

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.13>

УДК: УДК 621.396.969.11

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОЛНОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. Кваснов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

Статья поступила в редакцию 19 октября 2021 г.

Аннотация. В статье рассматривается возможность по оценке полноты радиолокационных данных, получаемых в результате дистанционного зондирования воздушных точечных объектов. На основе теории информации анализируется область пространства признаков, обладающая наибольшей энтропией, тем самым обеспечивается максимальное «рассеяние» данных, которые могут быть применены в комплексах классификации и распознавания объектов. В статье проведено исследование траекторных (скорость, высота и скороподъемность) и сигнальных (интенсивность рассеяния – ЭПР и наличие радара цели) признаков на предмет потенциальной точности их детектирования. В качестве априорных данных используются справочная информация по различным типам и классам воздушных объектов – самолетов (крупные транспортные самолеты, среднемагистральные самолеты, бизнес-джеты, легкие моторные самолеты и т.д.). На основе имитационного моделирования установлено, что наиболее эффективными и полными признаками является оценка высоты полета ($H_h \approx 5.17 \text{ Бит}$) воздушного объекта и его скорость ($H_v \approx 4.17 \text{ Бит}$).

Ключевые слова: радиолокация, полнота данных, классификация целей, дистанционное зондирование, радиолокационная информация, точечная цель, энтропия признаков.

Abstract. In the article considers the estimation of completeness of radar data that obtained by the reflected signal from air spot targets as result of remote sensing. The feature space analyses based on information theory therefore evaluates maximum deviation data, which can be used for automatic target classification. The article demonstrates the study of trajectory (velocity, climb and height of flight) and signal (radar cross section and radar existing) features in respect of potential detected accuracy. As a priori data, reference information is used on various types and classes of air objects - aircraft (large transport aircraft, medium-haul aircraft, business jets, light motor aircraft, etc.). Modeling shows the most efficiency and completeness features are height of flight ($H_h \approx 5.17$) and velocity ($H_v \approx 4.17$) of air object. systems.

Key words: radiolocation, data completeness, target classification, remote sensing, radar information, spot target, entropy of features.

Введение.

В настоящее время дистанционное зондирование объектов на различных радиочастотах позволяет детектировать как естественные объекты атмосферы (облака, осадки, неоднородности атмосферы и т.д.), так и искусственные (самолеты, вертолеты и т.д.). Обнаружение последних является одной из основных задач радиолокации систем радиовидения [1, 2]. В рамках современных подходов задача обнаружения часто решается статистическими методами, благодаря чему выделяются специфические кинематические характеристики полета объектов (скорость, высота, скороподъемность).

Современные научные исследования дистанционного зондирования направлены в первую очередь в направлении классификации и распознавания как искусственных, так и естественных воздушных объектов [3]. В этом случае приходится принимать и обрабатывать большие массивы данных, полученные средствами радиоэлектронного мониторинга для того, чтобы выделить фактические признаки, по которым можно идентифицировать объект.

За последние десятилетия основной акцент в системах дистанционного зондирования был смещен в область распознавания и классификации объектов

на основе некоторой априорной совокупности данных (обучающей выборки). Распознавание целей осуществляется на основе так называемого синергетического эффекта, когда по ряду факторов (признаков) можно идентифицировать класс объекта. В тоже время совокупность этих признаков позволяет нам ввести понятие об обобщенной (интегральной) характеристике исследуемого объекта наблюдения. Одной из основных интегральных характеристик любого детектируемого объекта является информационная полнота сведений о нем.

Полнота информации характеризует исчерпывающие сведения об объекте (его признаках), позволяющие распознавать и классифицировать его с заданной вероятностью. Например, конвективные облака на метеорологическом локаторе будут отображаться протяженным пятном, которое имеет форму, интенсивность и так далее [4]. Полнота информационных данных также важна в контексте последнего послания В. В. Путина в своей статье: «...ключевая задача в том числе – это повышение уровня контроля за воздушным пространством» [5]. Точечные цели воздушных судов будут иметь такие признаки, как скорость полета, высота полета и т.д. Совокупность признаков образует вектор данных, который является результатом статистической обработки. Строго говоря, выборка признаков x_1, x_2, \dots, x_n может быть уточнена как результат сходимости выборочной функции распределения к её теоретическому аналогу по теореме Гливленко-Кантелли [6]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{x \in \mathbb{R}} |\bar{F}(x) - F(x)| = 0, \quad (1)$$

где $F(x)$ и $\bar{F}(x)$ – функция распределения, и выборочная функция распределения соответственно.

С другой стороны, в практических задачах мы никогда не можем получить все необходимые данные о воздушном объекте, поскольку имеем дело с ограниченным набором информации. Таким образом, аналитическое решение задачи о полноте радиолокационных данных представляется затруднительным.

Необходимы приближенные (численные) методы решения данной задачи на основе опытных данных об объектах дистанционного зондирования.

Одним из способов решения данной проблемы является применение теории информации в задачах о полноте данных. В частности, оценка энтропии по принятым (детектируемым) признакам целей. В этом случае энтропия напрямую связана с «неожиданностью» возникновения того или иного события, которое характеризует численное значение признака. Чем событие более предсказуемо, тем он менее информативно. По мере детектирования объекта информация о нем возрастает, а, следовательно, энтропия сокращается. Таким образом, зная потенциальную энтропию признаков объекта, можно уточнить верхнюю границу полноты радиолокационных данных.

Целью статьи является решение следующих теоретико-прикладных задач:

- выбор оптимальной математической модели полноты радиолокационных данных на основе теории информации;
- оценка результатов этой модели на известных тактико-технических характеристиках точечных воздушных объектов.

Основная часть.

Направление исследований по применению теории информации затронуто в ряде научных работ. В статье [7] анализируется потенциальная информативность на основе точности измерений каждой сканирующей ячейки РЛС. В работе [8] информационная полнота радиолокационных данных представлена как возможность РЛС наиболее детально освещать наземную обстановку, акцентируя влияние на отдельные артефакты местности. В области применения теории информации к задачам идентификации целей относится интересная диссертационная работа [9], в которой рассматриваются возможности по распознаванию объектов, не прибегая к выбору алгоритмов извлечения и классификации конкретных признаков. Таким образом, научная новизна данного исследования заключается в применении теории информации в рамках оценки полноты данных, используемых как условие для распознавания и

классификации радиолокационных объектов. Рассмотрим теоретическую постановку задачи.

1. Теоретическая постановка задачи.

Согласно Шеннону прирост информации эквивалентен утраченной неопределенности без учета потерь. В системы дистанционного зондирования и, в частности, РЛС освещения воздушной обстановки любой обнаруженный объект дает прирост информации, тем самым сокращает энтропию. В этом смысле для описания полноты радиолокационной информации мы должны руководствоваться принципом максимума энтропии. Данный принцип утверждает, что наиболее характерными распределениями вероятностей неопределенной среды (в нашем случае признаками объекта) являются такие распределения, которые максимизируют выбранную меру неопределенности:

$$\bar{H} = \sup_{p_i} \left\{ \sum_i p_i \log p_i \right\}, \quad (2)$$

где p_i – распределение вероятности с заданным законом; \bar{H} – максимизируемая энтропия.

Фактически значение \bar{H} эквивалентно полноте данных об объекте дистанционного зондирования, поскольку «мера незнания» в процессе мониторинга, обнаружения и исследования цели неуклонно сокращается. Когда о зондируемом объекте все известно (он распознан и классифицирован), энтропия $\bar{H} = 0$ [10]. В теории информации доказана теорема, что энтропия принимает максимальное значение на равномерном распределении

$$p_1, p_2 \dots p_n \in \text{unif}(a, b): \quad \bar{H}(p_1, p_2 \dots p_n) = \log(n), \quad (3)$$

где $p_1, p_2 \dots p_n$ – распределения соответствующих признаков для исследуемой станции дистанционного зондирования; n – количество параметров (признаков), которых восстанавливается обучающая выборка.

Любая совокупность признаков может иметь совместное распределение, которые мы должны учесть. В этом случае для существующего набора признаков

$x_i \in X$ и известного набора наблюдений $y_i \in Y$ требуется отыскать такое совместное распределение $P(X, Y)$, которое бы максимизировало информационную энтропию H обучающих данных, то есть

$$H(X, Y) = \arg \max_{i, j \in \mathbb{N}} (x_i, y_j | P(X, Y)). \quad (4)$$

Количество информации характеризует, насколько в результате опыта уменьшилась неопределённость, в то время как информационная энтропия – это количество информации, которое в среднем будет получено на одно наблюдение. Очевидно, что для энтропии обучающей выборки мы имеем:

$$H(X) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{x \in X} n(x) I(X) = - \sum_{x \in X} P(x) \log [P(x)], \quad (5)$$

где N и $n(x)$ – объем выборки и частота появления событий соответственно.

Последнее выражение объясняет предельный случай количества информации для генеральной совокупности. В реальных условиях мы имеем дело с выборочным распределением. При этом надо учитывать, что распределение формируется для различных групп признаков воздушных объектов и, следовательно, необходимо рассматривать совместное распределение и совместную энтропию обучающей выборки. Логично предположить, что совместная энтропия $H(X_1, \dots, X_n)$ будет определяться аналогично энтропии единичного случайного события, но вместо вероятности одного события будет фигурировать совместная вероятность двух событий $P(x_1, \dots, x_n)$:

$$H(X_1, \dots, X_n) = - \sum_{x \in X_1} \dots \sum_{x \in X_n} P(x_1, \dots, x_n) \log P(x_1, \dots, x_n). \quad (6)$$

Совместная энтропия рассматриваемого классификатора отражает незнание о совокупности случайных событий и обладает свойством информационной полноты [11]. При этом необходимо учитывать, что если признаки воздушных объектов коррелированы между собой, то существует условная энтропия $H(X_i | X_2, \dots, X_n)$, которая вносит коррективы в совместное распределение признаков. Мы будем предполагать, что $\forall i \exists H(X_i | X_{i-1}, \dots, X_n) = 0$.

2. Пространство признаков для классификации воздушных объектов.

Поставленные во введении задачи следует ограничить областью применения с рядом допущений. Во-первых, будем рассматривать средство дистанционного зондирования – РЛС сантиметрового диапазона ($\lambda \approx 2\text{см}$), работающее в режиме непрерывного когерентного излучения с заданной вертикальной поляризацией. Во-вторых, в качестве объектов детектирования рассматриваются точечные воздушные цели размером l_u , для которых $l_u \ll \delta R$ и $l_u \ll \delta l$, где δR и δl – элементы разрешения по дальности в радиальном и поперечном направлении на цель [12].

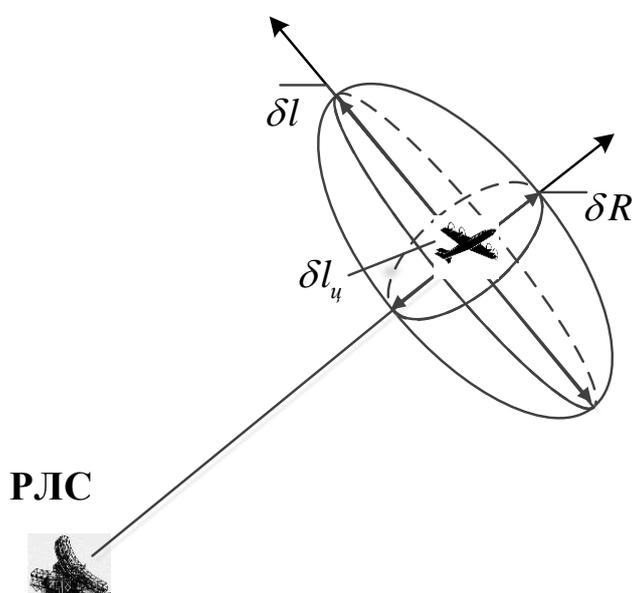


Рис. 1. Потенциальная разрешающая способность РЛС.

Задача распознавания воздушных объектов предусматривает наличие априорных признаков, которые являются инструментарием для оценки полноты радиолокационных данных. В общем случае признаки могут быть разделены на две категории [3]:

- сигнальные (ЭПР цели, характеристики «протяженной» отметки цели и т.д.);
- траекторные (скорость, высота полета, скороподъемность и т.д.).

В ряде последних зарубежных работ [13] четко прослеживается тенденция к так называемой обработке «трасса до детектирования» (TBD – track before

detect). Ее принцип базируется на аппарате математической статистики и предполагает решение задачи о построении траектории воздушной цели до момента обнаружения и верификации отметки цели. Учитывая это и тот факт, что наше исследование затрагивает точечные воздушные объекты, мы можем предложить следующий перечень признаков для распознавания точечных надводных и воздушных объектов (табл. 1.3) [3].

Таблица 1. Перечень признаков, используемых для классификации объектов.

Признак	Тип радиолокационной информации	Воздушный объект
ЭПР точечной цели	сигнальная	+
Скорость	траекторная	+
Ускорение (маневрирование)	траекторная	+
Практический Потолок	траекторная	+
Количество ИРИ	сигнальная	-

Учитывая современные возможности по расчету и имитационному моделированию воздушной обстановки, обработка и выявление данных согласно табл. 2 не является существенной проблемой. Кроме того, этот список может быть расширен за счет анализа радиотехнической информации, если исследуемый объект осуществляет периодическое сканирование пространства активными средствами РЛС с заданной несущей частотой, длительностью импульсов и т.д. [14, 15]. Рассмотрим каждый из представленных признаков.

2.1. Сигнальные признаки детектируемого воздушного объекта.

1 – ЭПР точечной цели. ЭПР является количественной мерой свойства объекта рассеивать электромагнитную волну. Ввиду того, что экспериментальная оценка ЭПР является сложной задачей, зависящей от множества различных факторов [16], мы будем использовать теоретическую модель поверхностного металлизированного цилиндрического объекта,

аппроксимирующего самолет «классической» компоновки и расположенного в условиях дальней зоны рассеивателя (см. рис. 3).

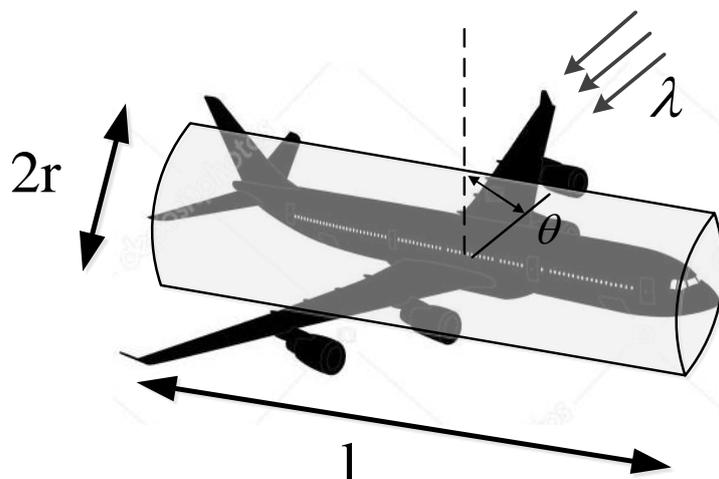


Рис. 2. Аппроксимация воздушного объекта цилиндрической поверхностью.

Длина «идеализированного» цилиндра представляет собой фюзеляж самолета, а радиус описывает усредненное значение размаха крыльев и ширины фюзеляжа. Отношение размаха крыльев к радиусу воображаемого цилиндра соотносится как $\frac{1}{4}$ (рис. 1.4) [16]. Феноменологическая модель в этом случае может быть представлена согласно выражению, приведенному в табл. 2.

Таблица 2. Феноменологическая модель рассеяния на цилиндрической поверхности.

	$S_0(\theta) = \left(\frac{2\pi r l^2}{\lambda} \right) \times \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta) \right)}{\frac{2\pi l}{\lambda} \cos(\theta)} \right]^2 \sin(\theta)$
--	---

В проводимом исследовании было установлено, что более простая эвристическая модель основана на рассеивающем эллипсоиде при условии ослабления сигнала по напряженности электрического поля на величину -43дБ [17]:

$$E(-43\text{дБ}) \sim \frac{4}{3}\pi \times w \cdot l \cdot h, \quad (7)$$

где w – размах крыльев АДЦ (использовалась половина длины крыла как усредненная ширина исследуемого «идеализированного» эллипсоида); l – длина фюзеляжа; h – высота АДЦ.

При этом распределение интенсивности рассеяния было рассчитано для выборки δ (446 наблюдений; 29 классов). Гистограмма рассеяния приведена на рис. 3.

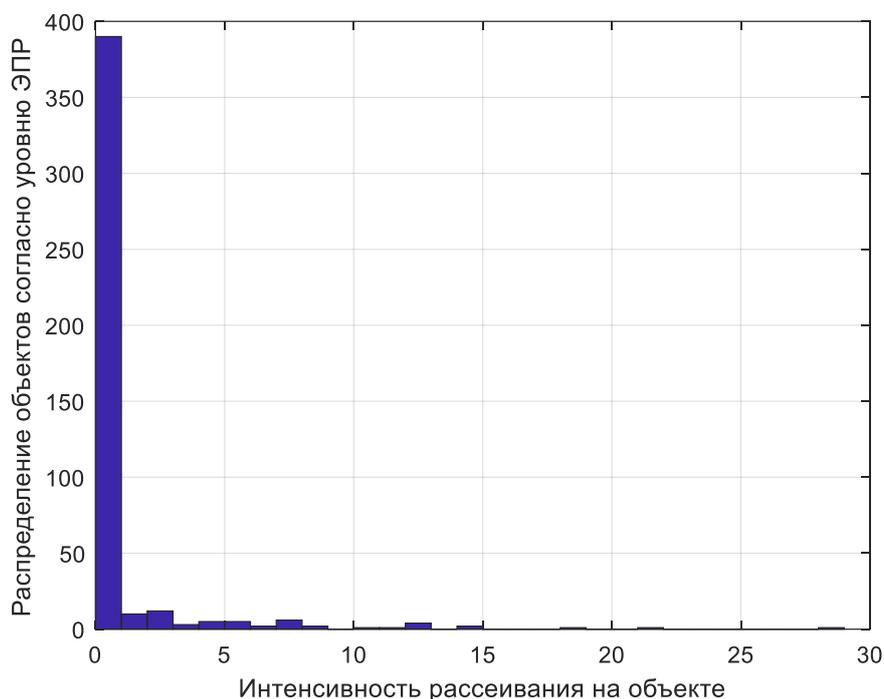


Рис. 3. Гистограмма рассеяния объектов для различных уровней ЭРП цели с ослаблением -43 дБ, аппроксимированной цилиндрической поверхностью.

Из рисунка, что один класс преобладает над остальными. Это обосновывает положение о сложности разделения целей по интенсивности рассеяния сигнала (ЭПР цели). Необходимы потенциально более точные средства дистанционного зондирования.

– Наличие РЛС в составе детектируемого объекта. Поскольку в большинстве случаев дистанционное зондирование объектов предполагает использование станций на борту детектируемого судна как средство «запрос - ответ», мы введем признак наличия станции активной радиолокации:

$$X_{i=1}^n : n \in \{0,1\}, \quad (8)$$

где X – соответствующий признак наличия РЛС.

В данном исследовании база данных воздушных судов состояла из $\delta(467$ наблюдений; 2 класса). Каждый объект классифицировался по наличию (отсутствию) РЛС на борту.

2.2. Траекторные (кинематические) признаки движения точечного воздушного объекта.

Анализ полета точечного воздушного объекта предполагает, что мы рассматриваем его продольный участок, где исключены резкие маневры в вертикальной плоскости, изменение эшелона, приземление и набор высоты. Таким образом, типовые модели движения самолетов предусматривают оценку следующих признаков:

1 – скорости $V(v)$ как функция распределения относительно 0.9 максимальной скорости:

$$V(v) = \Phi\left(\frac{v_{\max} - \bar{v}}{\sigma_v}\right), \quad (9)$$

где v_{\max} и \bar{v} – максимальная и средняя (крейсерская) скорость воздушного объекта; $\Phi(\bullet)$ – функция распределения скорости; σ_v – СКО скорости аэродинамического объекта.

Результаты моделирования проводились для выборки $\delta(487$ наблюдений; 18 классов). И приведены на рис. 4.

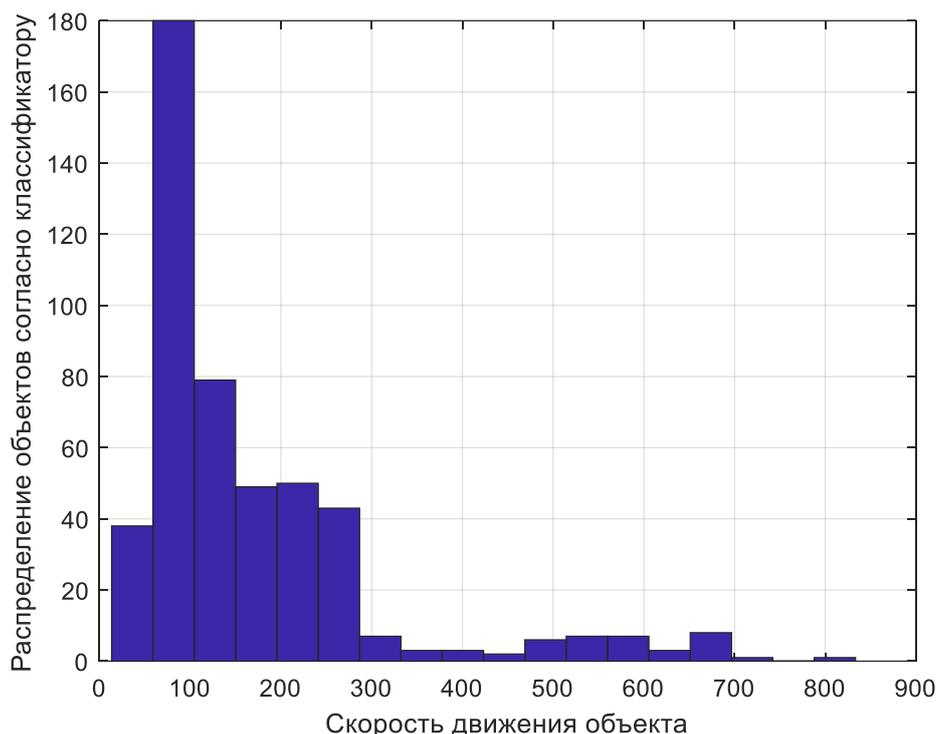


Рис. 4. Гистограмма распределения скорости полета объектов для потенциальной точности детектирования 44 м/с (4 СКО или 95%).

Классификация объектов по скорости может быть осуществлена не менее чем для 6 различных классов целей, так как в этом случае 95% объектов приходится на диапазон скоростей 60 – 140 м/с.

2 – высоты полета объекта $H(h)$, рассчитанную как функцию закона распределения согласно [12]:

$$H(h) = \Phi\left(\frac{h_{\max} - \bar{h}}{\sigma_h}\right), \quad (10)$$

где h_{\max} и \bar{h} – практический потолок и реальная высота полета объекта; $\Phi(\cdot)$ – функция распределения высоты полета согласно эмпирическому закону; σ_h – СКО полета аэродинамического объекта.

Результаты моделирования проводились для выборки $\delta(392$ наблюдений; 36 классов) и приведены на рис. 5.

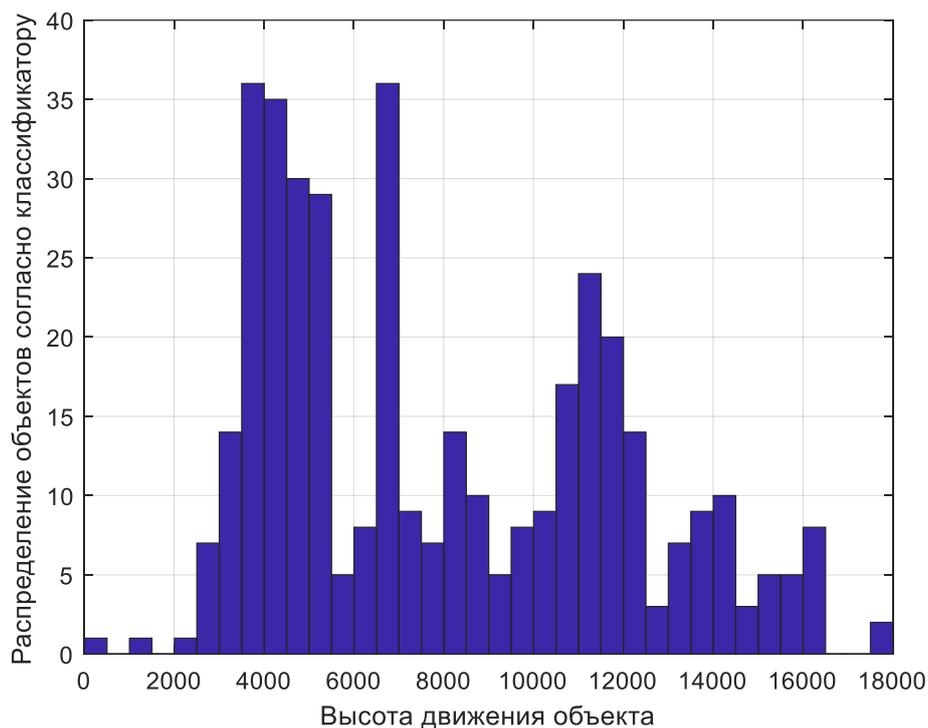


Рис. 5. Гистограмма распределения высоты полета объектов для потенциальной точности детектирования 488 м (4 СКО или 95%).

Рисунок демонстрирует, что высота полета – наиболее «выгодный» признак для распознавания объектов и наиболее полно может описывать различные классы воздушных объектов по их пребыванию на тех или иных эшелонах.

– оценка скороподъемности (ускорения) воздушного судна $C(a)$ [18]:

$$C(a|v, \sigma_v^2) = \frac{1}{\sigma_v} \Phi\left(\frac{a - \bar{a}}{\sigma_v}\right), \quad (11)$$

где v, σ_v^2 – скорость и СКО скорости отслеживаемого объекта, соответственно; $\Phi(\cdot)$ – функция распределения вероятности для скороподъемности.

Функция распределения вероятности скороподъемности оценивалась по эмпирическим данным с объемом обучающей выборки δ (390 наблюдений; 21 класс) (рис. 6).

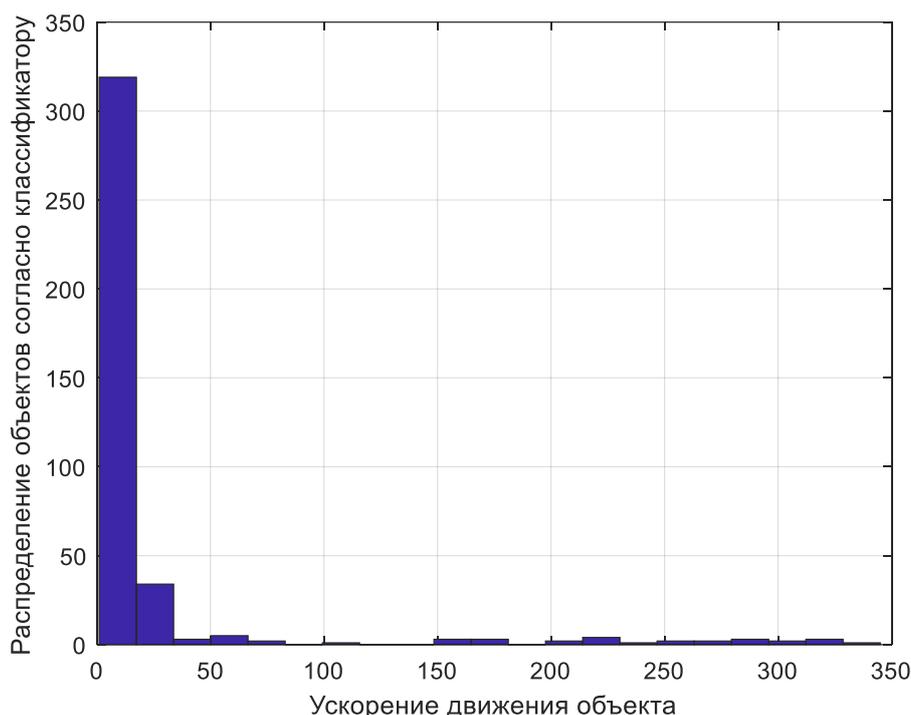


Рис. 6. Гистограмма распределения ускорения полета объектов для потенциальной точности детектирования 16 м/с (4 СКО или 95%).

Согласно рисунку, только два класса могут быть использованы как потенциально сепарабельные. Остальные класс составляют менее 5% от общей суммы точечных воздушных объектов.

Таким образом, общий перечень возможных признаков, которые могут быть использованы для классификации, не превышает 5 классов. Большинство из них описывается законом распределения, не соответствующим равномерному закону, а, следовательно, потенциальная энтропия согласно (3) будет меньше максимально возможно согласно.

3. Моделирование и оценка результатов полноты радиолокационных данных.

Для моделирования информационной полноты по воздушным объектам использовалась общая обучающая выборка, содержащая $\delta(526 \text{ наблюдений}; 5 \text{ признаков})$ из источника [19], содержащего различные классы самолетов (крупные транспортные, среднемагистральные, бизнес-джеты,

легкие моторные и т.д.). Траекторные параметры принимались к анализу из условия того, что их оценка несмещенная и состоятельная.

Результаты исследований показали, что коррелированность между признаками минимальна. По этой причине совместная энтропия (6) признаков может быть упрощена и использовано выражение (5). Значение энтропии каждого признака будет меньше потенциально возможной, полученной для равномерного закона распределения. Результаты моделирования информационной полноты данных по точечным целям с учетом известных кинематических и сигнальных признаков представлены в табл. 3.

Таблица 3. Информационная полнота для рассматриваемых признаков.

	Верифицированная выборка (количество возможных классов)	Верифицированная выборка Энтропия	Предельное значение энтропии
ЭПР цели	29	2.57	4.86
Скорость	18	3.53	4.17
Скороподъёмность	21	2.67	4.39
Высота	36	3.89	5.17
Наличие радара	2	0.92	1

Согласно таблице признаком, который наиболее полно описывает пространство состояний, следует признать высоты полета $H_h \approx 5.17 \text{ Бит}$. Признак «Наличие радара» – менее информативный $H_R \approx 0.91 \text{ Бит}$. Очевидно, что потенциально пространство признаков следует выбирать из кинематических (траекторных) признаков, поскольку они обладают более существенной полнотой данных. Признаки «Скорость» и «Высота» имеют наиболее равномерно-распределенные классы, а, следовательно, более выгодны в качестве исходных данных классификатора.

Заключение.

В статье проведено исследование по оценке полноты радиолокационных данных, которые принимаются системой дистанционного зондирования (РЛС)

на основе когерентного непрерывного излучения сигнала. Наиболее характерными признаками, детектируемыми и обрабатываемыми РЛС, являются траекторные (высота полета, скорость и скороподъемность) и сигнальные (ЭПР цели, наличие радара).

В качестве математического аппарата исследования была выбрана теория информации, позволяющая оценить меру неопределенности данных (энтропии), тем самым оценить их рассеяние и продемонстрировать уникальность принимаемой отметки цели в задачах распознавания и классификации объектов.

Используя справочные данные по различным типам точечных воздушных целей (крупные транспортные самолеты, среднемагистральные самолеты, бизнес-джеты, легкие моторные самолеты и т.д.), было проведено имитационное моделирование, показавшее, что энтропия признаков «Высота» и «Скорость» наибольшая. В системах распознавания эти признаки должны в первую очередь быть использованы для идентификации целей.

Литература

1. Gini F., Rangaswamy M. *Knowledge based radar detection, tracking, and classification*. A Wiley-Interscience publication. 2008. 288 p.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. *Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли*. Москва, Радиотехника. 2005. 368 с.
3. Кваснов А.В. *Интеллектуальная обработка радиолокационной информации*. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2021. 352 с. <https://doi.org/10.25313/radar-information>
4. Ryzhkov A.V., Zrnic D.S. *Radar Polarimetry for Weather Observations*. Springer. 2019. 497 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05093-1>
5. Путин В.В. Об историческом единстве русских и украинцев [онлайн]. *Президент России*. Дата обращения: 15.10.2021. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/66181>

6. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика: классификация и снижение размерности*. Москва, Финансы и статистика. 1989. 608 с.
7. Ничипоренко Н.Т., Сиваченко Б.Н. Сравнительный анализ потенциальной информационной ёмкости береговых и судовых радиолокационных станций. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2017. Т.9. №2. С.380-389.
8. Жегалов А.Н. Актуальность и полнота радиолокационных данных как прагматические характеристики космических систем дистанционного зондирования Земли. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т.6. №1. С.151-159.
9. Cilliers J.E. *Information Theoretic Limits on Non-cooperative Airborne Target Recognition by Means of Radar Sensors*. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University College London. 2018.
10. Кудряшов Б.Д. *Теория информации: учебник для вузов*. Санкт-Петербург, Питер. 2009. 320 с.
11. Энтропия. Количественная мера информации. Основные свойства энтропии [онлайн]. *iMath Wiki*. Дата обращения: 06.09.2021. URL: <https://wiki.livid.pp.ru/students/inth/lectures/4.html>
12. Кваснов А.В. Оценка построения трассы радиолокационной цели неподвижным лучом АФАР в дальней зоне наблюдения. *Радиотехника*. 2017. №2. С.4-12.
13. Bi X., Du J., Zhang Q., Wang W. Improved multi-target radar TBD algorithm. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2015. V.6. №26. P.1229-1235. <https://doi.org/10.1109/JSEE.2015.00135>
14. Kvasnov A.V. Methodology of classification and recognition of the radar emission sources based on Bayesian programming. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2020. V.14. №8. P.1175-1182. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0380>

15. Кваснов А.В. Применения байесовского программирования в задачах распознавания и классификации источников радиоизлучения. *Радиотехника*. 2020. Т.84. №3(5). С.5-14. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202003\(05\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202003(05)-01)
16. Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*. Москва, Радиотехника. 2004. 320 с.
17. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы СТЕЛС-технологий. *Вестник РАН*. 2003. Т.73. №9. С.779-787.
18. Кваснов А.В., Гладилин П.Е., Першуткин А.Э. Методика распознавания неподвижных групповых объектов по радиолокационному изображению на основе искусственных нейронных сетей. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2020. Т.74. №8. С.63-71. <https://doi.org/10.18127/j20700784-202008-07>
19. Paul Jackson. *Jane's All the World's Aircraft 2004-2005*. Jane's Information Group Limited. 2004. 861 p.
20. Visentin T. *Polarimetric Radar for Automotive Applications*. PhD thesis. Karlsruhe Technology Institute. 2019. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000090003>

Для цитирования:

Кваснов А.В. Исследование информационной полноты радиолокационных данных в задачах классификации точечных воздушных объектов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.11.13>