

УДК 621.396.96

ВЛИЯНИЕ РАКУРСА НАБЛЮДЕНИЯ ЦЕЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИФИКАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

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

*Военная академия Республики Беларусь,
Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 18 января 2017

Аннотация. Рассмотрено влияние ракурса наблюдения на качество принимаемых решений о классе объекта при решении задачи радиолокационного распознавания. В качестве входных портретов использовались дальномерный и спектральный радиолокационный портрет, полученные с помощью программы «Back Scattering Simulation». Показателями качества радиолокационного распознавания выступают условные вероятности принимаемых решений.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание, радиолокационные портреты, ракурс наблюдения радиолокационного объекта.

Abstract. An influence of the observation angle on quality of the decisions about class object in solving the problem for radar recognition is considered. The program «Back Scattering Simulation» helped to receive radar range profile and radar spectral profile. The conditional probabilities of decisions were used as quality indicators of radar recognition.

Keywords: radar recognition, radar profile, observation angle radar object.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 104, No. 2, pp. 31–38

Influence of the observation angle target on efficiency classification of radar objects

M.V. Svinarsky, S.N. Yarmolik, A.S. Khramenkov

Введение и постановка задачи

Устройства распознавания образов являются сегодня неотъемлемой частью технических устройств принятия решения. Большинство современных радиолокационных систем имеют в своем составе устройства распознавания или их элементы [1]. Постоянное усложнение воздушно-помеховой обстановки, расширение ассортимента наблюдаемых объектов вызывает необходимость повышения эффективности процесса классификации.

При использовании активной радиолокации, информация о классе наблюдаемого объекта содержится в наблюдаемом эхо-сигнале [2]. Одно из актуальных направлений теории и практики автоматического распознавания объектов связано с анализом их радиолокационных образов. Под образом цели понимается распределение отражательных свойств цели по одной или нескольким анализируемым координатам [3]. Эффективность распознавания в значительной мере зависит от выбора системы классификационных признаков. Применительно к задаче радиолокационного распознавания чаще всего используются сигнальные и траекторные признаки наблюдаемых объектов [3–5]. Для повышения эффективности классификации, используемые признаки должны наиболее полно характеризовать образ наблюдаемого объекта, а также быть устойчивыми и информативными [5]. При этом классификационные признаки целей различных классов должны обладать определенной контрастностью.

Известно, что наиболее полно отражательные свойства целей характеризуют их радиолокационные портреты. Под радиолокационным портретом (РЛП) понимают

упорядоченную совокупность комплексных амплитуд отраженного сигнала, распределение квадратов модулей которых по рассматриваемым координатам соответствует распределению мощности отраженного сигнала [6]. Очевидно, что чем выше разрешающая способность радиолокатора по анализируемой координате, тем ближе РЛП к физическому образу цели.

В большинстве случаев процедура радиолокационного распознавания предполагает решение ряда задач: выделение реализации РЛП, характеризующего особенности наблюдаемого объекта; обработку выделенного РЛП в интересах классификации объекта; принятие решения о классе (типе) наблюдаемого объекта.

Процесс принятия решения о классе наблюдаемого объекта предполагает сопоставление реализации наблюдаемого РЛП с эталонным портретом цели [3]. Эффективность принимаемого решения во многом зависит от оптимальности процедуры обработки выделенного РЛП и степени соответствия портрета эталону [5]. В связи с тем, что радиолокационные объекты наблюдаются, как правило, в условиях быстро изменяющейся воздушно-помеховой обстановки, задача совмещения наблюдаемого РЛП и ожидаемого эталона является весьма важной [5]. При этом определенный интерес вызывает влияние степени соответствия входного ожидаемого (эталонного) РЛП на эффективность процесса классификации. Обрабатываемые РЛП, как правило, являются функциями информативных и малоинформативных параметров, учет которых весьма важен при классификации [4]. Типовым малоинформативным параметром является ракурс цели, влияние которого во многих случаях является существенным препятствием для достижения потенциальных характеристик распознавания [7].

В статье анализируется влияние ракурса наблюдения целей на качество принимаемых решений о классе объекта при использовании их дальномерных (ДРЛП) и спектральных (СРЛП) радиолокационных портретов. При анализе эффективность принимаемых решений характеризуется условными вероятностями принимаемых решений [3]. В выполненных исследованиях использовалась программа моделирования РЛП типовых целей «Back Scattering Simulation» (BSS), разработанная Я.Д. Ширманом и его сотрудниками [8].

Влияние ракурса наблюдения целей на качество принимаемых решений о классе объекта при использовании их дальномерных радиолокационных портретов

В интересах классификации радиолокационных объектов весьма часто применяют их ДРЛП [5, 7]. Принцип формирования радиолокационного портрета цели показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример формирования дальномерного портрета

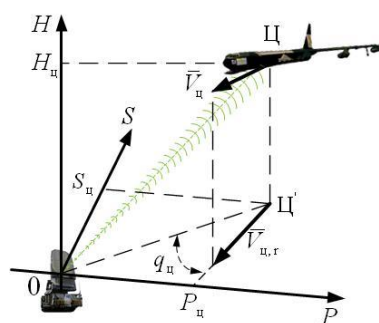


Рис. 2. Земная параметрическая прямоугольная система координат

Условием получения ДРЛП является обеспечение сверхразрешения по дальности: разрешающая способность РЛС по дальности Δr много меньше радиальной протяженности объекта $\delta r_{Ц}$. ДРЛП представляет собой совокупность N комплексных амплитуд отраженного сигнала $\xi^r = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N\}$, относящихся к различным элементам разрешения по дальности. Элементы РЛП характеризуют радиальное распределение областей отражения объекта с учетом его конструктивных особенностей. Очевидно, что вид ДРЛП и, следовательно, его информативность при принятии решения о классе объекта, могут существенно зависеть от углов наблюдения цели [9–11].

С целью иллюстрации ракурсной зависимости для типового объекта проследим трансформацию формы ДРЛП при изменении угла наблюдения цели. Под ракурсом цели (курсовым углом $q_{Ц}$) понимают угол в горизонтальной плоскости между направлением на

станцию радиолокационного сопровождения и проекцией курса цели (рис. 2) [12]. На рис. 2 координата H характеризует высоту цели, а координата P – курсовой параметр ее движения, под которым понимается кратчайшее расстояние от начала координат до проекции курса цели на горизонт. Координата S определяет величину пути цели до параметра.

Зависимость ракурса наблюдения ДРЛП типовых объектов исследовалась методом математического моделирования с использованием программы BSS [8]. Исходные данные для моделирования: ширина полосы частот для ДРЛП составляет 150 МГц, а СРЛП 0,5 МГц; число элементов дальности для ДРЛП 200 дискретов, для СРЛП – 3.

В качестве примера на рис. 3 представлено изменение формы ДРЛП бомбардировщика В-52 при изменении ракурса его наблюдения.

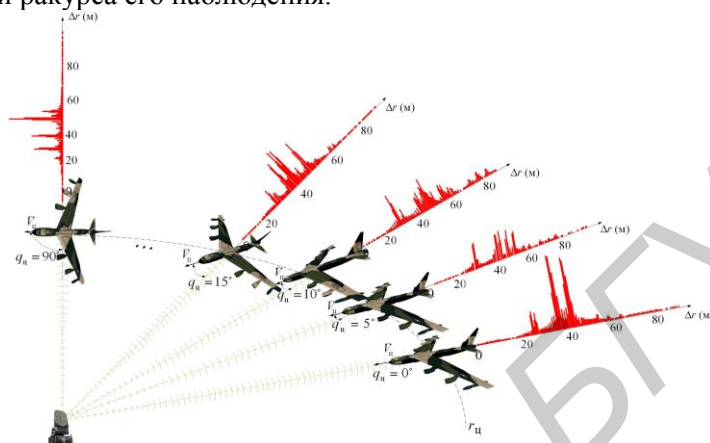


Рис. 3. Формирование дальномерного портрета В-52 при различных ракурсах наблюдения

Очевидно, что ДРЛП существенно зависит от ракурса наблюдения объекта. Данный эффект обусловлен рядом факторов: изменением количества и ЭПР наблюдаемых областей локального отражения, взаимным влиянием рассеивателей и т.п. Следует отметить, что в большинстве радиолокационных систем в силу недостаточного разрешения по радиальной дальности выделение полноценного ДРЛП невозможно. Однако в ряде случаев существует возможность приближенного оценивания радиальной протяженности наблюдаемой цели. Формируемая оценка, являясь грубым аналогом ДРЛП, качественно характеризует размеры цели и может использоваться в интересах классификации объектов [5]. Влияние ракурса наблюдения на оценку радиальной протяженности радиолокационного объекта исследовалось методом математического моделирования. В качестве примера на рис. 4 представлена зависимость оценки радиальной протяженности В-52 (рис. 4, а) и МИГ-21 (рис. 4, б) от изменения ракурса наблюдения радиолокационного объекта $\Delta q_{ц}$ с шагом: 1° .

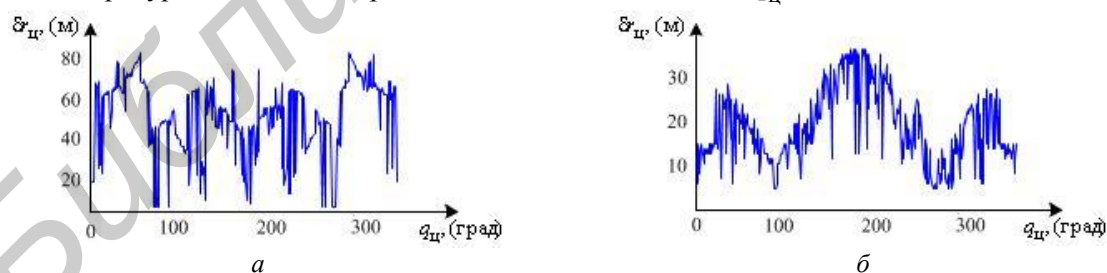


Рис. 4. Зависимость оценки радиальной протяженности: а – ДРЛП В-52 от ракурса наблюдения; б – ДРЛП МИГ-21 от ракурса наблюдения

Из рис. 4, следует значительное влияние ракурса наблюдения на оценку радиальной протяженности цели, а также ее зависимость от формы и размеров объекта.

Приведенные результаты показывают, что в процессе классификации объектов необходимо использовать ДРЛП или оценку классификационных признаков с учетом условий их выделения. При этом определенный интерес вызывает эффективность распознавания радиолокационных объектов при наличии рассогласования по ракурсу между РЛП наблюдаемого объекта и используемым эталонным портретом.

Оценка эффективности распознавания радиолокационных объектов по их дальномерным РЛП проводилась методом математического моделирования. При исследованиях использовался наиболее распространенный оптимальный байесовский алгоритм распознавания гауссовских сигналов, наблюдаемых на фоне некоррелированных отсчетов шума [6]. Принцип классификации заключался в следующем [3]: устройству распознавания предъявляются выделенные ДРЛП целей анализируемых классов; в устройстве распознавания воспроизводятся модели распознаваемых классов целей (эталонные); реализации дальномерных РЛП наблюдаемых целей сравниваются с имеющимися эталонными РЛП. За истинную принималась гипотеза, соответствующая максимальному сходству РЛП наблюдаемого объекта и одного из используемых эталонных портретов.

В процессе исследований анализировались ДРЛП целей трех классов: вертолет АН-64, бомбардировщик В-52 и ракета АLCM, получаемые при помощи программы BSS с различных ракурсов наблюдения цели: $q_{ц} = 0, 5, 10, 15^\circ$.

В качестве эталонных портретов использованы ДРЛП анализируемых объектов (рис. 5), выделяемые при наблюдении цели с нулевым курсовым углом ($q_{ц} = 0$).

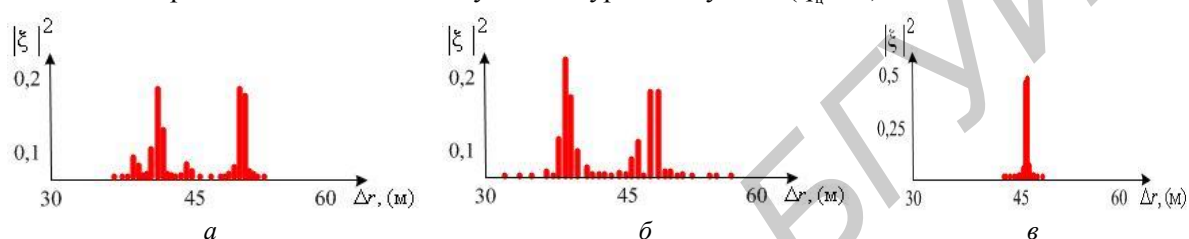


Рис. 5. Нормированные эталонные дальномерные РЛП анализируемых целей: *а* – объект 1-го класса; *б* – объект 2-го класса; *в* – объект 3-го класса

Качество функционирования устройства радиолокационного распознавания для текущего отношения сигнал-шум γ характеризовалось совокупностью M условных вероятностей правильного распознавания D_k и M средних вероятностей ложного распознавания F_k (где M – количество распознаваемых классов) [5]. Оценивание характеристик распознавания проводилось методом статистического моделирования ($N_{\text{опытов}} = 10^6$) для исследуемых значений отношений сигнал-шум ($\gamma = 5 \dots 15$ дБ). Результаты математического моделирования в виде графиков характеристик распознавания для различных углов наблюдения представлены на рис. 6, *а–в*.

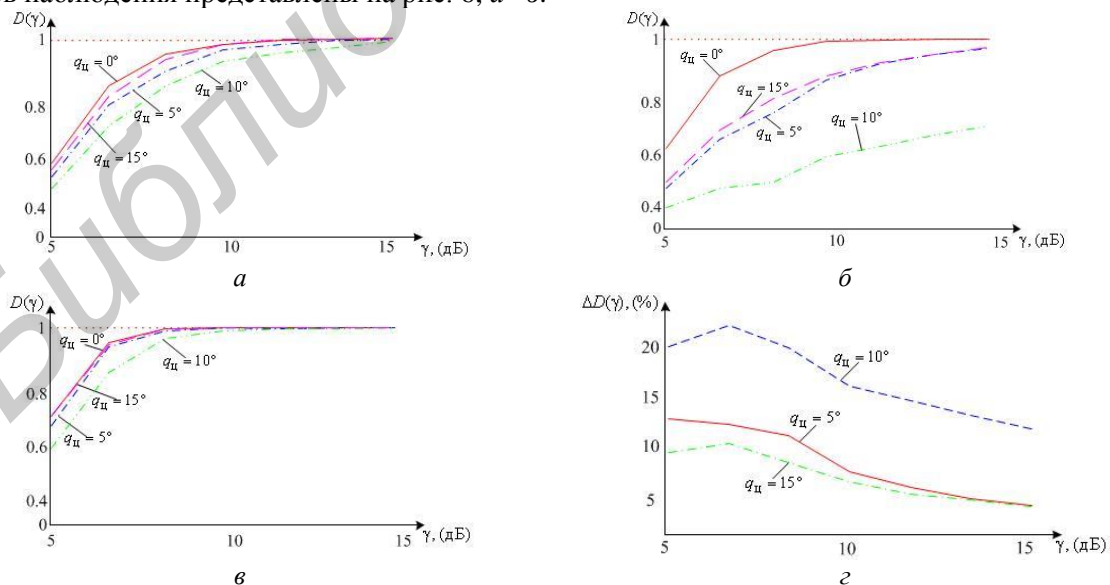


Рис. 6. Характеристики распознавания исследуемых объектов (при наличии рассогласования в ракурсе наблюдения): *а* – объект 1-го класса; *б* – объект 2-го класса; *в* – объект 3-го класса; *з* – усредненные по классам объектов относительные потери в характеристиках распознавания

Приведенные результаты показывают, что наличие ракурсного рассогласования между входным и эталонным ДРЛП приводит к потерям в характеристиках распознавания: от 5 % до 23 % (рис. 6, з). Данный факт обуславливает необходимость учета ракурса наблюдения радиолокационного объекта в устройствах распознавания по ДРЛП. При этом, очевидно, что одним из способов повышения эффективности систем классификации радиолокационных объектов является их адаптация к ракурсу наблюдения цели.

Влияние ракурса наблюдения целей на качество принимаемых решений о классе объекта при использовании их спектральных радиолокационных портретов

Анализ тактико-технических характеристик современных радиолокационных станций позволяет утверждать, что большинство имеющихся станций реализуют когерентные методы обработки принятого сигнала. Отмеченный факт обеспечивает возможность выделения и использования в интересах распознавания спектральных РЛП объектов [2, 5].

Доплеровский (спектральный) портрет [6] представляет собой совокупность N комплексных амплитуд отраженного сигнала, $\xi^f = \{\xi_{s_1}, \xi_{s_2}, \dots, \xi_{s_N}\}$, относящихся к различным элементам разрешения по доплеровской частоте. Пространством распознавания является доплеровская частота.

Известно, что спектр отраженного сигнала от наблюдаемых воздушных объектов существенно обогащается компонентами в силу проявления эффекта вторичной модуляции [13]. Возникновение дополнительных модуляционных составляющих несущей частоты и ее гармоник позволяет в ряде случаев классифицировать объекты, а также определять их тип [7].

Центральные компоненты спектра обусловлены отражениями от элементов (локальных отражателей) планера, а их положение на частотной оси определяется скоростью радиального (относительно РЛС) перемещения объекта и характеризуется частотой Доплера [13]. Модуляционные компоненты возникают вследствие отражений от вращающихся элементов силовой установки (лопаток компрессоров и турбин, лопастей воздушных винтов). Их число, интенсивность и частотное распределение относительно планерной составляющей определяются множеством факторов: скорость вращения отражающих элементов, их размеры, форма, углы наблюдения [13]. В общем случае спектр отраженного сигнала для фиксированных условий наблюдения индивидуален для различных классов и даже типов объектов, что позволяет решать задачи радиолокационного распознавания [7].

По аналогии с ДРЛП методом математического моделирования исследовался процесс изменения спектральных РЛП целей при различных ракурсах их наблюдения. Влияние ракурса наблюдения радиолокационного объекта на форму СРЛП на примере бомбардировщика В-52 приведено на рис. 7 (режим работы двигательных установок при различных ракурсах наблюдения не изменялся).

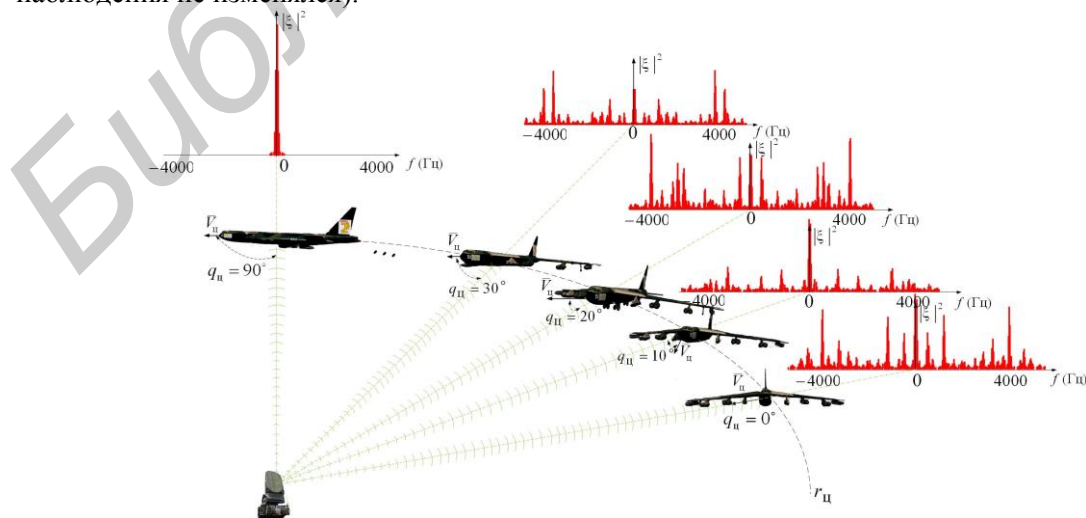


Рис. 7. Вид спектрального РЛП самолета В-52 (при различных ракурсах наблюдения)

Из рис. 7 следует наличие существенной зависимости спектрального РЛП цели от ракурса ее наблюдения, даже при одинаковом режиме работы двигательных установок. Полученные закономерности полностью согласуются с результатами исследования спектров отраженного сигнала, приведенными в [14, 15].

Оценка влияния ракурса на эффективность распознавания радиолокационных объектов по их СРЛП проводилась методом математического моделирования. По аналогии с исследованиями ДРЛП, для распознавания использовался оптимальный байесовский алгоритм распознавания гауссовских сигналов, наблюдаемых на фоне некоррелированных отсчетов шума. Изложенный выше принцип классификации не изменялся.

В качестве эталонных использованы СРЛП анализируемых объектов (рис. 8), выделяемые при наблюдении цели с нулевым курсовым углом ($q_{ц} = 0$).

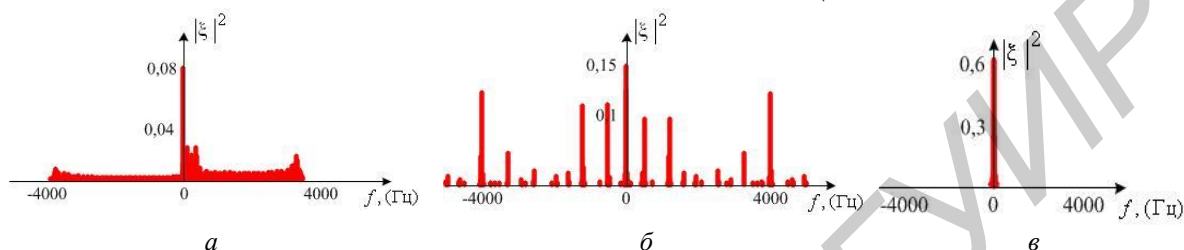


Рис. 8. Нормированные эталонные спектральные РЛП анализируемых целей
 a – объект 1-го класса; b – объект 2-го класса; v – объект 3-го класса

Результаты математического моделирования в виде графиков характеристик распознавания для различных углов наблюдения представлены на рис. 9, $a-v$.

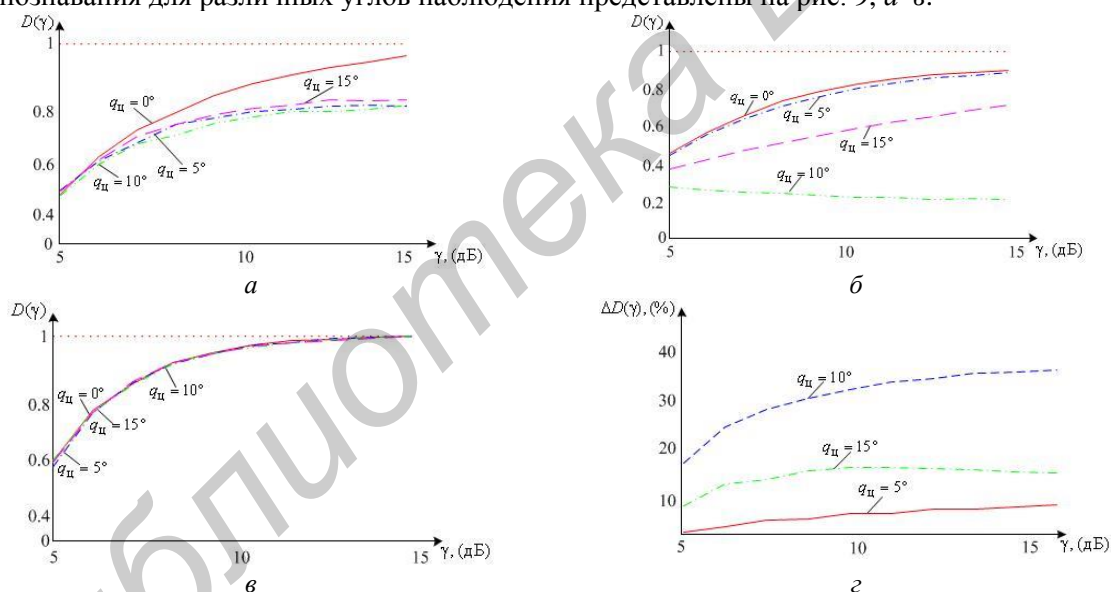


Рис. 9. Характеристики распознавания исследуемых объектов (при наличии рассогласования в ракурсе наблюдения): a – объект 1-го класса; b – объект 2-го класса; v – объект 3-го класса; z – усредненные по классам объектов относительные потери в характеристиках распознавания

Полученные результаты показывают, что наличие ракурсного рассогласования между входным и эталонным спектральным РЛП может привести к существенным потерям в характеристиках распознавания: от 1 до 33 % (рис. 9, z).

Заключение

Результаты исследований показывают целесообразность и важность учета ракурса наблюдения объекта в процессе принятия решения о его классе: в устройстве распознавания используемые эталонные РЛП должны быть адаптированы к текущему ракурсу наблюдения объекта.

Повышение требований к информативности РЛС обуславливает необходимость более полного учета свойств и характеристик наблюдаемых объектов, а также перевода некоторых

параметров из разряда неинформативных в перечень неизвестных информативных, подлежащих оценке. При этом, очевидно, что задача изучения и учета динамики изменения сигнальных признаков радиолокационных объектов позволяет определить пути улучшения адаптивных свойств систем распознавания.

Список литературы

1. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
3. Радиолокационное распознавание: Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман [и др.]. Харьков, 1994. 122 с.
4. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиозлектронная борьба. Ч. 1. Основы радиолокации. М.: Воен. издат., 1983. 456 с.
5. Небабин В.Г., Сергеев В.В. Методы и техника радиолокационного распознавания. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
6. Охрименко А.Е. Основы извлечения, обработки и передачи информации. Ч. 3. Минск, 1995. 64 с.
7. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. Выпуск 3 / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Научно-технические серии. 2000. 98 с.
8. Radar target backscattering simulation – software and user's manual / Y.D. Shirman [et al.]. Boston, London: Artech House, 2002. 94 p.
9. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / О.И. Сухаревский [и др.]. Харьков, 2009. 468 с.
10. Филимонов А.Б., Фам Фыонг Кыонг. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Том 17, № 4. С. 273–280.
11. Казаков Е.Л., Казаков А.Е. Адаптация реализаций амплитуд отраженных узкополосных сигналов при определении признаков распознавания радиолокационных целей в однопозиционной РЛС // Наука и техника Воздушных сил Украины. 2011. № 1 (5). С. 95–97.
12. Неупаков Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. М.: Воениздат, 1991. 343 с.
13. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов. Минск: ВА РБ, 2005. 133 с.
14. Совместный учет сигнальных и траекторных признаков для решения задачи обнаружения-распознавания маневра воздушного объекта / М.В. Крикливый [и др.]. // Вест. Военной академии Республики Беларусь. 2012. № 3. С. 90–95.
15. Спектральная плотность узкополосных сигналов, отраженных от маневрирующих воздушных целей / С.А. Горшков [и др.]. // Радиотехника. 2005. № 10. С. 120–123.

References

1. Shirman Ya.D. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik. Moscow, Radiotekhnika, 2007. 512 p. (in Russ.)
2. Gorelik A.L., Gurevich I.B., Skriplin V.A. Sovremennoe sostoyanie problemy raspoznavaniya. Moscow, Radio i svyaz', 1985. 160 p. (in Russ.)
3. Radiolokatsionnoe raspoznavanie: Teoreticheskie osnovy radiolokatsii / Ya.D. Shirmani dr. Khar'kov, 1994. 122 p. (in Russ.)
4. Okhrimenko A.E. Osnovy radiolokatsii i radioelektronnaya bor'ba. Ch. 1. Osnovy radiolokatsii. Moscow, Voensizdat, 1983. 456 p. (in Russ.)
5. Nebabin V.G., Sergeev V.V. Metody i tekhnika radiolokatsionnogo raspoznavaniya. Moscow, Radio i svyaz', 1984. 152 p. (in Russ.)
6. Okhrimenko A.E. Osnovy izvlecheniya, obrabotki i peredachi informatsii. Ch. 3. Minsk, 1995. 64 p. (in Russ.)
7. Radiolokatsionnoe raspoznavaniya i metody matematicheskogo modelirovaniya. Vipusk 3 / Pod red. Ya.D. Shirmana. M.: Nauchno-tekhnicheskie serii, 2000. 98 p. (in Russ.)
8. Radar target backscattering simulation – software and user's manual / Y.D. Shirman [et al.]. Boston, London: Artech House, 2002. 94 p.
9. Rasseyanie elektromagnitnykh voln vozdushnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob'ektami / O.I. Sukharevskiy [i dr.]. Khar'kov, 2009. 468 p. (in Russ.)
10. Filimonov A.B., Fam Fyong Kyong. Metody formirovaniya informativnykh priznakov radiolokatsionnykh dal'nostnykh portretov vozdushnykh tseley // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2016. Tom 17, № 4. S. 273–280. (in Russ.)

11. Kazakov E.L. Kazakov A.E. Adaptatsiya realizatsiy amplitud otrazhennykh uzkopolosnykh signalov pri opredelenii priznakov raspoznavaniya radiolokatsionnykh tseley v odnopolozitsionnoy RLS // Nauka i tekhnika Vozdushnykh sil Ukrainy. 2011. № 1 (5). S. 95–97. (in Russ.).
12. Neupakoev F.K. Strel'ba zenitnymi raketami. Moscow: Voenizat, 1991. 343 p. (in Russ.)
13. Slyusar' N.M. Effekt vtorichnoy modulyatsii radiolokatsionnykh signalov. Minsk: VARB, 2005. 133 p. (in Russ.)
14. Sovmestnyy uchet signal'nykh i traektornykh priznakov dlya resheniya zadachi obnaruzheniya-raspoznavaniya manevra vozdushnogo ob'ekta / M.V. Kriklyvyy [i dr.]. // Vest. Voennoy akademii Respubliki Belarus'. 2012. № 3. S. 90–95. (in Russ.)
15. Spektral'naya plotnost' uzkopolosnykh signalov, otrazhennykh ot manevriruyushchikh vozdushnykh tseley / S.A. Gorshkov [i dr.]. // Radiotekhnika. 2005. № 10. S. 120–123. (in Russ.)

Сведения об авторах

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

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

Храменков А.С., старший инженер кафедры радиолокации и приемопередающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Адрес для корреспонденции

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

Information about the authors

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

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

Khramenkov A.S., senior engineer of department of radiolocation and transceivers 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