

Обоснование статистических параметров радиосигналов для идентификации объекта

С. В. Стрельников, *д. т. н.*, orionsvs@mail.ru

АО «НПО «Орион»», г. Москва, Российская Федерация

А. Г. Шаблинский, *к. в. н.*, orionsvs@mail.ru

Центральный морской полигон МО РФ, г. Северодвинск, Российская Федерация

Р. В. Яковец, orionsvs@mail.ru

Центральный морской полигон МО РФ, г. Северодвинск, Российская Федерация

С. Н. Бирюлин, orionsvs@mail.ru

Центральный морской полигон МО РФ, г. Северодвинск, Российская Федерация

Аннотация. В статье проведена оценка возможности идентификации морских объектов путем численной обработки значений сигналов радиоизлучающих средств, установленных на судах для обеспечения безопасности судоходства. Рассмотрена возможность идентификации при условии, что при обработке выборок регистрируемых сигналов системы автоматической идентификации судов могут быть обнаружены числовые параметры сигналов, характерные для радиоизлучающего средства. Такие параметры названы в статье характеристическими параметрами.

Предложены характеристические параметры выборок для случая, когда временной ряд сигналов содержит случайную составляющую во времени регистрации сигнала аппаратурой наблюдения. В качестве характеристических параметров предложено использовать 28 числовых параметров, рассчитываемых методами математической статистики. Представлена апробация возможности их использования, проведенная на выборках сигналов, полученных при натуральных наблюдениях. Показано, что предложенный набор параметров имеет свойства и признаки, позволяющие различать неоднородные выборки регистрируемых сигналов и обнаруживать таким образом появление новых морских объектов, а также использовать предложенный набор для формирования автоматизированного алгоритма оценки близости векторов характеристических параметров, вычисленных по различным выборкам регистрируемых сигналов.

Ключевые слова: статистические характеристики случайных величин, неоднородные выборки, идентификация морского объекта, кумулятивный анализ, нормированный кумулянт, коэффициент корреляции Пирсона

Substantiation of Statistical Parameters of Radio Signals for Object Identification

S. V. Strelnikov, *Dr. Sci. (Engineering)*, orionsvs@mail.ru

Joint-Stock Company "Scientific and Production Association "Orion", Moscow, Russian Federation

A. G. Shablinskij, *Cand. Sci. (Engineering)*, orionsvs@mail.ru

State Central Navy Testing Range, Ministry of Defense, Severodvinsk, Russian Federation

R. V. Jakovets, orionsvs@mail.ru

State Central Navy Testing Range, Ministry of Defense, Severodvinsk, Russian Federation

S. N. Birjulin, orionsvs@mail.ru

State Central Navy Testing Range, Ministry of Defense, Severodvinsk, Russian Federation

Abstract. The article assesses the possibility of identifying offshore objects by numerical processing of the values of signals from radio-emitting devices installed on ships to ensure the safety of navigation. The possibility of identification is considered, provided that the numerical parameters of the signals characteristic of the radio-emitting device can be detected during the processing of the samples of the registered signals of the automatic vessel identification system. Such parameters are called characteristic parameters in the article.

The characteristic parameters of samples are proposed for the case when the time series of signals contains a random component in the time of signal registration by the observation equipment. It is proposed to use 28 numerical parameters calculated by methods of mathematical statistics as characteristic parameters. The approbation of the possibility of their use is presented, carried out on samples of signals obtained during field observations. It is shown that the proposed set of parameters has properties and features that make it possible to distinguish between heterogeneous samples of recorded signals and detect the new marine objects in this way, as well as to use the proposed set to form an automated algorithm for assessing the proximity of vectors of characteristic parameters calculated from different samples of recorded signals.

Keywords: characteristic parameters, heterogeneous samples, identification of a marine object, Minkowski metric, cumulative analysis, normalized cumulant, Pearson's equation

Введение

В статье проведена оценка возможности решения задачи идентификации морских объектов по излучаемым радиосигналам системы автоматической идентификации судов, регистрируемых космическими средствами наблюдения. Оценка основана на результатах обработки натуральных экспериментов. Представлены некоторые итоги поисковых исследований возможности применения методов математической статистики для нахождения параметров радиосигналов, пригодных для идентификации объектов.

В настоящее время для изучения свойств и идентификации сложных динамических систем при экспериментальных исследованиях широко используются подходы, связанные с анализом сигналов, производимых системой [1–3]. Такие подходы особенно актуальны в тех случаях, когда отсутствует модель поведения системы, но в распоряжении имеются значения некоторых характерных для системы наблюдаемых сигналов. Анализ и идентификация системы по экспериментальным результатам в ряде таких случаев могут быть проведены посредством численной обработки сигналов, регистрируемых при наблюдении.

Пусть бортовая аппаратура космического аппарата (КА) регистрирует сигналы радиоизлучающих средств, установленных на морских объектах. При этом наблюдаемые сигналы имеют один или несколько характерных параметров, свойственных и уникальных для каждого радиоизлучающего средства и, как следствие, характерных для каждого морского объекта. Предположим, что регистрирующей аппаратурой получено несколько выборок сигналов и численным методом рассчитаны характерные параметры каждой выборки, соответствующие каждому радиоизлучающему средству. Регистрация новой выборки сигналов диктует необходимость решения следующей актуальной задачи: *относится ли вновь полученная выборка к радиоизлучающему средству, сигналы которого уже были зарегистрированы и обработаны, либо новая выборка относится к новому радиоизлучающему средству, к новому объекту*. Для решения задачи необходимо обосновать численные параметры наблюдаемых сигналов, использование которых

позволит выявить свойственные средству параметры и таким образом идентифицировать морской объект.

При эксплуатации космических систем наблюдения такая задача возникает, например, в случае обработки сигналов автоматической системы идентификации судов, предназначенной для обеспечения безопасности судоходства, при слабом уровне сигналов, препятствующем декодированию, искажении, коллизии принятых сигналов при одновременном приеме на борту КА нескольких близких по структуре и мощности сигналов, излучаемых разными судами. Изучение неблагоприятных ситуаций, препятствующих корректному декодированию сигналов, принятых бортовой аппаратурой КА, показало возможность выявления в ряде случаев методами математической статистики параметров принятых сигналов, характерных для определенного морского судна или ограниченной группы судов.

Согласно процедуре обмена информацией для автоматической системы идентификации судов определены интервалы между сообщениями, передаваемыми судовой аппаратурой. Так, при скорости судна более 14 узлов и смене курса номинальный интервал передачи сообщений составляет 2 с [4]. На практике интервалы излучения различных судов отличаются в связи с различием параметров судовой радиоизлучающей аппаратуры, в частности используемых стандартов частоты. Именно отличие интервалов между сообщениями используется для решения изложенной в статье актуальной задачи. При этом рассмотрен подход, основанный на статистической обработке наблюдаемых сигналов с использованием методов, применяемых при анализе временных рядов. В статье под временным рядом понимается последовательность упорядоченных во времени значений сигнала, регистрируемого бортовой аппаратурой КА и характеризующего радиоизлучающее средство морского объекта, подлежащего идентификации.

Исследование временных рядов базируется на идее использования векторов времен регистрации наблюдаемого сигнала или интервалов времени между последовательными поступлениями сигнала: $z_i = [x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{ni}]$, где z_i — вектор с порядковым номером, x_{ji} — значение времени или интервала, ni — размерность вектора z_i .

Вектор z_i будем называть выборкой наблюдаемых сигналов. Элементы вектора имеют случайную составляющую, при этом закон распределения ее неизвестен. Подход, применяемый в статье к анализу временных рядов, обоснован в научных работах [5, 6].

Физические процессы, изучаемые на основе такого подхода в большинстве опубликованных работ, затрагивают преимущественно процессы в экономических и социальных системах. Отсутствуют публикации, связанные с исследованием особенностей временных рядов сигналов радиоизлучающих средств. Однако из опубликованных научных работ видно, что анализ динамической системы по временным рядам имеет близкий перечень проблемных вопросов для любых систем, в том числе технических.

Так, первоочередной задачей идентификации динамической системы по анализу наблюдаемых сигналов и порождаемых ими временных рядов является поиск ответа на вопрос о размерности вложения — минимальном количестве параметров, однозначно описывающих наблюдаемый процесс и характеризующих систему, и наборе таких параметров.

Возможный вариант решения именно этой приоритетной задачи — обоснования набора параметров, необходимых для идентификации морского объекта, предложен в статье.

Постановка задачи

Одним из основных процессов при идентификации объектов является проверка однородности независимых результатов наблюдений, содержащихся в различных выборках. Понятие «однородность, т. е. отсутствие различия, может быть сформулировано в терминах математической статистики различными способами. Наивысшая степень однородности достигается, если обе выборки взяты из одной и той же *генеральной совокупности*, т. е. справедлива нулевая гипотеза: $H_0: F(x) = G(x)$ при всех x . Отсутствие однородности означает, что верна альтернативная гипотеза, согласно которой $H_1: F(x) \neq G(x)$, хотя бы при одном значении аргумента» [7, 8]. Следуя работе [9], изложим задачу проверки однородности двух выборок следую-

щим образом. Допустим, по результатам наблюдения за двумя объектами получена выборка z_1 значений некоторой числовой случайной величины x_{j1} с неизвестной функцией распределения $F(x)$, а результатом наблюдения за другим объектом — выборка z_2 другой случайной величины x_{j2} с известной функцией распределения $G(x)$. При этом, во-первых, обе выборки являются результатом измерений одной физической величины, во-вторых, они являются независимыми и равнозначными.

Если подтверждена и принята гипотеза H_0 , то выборки можно объединить в одну, а объекты считать идентичными.

Задача идентификации объекта по выборкам свойственных им сигналов может быть сведена к задаче идентификации закона распределения наблюдаемых случайных величин. Применяемый в настоящей статье подход к оценке принадлежности полученных выборок одному закону распределения предусматривает проверку совпадения ограниченного числа некоторых статистических характеристик случайных величин, рассчитанных по различным выборкам. К числу таких характеристик могут относиться, например, математическое ожидание, дисперсия, другие выборочные начальные и центральные моменты. Эти характеристики в дальнейшем будем называть характеристическими параметрами (ХП).

Такой подход особенно удобен при значительной разнице размеров полученных выборок, а также при отсутствии априорных данных о законах распределения случайных величин. Для проверки однородности выборок нет необходимости выдвигать и оценивать гипотезы о законах распределения случайных величин. Достаточно воспользоваться ограниченным набором рассчитанных характеристических параметров [8–10].

Сформулируем постановку задачи, рассматриваемой в статье, с учетом введенных терминов. Пусть несколько различных морских объектов излучают радиосигналы. Бортовой аппаратурой КА зарегистрировано N выборок наблюдаемого радиосигнала z_i , $i = 1(1)N$, являющихся результатом измерения величины одной и той же физической природы. Каждая выборка содержит сигналы только одного морского объекта. Интервал времени между двумя значениями сигнала является

случайной величиной с неизвестной функцией распределения $F(x)$. Измерения интервала являются независимыми и равноточными. Пусть существует набор характеристических параметров в виде вектора $[p_1, \dots, p_k]^T$ размерности k , определенный на выборке z_i , свойственный сигналам только одного объекта.

Необходимо обосновать размерность вектора $[p_1, \dots, p_k]^T$ и вид ХП p_1, \dots, p_k , свойственных морскому объекту и рассчитываемых методами математической статистики по выборкам наблюдаемых сигналов, использование которых позволяет идентифицировать объект.

Наличие такого вектора параметров позволяет свести задачу идентификации объекта к задаче оценки близости различных векторов ХП, вычисленных при обработке различных выборок, получаемых при наблюдении. Тогда способ идентификации объекта (или группы объектов) предусматривает решение совокупности трех последовательных задач поискового исследования:

- 1) обоснование вектора ХП, свойственных объекту (или группе объектов), и алгоритма их вычисления;
- 2) обоснование мер близости различных векторов ХП;
- 3) формирование автоматизированного алгоритма оценки близости различных выборочных векторов ХП.

Статья содержит предложение по решению только первой задачи. Варианты решения второй и третьей задач планируется рассмотреть в дальнейших публикациях.

Решение задачи

Поиск и обоснование набора ХП проведены путем экспериментальной апробации возможности использования различных статистических параметров, значения которых могут быть получены при обработке результатов натуральных наблюдений.

Искомые параметры должны удовлетворять таким требованиям, как слабая зависимость от разраза выборки и умеренная вариабельность.

При апробации целесообразности применения в качестве ХП, отвечающим изложенным выше требованиям, рассмотрены:

- выборочные центральные моменты случайной величины;
- нормированные выборочные центральные моменты;
- кумулянты четного порядка;
- коэффициенты вариации, эксцесса, уравнения Пирсона.

Выборочные центральные моменты случайной величины вычислены по формуле

$$a_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a_0)^s, \quad s = 2, 3, \dots, \quad (1)$$

где a_0 — оценка математического ожидания.

Использование выборочных центральных, а не начальных моментов в качестве ХП обусловлено тем, что наблюдаемые случайные величины могут быть искажены систематической погрешностью. Использование оценки математического ожидания при вычислении ХП позволяет ее исключить. Таким образом, применение центральных моментов обеспечивает независимость характеристических параметров от систематической погрешности и в итоге — устойчивость результатов вычисления [10].

Для расчета нормированных выборочных центральных моментов случайной величины использована метрика (расстояние) Г. Минковского [11, с. 700, 12], согласно которой они вычислены по формуле

$$b_s = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (x_i - a_0)^s \right]^{\frac{1}{s}}, \quad s = 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где s — показатель Минковского.

Так же, как и выборочные моменты, кумулянты (семиинварианты) являются характеристиками распределения случайной величины. Они соответствуют коэффициентам разложения характеристической функции закона распределения в степенной ряд. Особенности использования кумулянтов в задаче идентификации рассмотрены в ряде научных работ [13–17]. Достоинствами их применения являются:

- четко выраженный самостоятельный статистический смысл и возможность использования вне зависимости от вида закона распределения;

– конечному набору кумулянтов всегда соответствует некоторая вещественная функция, аппроксимирующая вероятностное распределение [14, 17];

– применение кумулянтов высших порядков позволяет учесть отличие закона распределения случайной величины от гауссовского закона.

Набор кумулянтов может служить тождественным представлением закона распределения. Вычисления кумулянтов проведены по формулам [13]:

$$w_4 = a_4 - 3a_2^2, \quad w_5 = a_5 - 10a_2a_3, \\ w_6 = a_6 - 15a_2a_4 - 10a_3^2 + 30a_2^3.$$

Для расчета коэффициентов вариации, эксцесса использованы формулы:

- коэффициент вариации — $c_V = \frac{\sigma}{a_0} 100\%$,
- коэффициент эксцесса — $E = \frac{a_4}{\sigma^4} - 3$,

где σ — среднеквадратическое отклонение.

Коэффициент уравнения Пирсона вычисляется по формуле [18]

$$C_p = \frac{\mu_6}{a_2^3} - \frac{25\mu_4}{a_2^2} + 30.$$

Проведены исследования возможности применения указанных выше численных параметров различных степеней и порядков и их комбинаций при анализе наблюдаемых выборок сигналов, зарегистрированных при натурных наблюдениях. Численные исследования показали, что для исследуемой случайной величины порядок абсолютных величин моментов, вычисленных по формуле (1) и соответствующих различным степеням $s = 2, 3, \dots$, может отличаться на несколько порядков. Существенное отличие абсолютных величин неудобно при анализе. Нормированные выборочные центральные моменты b_s таким недостатком не обладают.

В ходе исследования проведена оценка возможности использования рассмотренных численных параметров для выявления взаимного отличия выборок, соответствующих разным радиоизлучающим средствам. В соответствии с анализом результатов обработки большого количества выборок радиосигналов, зарегистрированных при проведении экспериментальных исследований, предложено для идентификации морского объекта по радиосигналам, имеющим случайную составляющую и наблю-

даемым бортовой аппаратурой КА, применять следующий набор 28 характеристических параметров:

- 1) математическое ожидание;
- 2) дисперсия;
- 3) среднелинейное абсолютное отклонение;
- 4) нормированный выборочный центральный момент 4-го порядка;
- 5) нормированный выборочный центральный момент 6-го порядка;
- ...
- 22) нормированный выборочный центральный момент 40-го порядка;
- 23) нормированный кумулянт 4-го порядка;
- 24) нормированный кумулянт 5-го порядка;
- 25) нормированный кумулянт 6-го порядка;
- 26) коэффициент вариации;
- 27) коэффициент эксцесса;
- 28) коэффициент уравнения Пирсона.

Результаты численного исследования

Проведена регистрация сигналов автоматической идентификации судов, используемых для обеспечения безопасности судоходства, излучаемых пятью различными судами. Регистрируемые сигналы являются сигналами одной физической величины и относятся к передатчикам одного типа. Выборки параметров сигналов записаны в виде временных рядов. Случайными величинами являются интервалы между временами регистрации сигналов аппаратурой наблюдения. Получены 5 выборок случайных величин размерности 94, 113, 70, 175, 58, соответствующих различным судам.

Значения ХП, согласно номерам, указанным в наборе 28 параметров, рассчитанные при обработке результатов наблюдения, представлены в таблице.

Графически значения ХП в зависимости от номера параметра в наборе (в таблице) приведены на рисунке. Номера рядов на рисунке соответствуют номерам выборок в таблице.

Из анализа значений предложенного набора ХП получены следующие выводы.

Таблица. Значения характеристических параметров

Номер параметра	Номер выборки				
	1 (ряд 1)	2 (ряд 2)	3 (ряд 3)	4 (ряд 4)	5 (ряд 5)
1	13,338	13,373	13,313	13,399	13,371
2	25,416	27,621	53,484	21,679	12,046
3	43,535	45,687	46,671	39,956	29,314
4	58,099	60,332	61,281	54,781	42,196
5	62,837	65,088	66,392	61,870	47,852
6	66,051	68,286	69,925	69,369	52,071
7	68,422	70,631	75,523	76,640	55,281
8	70,269	72,454	74,519	82,876	57,772
9	71,763	73,933	76,104	87,950	59,748
10	73,007	75,169	77,398	92,049	61,347
11	74,062	76,228	78,478	95,396	62,663
12	74,974	77,150	79,395	100,499	63,764
13	75,770	77,967	80,187	102,484	64,697
14	76,475	78,697	80,879	104,195	65,497
15	77,103	79,358	81,491	105,784	66,191
16	77,668	79,358	82,036	106,991	66,698
17	78,180	79,959	82,526	109,180	67,333
18	78,647	80,510	82,969	106,991	67,808
19	79,074	81,018	83,371	108,149	68,233
20	79,467	81,488	83,740	109,106	68,808
21	79,831	81,925	84,078	110,940	68,961
22	80,168	82,332	84,390	111,697	69,276
23	50,414	82,712	53,484	46,561	34,707
24	53,012	52,615	56,677	47,396	32,422
25	69,794	73,382	74,940	63,493	41,937
26	12,226	12,539	12,610	10,737	7,616
27	37,798	39,299	40,178	34,749	25,957
28	10,685	10,044	9,815	12,652	10,092

1. Размер минимальной исходной выборки сигналов, по которой целесообразно рассчитывать ХП, должен быть не менее 40 элементов.

2. Абсолютные значения параметров для всех выборок сигналов отличаются друг от друга, за исключением параметра с номером 1 — математического ожидания интервалов времени излучения сигналов.

Близкие значения математического ожидания всех выборок сигналов косвенно подтверждают принадлежность наблюдаемых сигналов радиоизлучающим средствам одного типа. Математическое ожидание означает среднее время интервалов между сигналами, которое при изготовлении аппаратуры одного типа должно отвечать установленному стандарту, единому для средств одного типа. Так как значения математических ожиданий всех выборок отличаются незначительно, следует предположить, что сигналы относятся к однотипным средствам излучения.

3. Выборки 1–4 являются умеренно переменными, так как значения коэффициента вариации как меры относительного разброса случайной величины составляют от 10,7 до 12,6%. Выборка 5 незначительно переменна с коэффициентом вариации 7,6%.

4. Величины параметров предложенного набора с одинаковыми номерами, соответствующие разным выборкам сигналов, как правило, имеют отличия. Даже если по некоторым номерам параметров каких-либо выборок отличия невелики, существуют номера параметров тех же выборок, где отличия существенны.

5. Разность абсолютных значений некоторых характеристических параметров с равными номерами, но относящихся к двум разным выборкам, является небольшой величиной для части параметров двух сравниваемых выборок. Из таблицы и рисунка видно, что доля параметров, соответствующих любым двум выборкам, но имеющих близкую разность значений, составляет около 60% всех параметров. Так, например, разность значений параметров с номерами от 4 до 22 составляет около 10–15 единиц для разностей первой и пятой выборок; около 12–18 единиц для разностей 3-й и 5-й выборок. Такие близкие значения разности параметров разных выборок, свойственные одновременно большому количеству предложенных параметров, могут рассматриваться как важный устойчивый признак, позволяющий распознать неоднородные выборки

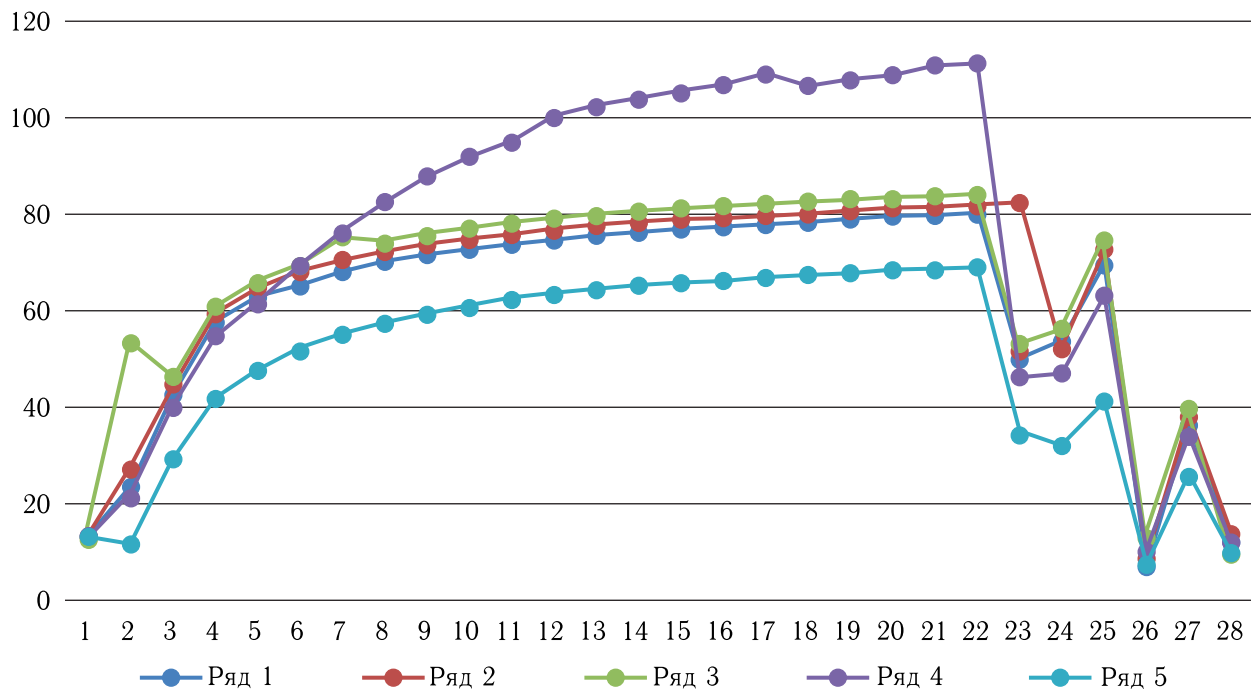


Рисунок. Значения характеристических параметров

случайных сигналов и выявить новые радиоизлучающие средства.

6. Вычисленные векторы значений предложенного набора характеристических параметров для рассмотренных пяти выборок отличаются. Из дополнительных сведений известно, что исследуемые выборки принадлежат разным радиоизлучающим средствам. Отличие векторов выборочных характеристических параметров подтверждает возможность использования параметров для идентификации нового радиоизлучающего средства, нового объекта, сигналы которого приняты и обработаны методами математической статистики.

7. Наличие отличий в значениях предложенного набора параметров, отмеченного выше устойчивого признака в зависимостях параметров, позволяет использовать предложенный набор ХП для формирования алгоритма оценки близости выборочных наборов параметров. Использование алгоритма способно в автоматическом или автоматизированном режимах выявлять выборки случайных сигналов, относящихся к одной генеральной совокупности, и обнаруживать сигналы нового радиоизлучающего средства. Варианты применения мер близости детально рассмотрены, например, в работе [19].

Заключение

В некоторых случаях задача идентификации морских объектов может быть решена путем численной обработки значений сигналов радиоизлучающих средств, установленных на судах. Подобный путь возможен при условии, если в результате обработки выборок регистрируемых сигналов могут быть обнаружены числовые параметры сигналов, характерные для радиоизлучающего средства и, следовательно, для морского объекта. Такие параметры названы в статье характеристическими параметрами.

В статье рассмотрена задача обоснования характеристических параметров выборок радиосигналов системы автоматической идентификации судов для случая, когда временной ряд сигналов содержит случайную составляющую во временных интервалах излучения сигнала и, как следствие, во времени регистрации сигнала аппаратурой наблюдения. В качестве характеристических параметров предложено использовать 28 числовых параметров, рассчитываемых методами математической статистики. Апробация возможности и целесообразности их использования, проведенная на выборках сигналов, полученных при натуральных наблюде-

ниях, показала, что предложенный набор параметров имеет свойства и признаки, позволяющие в совокупности:

– различать неоднородные выборки регистрируемых сигналов и обнаруживать таким образом появление новых морских объектов;

– использовать набор для формирования автоматизированного алгоритма оценки близости векторов характеристических параметров, вычисленных по различным выборкам регистрируемых сигналов.

Список литературы

1. *Цыпкин Я. З.* Информационная теория идентификации. М.: Наука. Физматлит, 1995. 336 с.
2. *Сильвестров А. Н., Чинаев П. И.* Идентификация и оптимизация автоматических систем. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
3. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
4. *Романов А. А., Романов А. А., Урличич Ю. М. и др.* Космические средства автоматической идентификационной системы. М.: Радиотехника, 2016. 208 с.
5. *Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С.* Основы теории сложных систем. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2007. 620 с.
6. *Загоруйко Н. Г.* Методы обнаружения закономерностей. М.: Знание, 1981. 64 с.
7. ИНТУИТ: Национальный открытый университет. Программы дистанционного обучения <http://www.intuit.ru/department/mathematics/appstat/8/2.html> (Дата обращения 19.08.2020).
8. *Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А.* Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. М.: Наука, 1973. 496 с.
9. *Орлов А. И.* Состоятельные критерии проверки абсолютной однородности независимых выборок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2012, т. 78, № 11. С. 66–70.
10. *Гхосал А.* Прикладная кибернетика и ее связь с исследованием операций. М.: Радио и связь, 1982. 128 с.
11. Математическая энциклопедия. В 5 томах. Т. 3 / Главный редактор И. М. Виноградова. М.: Советская энциклопедия, 1982. 1176 с.
12. Расстояние Минковского. https://ru.wikipedia.org/wiki/расстояние_Минковского (Дата обращения 19.08.2020).
13. *Крамер Г.* Математические методы статистики. М.: Наука, 1975. 648 с.
14. *Безуглов Д. А.* Кумулятивный метод оценки эффективности сегментного зеркала адаптивной оптической системы // Оптика атмосферы и океана, 1996, № 1. С. 78–84.
15. *Дегтярев В. Г., Шаблинский А. Г.* Вероятностные характеристики эллиптических орбит // Космические исследования, 1976, т. 14, № 4. С. 56–64.
16. *Малахов А. Н.* Кумулятивный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований. М.: Советская радио, 1978. 376 с.
17. *Шатилов С. В.* Исследование и разработка алгоритмов адаптивной фильтрации негауссовских сигналов в каналах связи: Специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. ГОУВПО ПГУТИ. Самара, 2009. 169 с.
18. *Ганин М. П.* Решение прикладных задач теории вероятностей. Выпуск 5. Л.: Военно-морская орденов Ленина и Ушакова академия имени Маршала Советского Союза Гречко А. А. 1977, 602 с.
19. *Бурнаев Е. В., Оленев Н. Н.* Мера близости для временных рядов на основе вейвлет-коэффициентов // Труды XLVIII научной конференции МФТИ. Ч. VII. Москва: Долгопрудный, 2005. С. 108–110.