = 1$ [м], истинное значение угла курса ЛА в СК ЛВ $\psi_{ист}^{ЛВ} = 150^\circ$, максимально правдоподобная оценка угла курса $\hat{\psi}_{мп}^{ЛВ} = 155,6^\circ$, соответствующая 6-му контакту с целью.

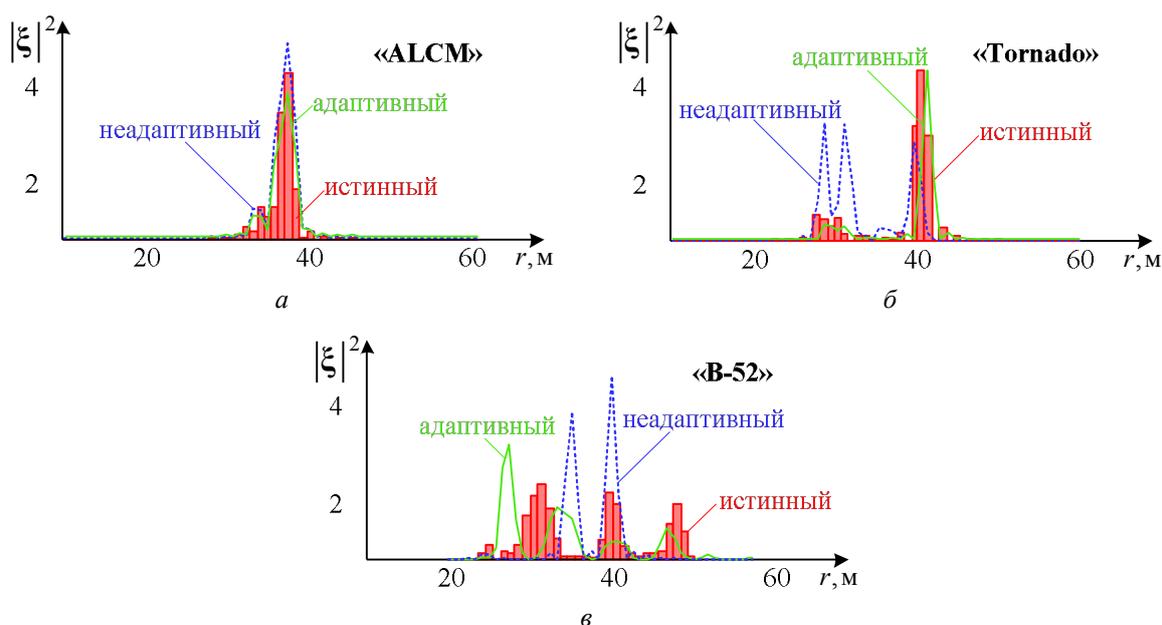


Рис. 3. Эталонные дальномерные радиолокационные портреты различных классов целей:
а – 1 класс; б – 2 класс; в – 3 класс

– реализация ДРЛП наблюдаемых целей сравнивается с имеющимися эталонными портретами в соответствии с решающим правилом (1). За истинную принималась гипотеза, соответствующая максимальному сходству ДРЛП наблюдаемого объекта и одного из используемых эталонных портретов.

Результаты математического моделирования, соответствующие 6-му контакту с целью, в виде графиков условных вероятностей правильного и ложного распознавания для рассматриваемых случаев (адаптивного $(D(F)_1^{ММП}, D(F)_2^{ММП}, D(F)_3^{ММП})$ и неадаптивного $(D(F)_1, D(F)_2, D(F)_3)$) классификации представлены на рис. 4, 5.

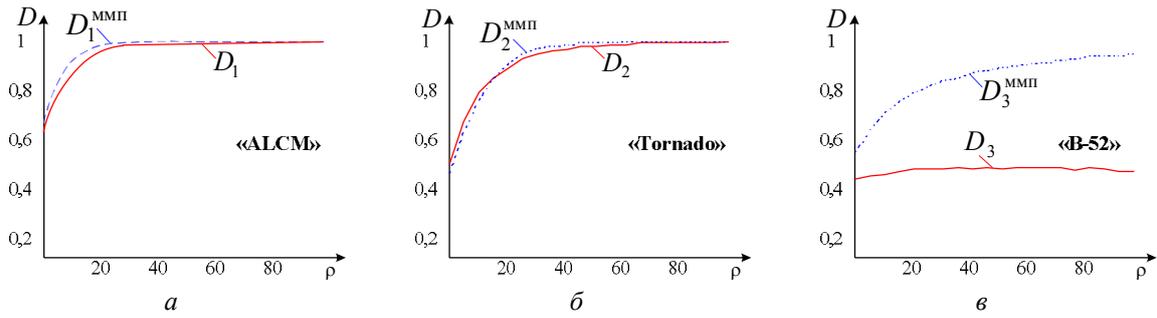


Рис. 4. Условные вероятности правильного распознавания для различных классов целей:
 a – 1 класс; $б$ – 2 класс; $в$ – 3 класс

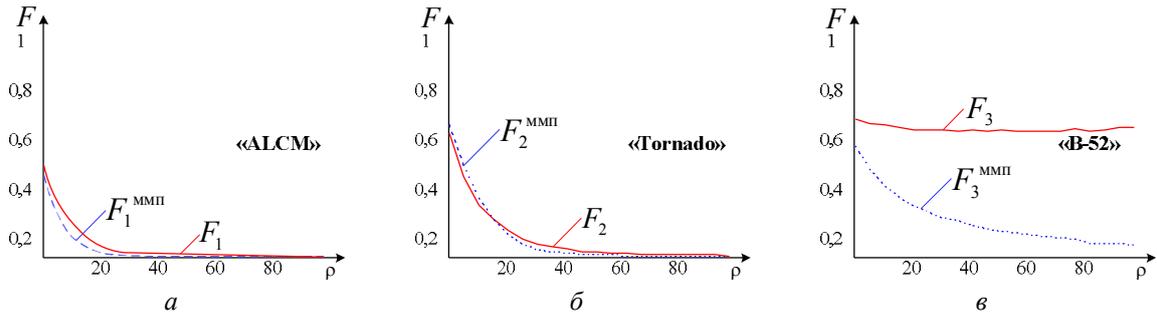


Рис. 5. Условные вероятности ложного распознавания для различных классов целей:
 a – 1 класс; $б$ – 2 класс; $в$ – 3 класс

Из анализа рис. 4, 5 следует, что адаптация РЛП к пространственной ориентации ЛА ММП приводит к повышению эффективности системы распознавания. Значительная разница в условных вероятностях правильного и ложного распознавания (рис. 4, в и рис. 5, в) обусловлена существенным различием ЭДРЛП (рис. 3, в).

В связи с тем, что увеличение длительности процедуры наблюдения ЛА улучшает точность оценки УПО [4], анализ эффективности распознавания для ММП необходимо производить на различных этапах траектории полета ЛА. На рис. 6, 7 представлены условные вероятности правильного и ложного распознавания для различных контактов с целью (для 3, 10 и 30-го контактов).

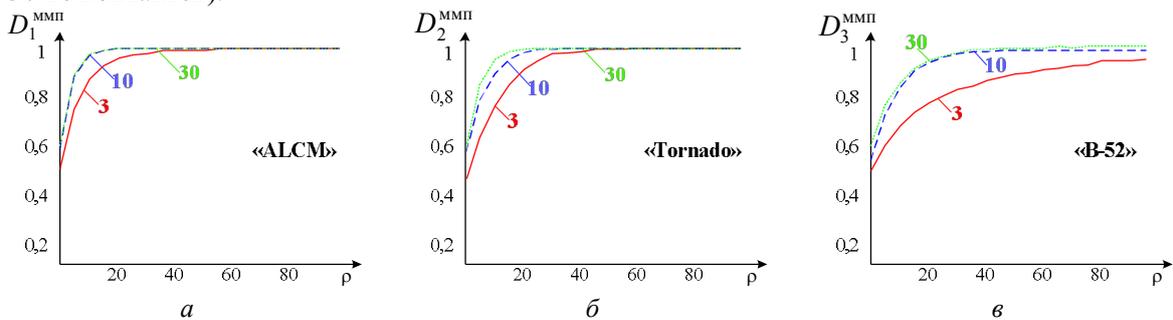


Рис. 6. Условные вероятности правильного распознавания для различных контактов с целью:
 a – 1 класс; $б$ – 2 класс; $в$ – 3 класс

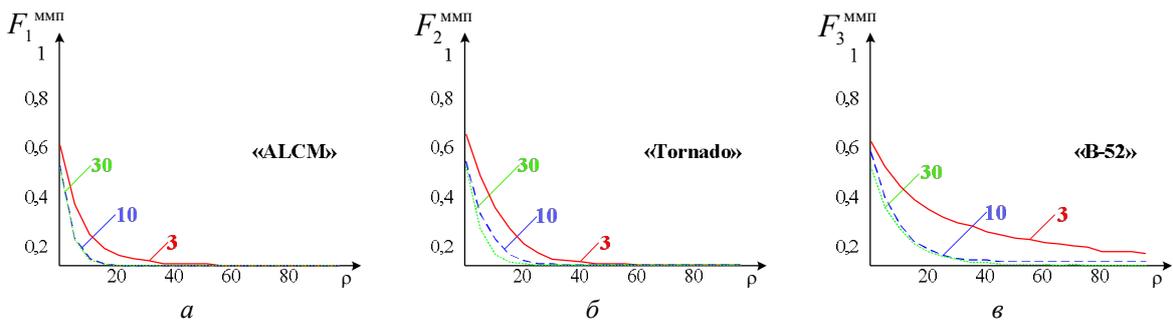


Рис. 7. Условные вероятности ложного распознавания для различных контактов с целью:
 a – 1 класс; $б$ – 2 класс; $в$ – 3 класс

Результаты моделирования, представленные на рис. 6, 7, позволяют утверждать, что с увеличением длительности процедуры наблюдения ЛА эффективность предложенного метода адаптации повышается. Приведенные условные вероятности правильного и ложного распознавания класса объекта рассчитаны только с учетом адаптации к углу курса ЛА. Использование в алгоритме адаптации оценок углов крена и тангажа ЛА повышает эффективность принимаемых решений. Кроме того, следует отметить, что предложенный подход к формированию адаптивных эталонных дальномерных РЛП справедлив для всех типов РЛП, зависящих от УПО ЛА.

Необходимо отметить, что на практике решение о классе наблюдаемого объекта необходимо принимать в условиях ограниченного временного ресурса, т. е. на первых контактах с целью. В связи с этим использование адаптации РЛП к пространственной ориентации ЛА методом максимального правдоподобия не всегда является эффективным, так как точность оценки УПО на первых контактах достаточно низкая [4]. Обеспечение высокой точности оценивания УПО ЛА вынуждает затрачивать значительные временные ресурсы [4]. Необходимость использования компромиссного решения между точностью оценивания УПО ЛА и располагаемым временным ресурсом вынуждает совершенствовать подходы к построению адаптивных систем.

Заключение

Методом статистических испытаний с помощью разработанного моделирующего комплекса проанализирована эффективность распознавания класса объекта по дальномерным РЛП для двух случаев: с адаптацией ЭДРЛП к пространственной ориентации ЛА и без нее. В качестве метода адаптации выбран наиболее распространенный на практике метод максимального правдоподобия. Недостатком данного метода является низкая точность измерения УПО ЛА на первых контактах с целью, что приводит к снижению эффективности классификации объектов наблюдения. Представленные результаты позволяют утверждать, что адаптация РЛП, основанная на использовании максимально правдоподобных оценок УПО ЛА требуемой точности, позволяет существенно повысить эффективность системы распознавания. Преодоление отмеченного недостатка возможно с помощью другого способа адаптации РЛП к текущим условиям наблюдения, основанного на учете закона распределения оценок УПО ЛА.

Список литературы

1. Курлович В.И., Шаляпин С.В. Основы теории радиосистем. Минск : ВА РБ, 1999. 342 с.
2. Сви́нарский М.В., Ярмолик С.Н., Храменков А.С. Влияние ракурса наблюдения цели на эффективность классификации радиолокационных объектов // Докл. БГУИР. 2017. № 2. С. 31–38.
3. Оценивание углов ориентации летательного аппарата в интересах адаптации к условиям наблюдения / С.Н. Ярмолик [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2017. № 4. С. 73–82.
4. Повышение точности оценивания ориентации летательного аппарата в интересах адаптации радиолокационных портретов к условиям наблюдения / С.Н. Ярмолик [и др.] // Докл. БГУИР. 2018. № 4. С. 73–82.
5. Radar target backscattering simulation – software and user’s manual / Y.D. Shirman [et al.]. Boston, London: Artech House, 2002. 94 p.

References

1. Kurlovich V.I., Shaljapin S.V. Osnovy teorii radiosistem. Minsk : VA RB, 1999. 342 s. (in Russ.)
2. Svinarskij M.V., Jarmolik S.N., Hramenkov A.S. Vlijanie rakursa nabljudenija celi na jeffektivnost' klassifikacii radiolokacionnyh ob'ektov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2. S. 31–38. (in Russ.)
3. Ocenivanie uglov orientacii letatel'nogo apparata v interesah adaptacii k uslovijam nabljudenija / S.N. Jarmolik [i dr.] // Vestn. Voen. akad. Resp. Belarus'. 2017. № 4. S. 73–82. (in Russ.)
4. Povyshenie tochnosti ocenivaniya orientacii letatel'nogo apparata v interesah adaptacii radiolokacionnyh portretov k uslovijam nabljudenija / S.N. Jarmolik [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2018. № 4. S. 73–82. (in Russ.)
5. Radar target backscattering simulation – software and user’s manual / Y.D. Shirman [et al.]. Boston, London: Artech House, 2002. 94 p. (in Russ.)

Сведения об авторах

Ярмолик С.Н., к.т.н., доцент, начальник цикла кафедры автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Свинарский М.В., аспирант кафедры автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Храменков А.С., к.т.н., доцент кафедры автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Зайко Е.В., магистрант кафедры автоматики, радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
тел. +375-33-640-61-14;
e-mail: mechislav1993@gmail.com
Свинарский Мечислав Витальевич

Information about the authors

Yarmolik S.N., PhD, associate professor, head of the cycle of the department of automatics, radiolocation and transceivers devices of Military academy of the Republic of Belarus.

Svinarskiy M.V., PG student of the department of automatics, radiolocation and transceivers devices of Military academy of the Republic of Belarus.

Khramenkov A.S., PhD, associate professor of the department of automatics, radiolocation and transceivers devices of Military academy of the Republic of Belarus.

Zaiko E.V., PG student of the department of automatics, radiolocation and transceivers devices of Military academy of the Republic of Belarus.

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 220
Military academy of the Republic of Belarus
tel. +375-33-640-61-14;
e-mail: mechislav1993@gmail.com
Svinarskiy Mechislav Vitalevich