

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-30-34

Manuscript received 20 September 2022;  
Accepted 30 October 2022

**Уханов Евгений Валентинович,**  
Московский технический университет связи  
и информатики, Москва, Россия  
[searif@yandex.ru](mailto:searif@yandex.ru)

**Ключевые слова:** радиолокационный портрет,  
оптимальная система распознавания,  
сопоставление изображений, критерий  
Неймана-Пирсона

Материалы данной статьи посвящены развитию одного из основных аспектов систем с искусственным интеллектом – распознаванию образов. Актуальность материалов обусловлена стремительным развитием радиолокационных систем различного назначения и переходу в некоторых направлениях от радиолокации к радиовидению [1]. В настоящее время большое внимание уделяется развитию радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны, для дистанционного зондирования земли и распознавания неподвижных наземных объектов, однако, по мнению автора, немаловажным вопросом является радиолокационное распознавание подвижных воздушных объектов. Целью данной статьи является предложение по решению задачи распознавания подвижных воздушных объектов по их радиолокационным портретам, на основе теории проверки статистических гипотез. На данный момент существует много методов распознавания образов, в данной статье рассмотрен алгоритм, реализующий функцию сопоставления текущего изображения и эталонного из заранее сформированного каталога. В качестве текущего изображения рассматривается азимутально-дальностный радиолокационный портрет, формируемый за счет сверхразрешения по азимуту, путем синтезирования апертуры антенны и по дальности, при использовании свехширокополосного сигнала. Автор предлагает, при статистическом подходе решения задачи радиолокационного распознавания, не привязываться к нахождению вероятности принадлежности объекта к каждому из заранее сформированных классов, используя выбранный признак с известной плотностью распределения вероятности значений, а рассматривать данный процесс с позиции сигнала на выходе оптимальной системы распознавания до конкретного образа. Предложен новый подход к описанию вероятностных событий при принятии решения о распознавании. В качестве статистического классификатора предлагается воспользоваться теорией статистических решений Неймана-Пирсона.

#### Информация об авторе:

Уханов Евгений Валентинович, к.т.н., кафедра "Безопасность телекоммуникаций", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

#### Для цитирования:

Уханов Е.В. Решение задачи оптимального радиолокационного распознавания подвижных воздушных объектов на основе теории проверки статистических гипотез // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №11. С. 30-34.

#### For citation:

Ukhanov E.V. (2022). Solving the problem of optimal radar recognition of mobile aerial objects based on the theory of statistical hypothesis testing. T-Comm, vol. 16, no.11, pp. 30-34. (in Russian)

### Введение

В настоящее время, во все сферы интеллектуальной деятельности человека, включая военную, активно внедряются системы с искусственным интеллектом, одним из основных аспектов которых является распознавание изображений (образов). Это относительно молодая, но активно развивающаяся и наиболее математизированная область научных и практических исследований, целью которой является извлечение из изображений полезной информации для повышения эффективности принятия решений во всех сферах науки и техники [2, 5]. В зависимости от способа формирования можно привести различные примеры изображений: оптические, инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские, радиолокационные.

В данной работе рассмотрена задача распознавания подвижных воздушных объектов по их радиолокационному портрету. По мнению автора, наибольший интерес данная проблема может вызвать у разработчиков машинного (компьютерного) зрения как наземных, так и бортовых (в том числе космического базирования) радиолокационных систем различных видов вооруженных сил. Это обосновано тем, что информация о классе или типе цели позволяет:

- выявить приоритетные цели из множества других при массированном налете;
- отделить ложные цели от истинных;
- принять оптимальные шаги, направленные на поражение как одиночной, так и групповой цели, сократив временной ресурс;
- наиболее рационально использовать средства поражения и т.д.

Таким образом, данная информация позволяет оптимизировать задачи принятия решений по целераспределению, целеуказанию, а также адаптации средств поражения с учетом характеристик конкретной цели.

### Постановка задачи

Будем полагать, что РЛС обнаружен и поставлен на сопровождение неизвестный подвижный воздушный объект. На запрос государственной системы опознавания, по неизвестным причинам, объект не отвечает. Встает вопрос идентификации его образа, т. е. распознавании данного объекта и, соответственно, мерах воздействия к нему. Для этой цели в составе РЛС целесообразно иметь режим синтезирования апертуры антенны, для построения радиолокационного портрета и режим (или отдельную систему) распознавания с заданными алгоритмами работы, разработка которых начинается с оптимальных.

#### Решение задачи оптимального радиолокационного распознавания

Обнаружение, а в последствии и распознавание того или иного образа является случайным событием, вероятность которого можно описать с помощью закона распределения вероятностей. Далее необходимо решить задачу определения правил классификации обнаруженных объектов. Существуют различные способы построения классификаторов, так в работе [5], в качестве статистических классификаторов

рассмотрены: байесовский классификатор, минимаксный критерий классификации и критерий Неймана-Пирсона. Однако в открытых источниках, например [3, 4, 5], статистический подход к решению задачи распознавания в основном рассматривается с позиции определения вероятности появления объекта в каждом из заранее сформированных классов, по выбранному признаку с известной плотностью распределения вероятности его значений.

В некоторых случаях, в частности авиации, классификация самолетов, например, на истребители, бомбардировщики и транспортные, по характерным значениям их признаков, с позиции радиолокационных средств наблюдения является весьма условным. Данные самолеты, в зависимости от задач и обстановки, могут иметь похожие признаки - летать на одинаковых высотах и с одинаковыми скоростями. Также, не смотря на различные размеры, в зависимости от угла наблюдения, могут иметь соизмеримую эффективную площадь отражения.

В связи с этим автор предлагает, при статистическом подходе к решению задачи радиолокационного распознавания не привязываться к вероятности принадлежности объекта к одному из заданных классов, а рассматривать данный процесс с позиции сигнала на выходе оптимальной системы распознавания до конкретного образа, с заданной вероятностью.

В материалах данной статьи также рассмотрен метод распознавания, реализующий алгоритм сопоставления текущего изображения и эталонного из заранее сформированного каталога, которое можно осуществить, используя корреляционную метрику, а именно, коэффициент корреляции между текущим изображением  $S_{тл}$  и эталонным  $S_{эл}$ . В общем виде нормированный коэффициент корреляции определяется выражением

$$R(S_{тл}, S_{эл}) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S_{тл}(x, y) - S_{тл}^0) (S_{эл}(x, y) - S_{эл}^0)}{\sqrt{\left( \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S_{тл}(x, y) - S_{тл}^0)^2 \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (S_{эл}(x, y) - S_{эл}^0)^2 \right)}}, \quad (1)$$

где  $S_{тл}^0$  и  $S_{эл}^0$  – средние значения интенсивности текущего и эталонного изображений соответственно;

– значения  $x$  и  $y$  пропорциональны  $\Delta_{аз}$  и  $\Delta_{ум}$ ;

–  $M$  и  $N$  – количество строк и столбцов в матрице изображения.

В нашем случае текущим изображением является азимутально-дальностный радиолокационный портрет (РЛП)  $S_{тл}(\Delta_{аз}, \Delta_{ум})$  который представим, как аддитивную смесь изображения  $I_{тл}(\Delta_{аз}, \Delta_{ум})$  и помех различного вида  $n(\Delta_{аз}, \Delta_{ум})$ , которые в данной работе будем обозначать, как потери:

$$S_{тл}(\Delta_{аз}, \Delta_{ум}) = I_{тл}(\Delta_{аз}, \Delta_{ум}) + n(\Delta_{аз}, \Delta_{ум}). \quad (2)$$

где  $\Delta_{аз}$  и  $\Delta_{ум}$  – разрешение радиолокационной системы по азимуту и углу места (наклонной дальности), соответственно.

Как отмечалось ранее, данный радиолокационный портрет может быть получен в результате сверхразрешения по дальности, при использовании сверхширокополосных сигналов и по азимуту при реализации алгоритма синтезирования апертуры антенны на этапе сопровождения движущейся

воздушной цели. К основным потерям, ухудшающим качество текущего изображения или искажающим его и, соответственно, негативным образом, влияющим на распознавание, можно отнести:

- потери, связанные с уровнем шумов различного вида;
- потери на координатное согласование изображений, при нахождении коэффициента корреляции;
- потери на обработку сигнала в процессоре, которые определяются потерями на дискретизацию и весовую обработку;
- потери в СВЧ тракте передатчика и приемника (волноводный тракт);
- отери при максимальных углах прокачки антенны;
- отери в фазовращателях антенны и т.д.

Принятие решения о распознавании будет осуществляться по пороговому принципу, т.е. объект считается распознанным, если выходной сигнал оптимальной системы распознавания  $y_{вых}$  (в данном случае нормированный коэффициент корреляции) по результатам сравнения текущего и эталонного РЛП превысит заданный порог  $y_{пор}$ . Из-за наличия потерь уровень выходного сигнала носит случайный характер и существенно усложняет процесс распознавания. Перечисленные потери, ухудшающие качество изображения, не зависят друг от друга, носят случайный характер и, следовательно, распределены по нормальному закону [6].

Исследование характеристик корреляционного алгоритма сопоставления изображений показало его относительную устойчивость к потерям в виде шума, распределенного по нормальному закону. В тоже время координатное согласование текущего и эталонного изображений играет более значимую роль на величину нормированного коэффициента корреляции.

Поворот изображений на шестнадцать градусов относительно друг друга значительно уменьшает значение коэффициента корреляции и не позволяет преодолеть заданный порог на выходе алгоритма распознавания. Более подробный анализ реализации и характеристик рассматриваемого алгоритма не входит в заданную тематику и объем материалов данной статьи. Одним из основных вопросов данного алгоритма является выбор порога распознавания, который предлагается решить статистическим подходом.

В процессе распознавания предлагается выбрать две статистические гипотезы: в каталоге, для распознаваемого объекта существует эталонное изображение  $S_{эи} \neq 0$  (первая гипотеза) для полученного текущего изображения, или оно отсутствует  $S_{эи} = 0$  (вторая гипотеза).

В результате распознавания должен быть сделан вывод, текущий РЛП соответствует одному из эталонных РЛП каталога и, соответственно, произошло распознавание объекта наблюдения, с заданной вероятностью правильного распознавания, или текущий РЛП не соответствует ни одному из эталонных РЛП каталога и, соответственно, объект не распознан.

В связи с двухальтернативным выбором статистических гипотез возможны следующие варианты развития вероятностных событий при принятии решения о распознавании объекта.

**Правильное распознавание** – когда текущему радиолокационному портрету объекта действительно соответствует

один из эталонных портретов, находящихся в каталоге и в результате их сравнения принято правильное решение. Из-за потерь, ухудшающих качество изображения и различных неблагоприятных факторов, текущему радиолокационному портрету свойственны различные искажения, следовательно, результат сравнения носит случайный характер и вероятность этого события является вероятностью правильного распознавания  $P_{пр}$ .

**Пропуск распознавания** – ошибочное решение, возникающее тогда, когда текущему радиолокационному портрету объекта соответствует один из эталонов каталога, но из-за потерь и воздействия различных неблагоприятных факторов распознавание не состоялось и выходной сигнал  $y_{вых}$  не превысил порог  $y_{пор}$ , либо для текущего РЛП есть эталонный РЛП но сопоставился эталон из базы данных не соответствующий данному объекту. Данное событие так же является случайным, поэтому будем его обозначать как вероятность пропуска распознавания  $P_{прр}$ .

Поскольку соответствующие одному и тому же условию того, что радиолокационному портрету объекта гарантированно соответствует один из эталонов базы данных, вероятность *правильного распознавания*  $P_{пр}$  и вероятность *пропуска распознавания*  $P_{прр}$  составляют полную группу событий, их суммарная вероятность равна единице:

$$P_{пр} + P_{прр} = 1. \quad (3)$$

**Ложное распознавание** – также ошибочное решение, возникающее тогда, когда текущему РЛП априори не соответствовал ни один из эталонных РЛП каталога, однако в результате сравнения, из-за действия потерь, искажающих текущий РЛП, произошло распознавание с не принадлежащему ему эталонным РЛП. Как и предыдущие события оно носит случайный характер и будет определяться вероятностью ложного распознавания  $P_{лр}$ .

**Правильное нераспознавание** – это правильное решение, когда априори для текущего РЛП эталон действительно отсутствовал и в результате сравнения текущему радиолокационному портрету объекта не соответствовал ни один из эталонных РЛП, находящихся в каталоге. Данное событие будем трактовать как вероятность правильного нераспознавания  $P_{пн}$ .

Вероятность *ложного распознавания*  $P_{лр}$  и вероятность *правильного нераспознавания*  $P_{пн}$  также составляют полную группу событий и сумма данных вероятностей равна единице:

$$P_{лр} + P_{пн} = 1. \quad (4)$$

Как правило, при статистическом подходе в распознавании образов используют Байесовское решающее правило принятия решения, так как оно является наилучшим при определении наименьшего значения средней ошибки неправильной классификации [5]. В связи с тем, что ранее мы решили не классифицировать подвижные воздушные объекты и нам неизвестны априорные вероятности наличия эталонного изображения для текущего, а также платежная матрица,

для описания качественных показателей и критериев распознавания по текущему радиолокационному портрету, воспользуемся теорией статистических решений (статистической теорией проверки гипотез) Неймана-Пирсона. В нашем случае, в соответствии с выбранной теорией, оптимальное устройство распознавания должно обладать максимальным значением вероятности правильного распознавания  $P_{\text{пр}}$  (минимальным значением вероятности пропуска распознавания  $P_{\text{лр}}$ ), при заданном значении вероятности ложного распознавания  $P_{\text{лр доп}}$ . Следовательно нам необходимо задать предельно допустимое минимальное значение вероятности ложного распознавания  $P_{\text{лр доп}}$  и при условии  $P_{\text{лр}} < P_{\text{лр доп}}$  определить порог чувствительности устройства распознавания  $y_{\text{пор}}$ , при котором обеспечивается максимальная вероятность правильного распознавания  $P_{\text{пр}}$ .

Для проверки выбранных гипотез определим вероятности перечисленных выше статистических событий. Вероятности в выражениях (3) и (4) образуют полную группу событий, что позволяет найти только две, необходимые нам вероятности  $P_{\text{пр}}$  и  $P_{\text{лр}}$ . Так как выходной сигнал  $y_{\text{вых}}$  случаен, то для нахождения вероятностей  $P_{\text{пр}}$  и  $P_{\text{лр}}$  необходимо предварительно, при проверке статистических гипотез, найти соответствующие условные плотности распределения вероятностей выходного сигнала для случая указанных двух гипотез:  $S_{\text{эл}} \neq 0$  и  $S_{\text{эл}} = 0$ . Для определения вероятности ложного распознавания  $P_{\text{лр}}$  нужно найти  $p(y_{\text{вых}} / S_{\text{эл}} = 0)$  – условную плотность распределения вероятностей  $y_{\text{вых}}$  при условии, что на выходе только потери, а эталонного изображения нет  $S_{\text{эл}} = 0$ . Для определения  $P_{\text{пр}}$  необходимо найти  $p(y_{\text{вых}} / S_{\text{эл}} \neq 0)$  – условную плотность распределения вероятностей  $y_{\text{вых}}$  при наличии эталонного изображения.

Как уже отмечалось, перечисленные выше потери не зависят друг от друга, следовательно, суммарные потери, ухудшающие качество изображений, будут распределены по нормальному закону [6]. На рисунке 1, без привязки к конкретным значениям, показаны распределения условной плотности вероятности распознавания для случая указанных двух гипотез:  $S_{\text{эл}} \neq 0$  и  $S_{\text{эл}} = 0$ , а так же уровень порога, позволяющий оценить условные вероятности правильного распознавания и ложного распознавания.

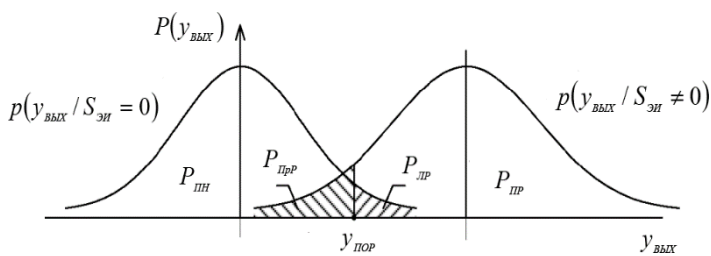


Рис. 1. Распределения условной плотности вероятности распознавания для двух гипотез:  $S_{\text{эл}} \neq 0$  и  $S_{\text{эл}} = 0$ , а также уровень порога

В соответствии с рисунком 1, условная вероятность правильного распознавания  $P_{\text{пр}}$  может быть вычислена по известным правилам теории вероятностей, как площадь под кривой

$$P_{\text{пр}} = \int_{y_{\text{пор}}}^{\infty} p(y_{\text{вых}} / S \neq 0) dy_{\text{вых}}, \quad (4)$$

а условная вероятность ложного распознавания, как

$$P_{\text{лр}} = \int_{y_{\text{пор}}}^{\infty} p(y_{\text{вых}} / S_{\text{эл}} = 0) dy_{\text{вых}}. \quad (5)$$

Вероятности  $P_{\text{пр}}$  и  $P_{\text{лр}}$ , а в конечном итоге достоверность и надежность распознавания объекта зависят от правильного выбора величины порога  $y_{\text{пор}}$ . В нашем случае, при выборе критерия Неймана-Пирсона, требуемый порог определяется однозначно, при значении

$$P_{\text{лр}} = P_{\text{лр доп}} \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что величина порога не зависит от наличия эталонного изображения и от качества текущего изображения.

### Заключение

В качестве вывода по данной работе можно отметить следующее:

- по мнению автора, процесс распознавания объектов, независимо от задач, связанных с разработкой алгоритмов, моделированием или эксплуатацией систем искусственного интеллекта, должен быть привязан к конкретному прикладному направлению;
- в материалах данной статьи процесс проверки предложенных статистических гипотез рассмотрен с позиции радиолокационного распознавания подвижных воздушных объектов, для дальнейшей работы в данном направлении;
- предложенный подход к решению задачи оптимального радиолокационного распознавания объектов на основе теории проверки статистических гипотез актуален для выбора порога в квазиоптимальных и «боевых» алгоритмах систем распознавания движущихся воздушных объектов.

### Литература

1. Авиационные системы радиовидения, под редакцией Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015.
2. Вл. Д. Мазуров. Математические методы распознавания образов. Учебное пособие 2-е издание, дополненное и переработанное. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2010.
3. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1977.
4. Чабан Л.Н. Теория и алгоритмы распознавания образов. Учебное пособие. Москва, 2004.
5. Лепский А.Е., Броневиц А.Г. Математические методы распознавания образов. Курс лекций. Таганрог, Издательство ТТИ ЮФО, 2009.
6. Монсик В.Б. Основы теории вероятностей и математической статистики. Учебное пособие. Москва, издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004.

## SOLVING THE PROBLEM OF OPTIMAL RADAR RECOGNITION OF MOBILE AERIAL OBJECTS BASED ON THE THEORY OF STATISTICAL HYPOTHESIS TESTING

*Evgenii V. Ukhanov, Moscow technical university university of communications and computer science, Moscow, Russia,  
searif@yandex.ru*

### Abstract

The materials of this article are devoted to the development of one of the main aspects of artificial intelligence systems - pattern recognition. The relevance of the materials is due to the rapid development of radar systems for various purposes and the transition in some directions from radar to radio vision [1]. Currently, much attention is paid to the development of radar systems with synthesizing the antenna aperture, for remote sensing of the earth and recognition of stationary ground objects, however, according to the author, radar recognition of mobile aerial objects is an important issue. The purpose of this article is to propose a solution to the problem of recognizing moving aerial objects by their radar portraits, based on the theory of statistical hypothesis testing. At the moment there are many methods of pattern recognition, this article discusses an algorithm that implements the function of matching the current image and the reference from a pre-formed catalog. As the current image, an azimuth-range radar portrait is considered, which is formed by super-resolution in azimuth, by synthesizing the aperture of the antenna and in range, using ultra-wideband signal. The author suggests, with a statistical approach to solving the problem of radar recognition, not to be tied to finding the probability of an object belonging to each of the pre-formed classes using a selected feature with a known probability distribution density of values, but to consider this process from the position of the signal at the output of the optimal recognition system to a specific image. A new approach to the description of probabilistic events when making a recognition decision is proposed. As a statistical classifier, it is proposed to use the Neumann-Pearson theory of statistical solutions.

**Keywords:** radar portrait, optimal recognition system, image matching, Neumann-Pearson criterion.

### References

1. Aviation Radio Vision Systems, edited by G.S. Kondratenkov, Moscow, Radio Engineering, 2015.
2. V.D. Mazurov. Mathematical methods of pattern recognition. The textbook is the 2nd edition, supplemented and revised. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2010.
3. A.L. Gorelik, V.A. Skripkin. Recognition methods. Moscow: Higher School, 1977.
4. L.N. Chaban. Theory and algorithms of pattern recognition. Study guide. Moscow, 2004.
5. A.E. Lepsky, A.G. Bronevich. Mathematical methods of pattern recognition. A course of lectures. Taganrog, Publishing House of TTI SFU, 2009.
6. V.B. Monsik. Fundamentals of probability theory and mathematical statistics. Study guide. Moscow, edition of the VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2004.

### Information about author:

*Evgenii V. Ukhanov, candidate of engineering sciences, sub-department "Telecommunications security", Moscow technical university university of communications and computer science, Moscow, Russia*